

Índice

	Pág.
Agradecimientos.....	i
Índice.....	ii
Lista de Figuras.....	v
Lista de Tablas.....	x
Abreviaturas.....	xii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Estructura de la tesis.....	2
CAPÍTULO 2: ASPECTOS GENERALES DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	4
2.1 Definiciones.....	4
2.2 Antecedentes.....	6
2.2.1 Constante de inercia H.....	9
2.2.2 Respuestas de los SEP ante disturbios.....	10
2.2.2.1 Respuesta eléctrica.....	10
2.2.2.2 Respuesta inercial.....	11
2.3 Cantidades por unidad.....	11

CAPÍTULO 3: MODELADO DE DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD TRANSITORIA..... 14

3.1	Representación de Máquinas Síncronas.....	14
3.2	Modelado de Cargas.....	17
3.2.1	Modelado Clásico de la Carga en función del Voltaje.....	17
3.3	Modelado de Líneas de Transmisión.....	21
3.3.1	Aspectos generales.....	21
3.3.2	Estudio de flujos de carga.....	22
3.3.3	Cálculo de fallas.....	22
3.3.4	Relaciones entre la tensión y la corriente de una línea de transmisión...	30
3.3.5	Flujo de potencia en la línea de transmisión.....	41
3.4	Modelado de transformadores de potencia.....	47
3.4.1	Impedancia por unidad de transformadores de tres devanados.....	47
3.5	Modelado de elementos en derivación.....	54
3.5.1	Capacitores en derivación.....	54
3.5.2	Reactores en derivación.....	55
3.5.3	Condensadores síncronos.....	55
3.6	Modelado de elementos serie.....	56
3.6.1	Capacitores serie.....	56
3.7	Métodos de control de voltaje.....	57
3.7.1	Producción y absorción de potencia reactiva.....	57

CAPÍTULO 4: OPERACIÓN DEL CEV EN ESTADO ESTACIONARIO..... 59

4.1	Tipos de CEV's.....	59
4.1.1	Frecuencia fundamental de un sistema estático de VAR's.....	60
4.1.2	Interacción del CEV con el sistema eléctrico.....	61
4.1.3	Efecto del uso de capacitores conmutados.....	65
4.1.4	Los sistemas estáticos de VAR's prácticos.....	67

4.1.5	Aplicación de los compensadores estáticos de VAR's.....	68
4.2	Formas alternativas de compensación.....	69
4.3	Principio de compensación en el sistema de transmisión.....	71
4.3.1	Compensación serie fija distribuida uniformemente y compensación en derivación.....	71
4.3.2	Efecto de la compensación en el voltaje de la línea.....	73
4.3.3	Efectos de la compensación en potencia máxima.....	74
4.3.4	Compensación en derivación regulada distribuida uniformemente.....	74
4.3.5	Compensación regulada a intervalos discretos.....	76
4.3.6	Compensación regulada en medio.....	76
CAPÍTULO 5: PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		78
5.1	Sistema de prueba de Anderson-9 nodos.....	78
5.1.1	Contingencias en líneas de transmisión.....	81
5.1.2	Salida de transformadores.....	92
5.2	Sistema de prueba Micro-Red.....	103
5.2.1	Salida de los generadores y los CEV's.....	110
5.2.2	Salida de los CEV's y disparo de líneas adyacentes a ellos.....	126
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES Y SUGERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS.....		132
6.1	Conclusiones.....	132
6.2	Trabajos futuros.....	133
REFERENCIAS.....		134

Lista de Figuras

	Pág.
2.1 Rangos de tiempo para los fenómenos dinámicos.....	6
3.1 Diagrama esquemático de una máquina síncrona trifásica.....	14
3.2 Ejemplo de una sección transversal de una línea de transmisión.....	24
3.3 Caída de voltaje a lo largo de una sección de la línea de transmisión.....	25
3.4 Corrientes de carga en una línea de transmisión.....	26
3.5 Distribución típica de los conductores en línea trifásica de circuitos paralelos.....	29
3.6 El generador alimenta una carga equilibrada en Y a través de una línea de transmisión.....	31
3.7 Equivalente monofásico de un generador, carga y línea de transmisión con parámetros concentrados R, L y C.....	31
3.8 Circuito equivalente de una línea corta de transmisión.....	32
3.9 Diagramas vectoriales de una línea corta de transmisión. Todos ellos para los mismos valores de V_R e I_R	33
3.10 Circuito nominal en π de una línea de transmisión de longitud media.....	34
3.11 Circuito nominal en T de una línea de transmisión de longitud media.....	35
3.12 Voltaje y corriente de carga en un segmento de una línea de transmisión elemental.....	38
3.13 Circuito equivalente π de una línea de transmisión.....	39
3.14 Circuito equivalente exacto de una línea de transmisión de longitud L a una frecuencia dada.....	40
3.15 Vectores de la ec. (3.95) dibujados en el plano complejo con magnitudes y ángulos.....	43
3.16 Diagrama de potencia obtenido por el desplazamiento del origen de los ejes coordenados de la Fig. 3.15.....	44

3.17	Circuito equivalente de una línea de transmisión corta bajo una banda de frecuencia reducida respecto a una relación de frecuencia.....	46
3.18	Circuito equivalente de un transformador de tres devanados y símbolo correspondiente que debe utilizarse en el diagrama unifilar. Los puntos p , s y t unen el circuito del transformador a los circuitos equivalentes apropiados que representan las partes del sistema conectados a los arrollamientos primario, secundario y terciario.....	49
3.19	Transformador regulante para el control de la magnitud del voltaje.....	50
3.20	Transformador regulante para control del ángulo de fase. Los devanados dibujados paralelos entre sí están enrollados sobre el mismo núcleo magnético.....	50
3.21	Diagrama vectorial para el transformador regulante que se muestra en la Fig. 3.20.....	51
3.22	Transformadores con diferente relación de espiras conectados en paralelo. (a) Diagrama unifilar; (b) Diagrama de reactancia por unidad. La relación de espiras $1/a$ es igual a n/n'	51
3.23	Diagrama detallado de reactancia por unidad del transformador de la Fig. 3.22b, cuya relación de espiras es $1/a$	52
3.24	Circuito con las admitancias de nodo de las ecuaciones (3.116) cuando a es real	54
4.1	Sistema estático de VAR's ideal.....	60
4.2	Características V/I de un compensador ideal.....	60
4.3	Características compuestas de un SVS.....	61
4.4	Característica V-I con pendiente > 0 para CEV tipo TCR / TSC.....	62
4.5	Diagrama mostrando la interacción CEV-SEP.....	62
4.6	Característica del SEP para cambios de corrientes nodales. Característica de Voltaje-Corriente reactiva.....	62
4.7	Voltaje del SEP respecto a la característica de la corriente reactiva. a) Variación de las características del SEP por condiciones de operación b) Características de SEP para distintos niveles de falla.....	63
4.8	Solución gráfica del punto de operación de CEV para una condición dada del sistema.....	63

4.9	Interacción V-I en régimen permanente de CEV-SEP. Carga Baja.....	64
4.10	Interacción V-I en régimen permanente de CEV-SEP. Carga Alta.....	64
4.11	Uso de capacitores conmutados para ampliar el rango de control continuo.....	65
4.12	Circuito de un tiristor.....	66
4.13	Conexión antiparalelo de dos tiristores.....	66
4.14	Válvula real de tiristores.....	66
4.15	Típico sistema estático de VAR's.....	67
4.16	Características del SVS en estado estable.	
	a) Característica Voltaje-Corriente	
	b) Característica de Voltaje-Potencia reactiva.....	68
4.17	Línea con compensación regulada en medio.....	76
5.1	Diagrama unifilar del sistema Anderson-9 nodos en condiciones de pre-falla.....	80
5.2	Flujos de potencia ante la condición de apertura de la línea 4-5.....	81
5.3	Flujos de potencia ante la apertura de la Línea 4-5. Se incluye un CEV en el nodo 6.....	82
5.4	Resultados de flujos de potencia ante la apertura de la Línea 4-5, incluyendo un CEV en el nodo 8.....	83
5.5	Resultados de flujos de potencia ante la apertura de la Línea 4-5, incluyendo un CEV en el nodo 5.....	84
5.6	Perfiles de voltaje en nodos del sistema, con la apertura de la Línea 4-5 con y sin el CEV en los nodos 5, 6 y 8.....	85
5.7	Flujos de potencia resultantes de la apertura de la Línea 5-7.....	86
5.8	Flujos de potencia resultantes de la apertura de la Línea 5-7 incluyendo un CEV en el nodo 6.....	87
5.9	Resultado de flujos de potencia ante la apertura de la Línea 5-7, incluyendo un CEV en el nodo 8.....	88
5.10	Flujos de potencia resultantes de la apertura de la Línea 5-7 considerando un CEV en el nodo 5.....	89
5.11	Perfiles de voltaje en nodos del sistema, con la apertura de la línea 5-7 con y sin el CEV en los nodos 5, 6 y 8.....	90

5.12	Perfiles de voltaje en nodos del sistema, ante la apertura de las líneas L4-6, L6-9, L7-8 y L8-9.....	91
5.13	Flujos de potencia resultantes de la salida del Banco de Unidad TR 1.....	92
5.14	Diagrama resultante con la salida del Banco 2 de transformación.....	93
5.15	Distribución de flujos de potencia ante la salida del Banco TR 2, incluyendo una carga D y un CEV en el nodo 5.....	94
5.16	Flujos de potencia resultantes de la salida del Banco TR 2 incluyendo una carga D y un CEV en el nodo 6.....	95
5.17	Distribución de flujos de potencia ante la salida del Banco TR 2 incluyendo una carga D y un CEV en el nodo 8.....	96
5.18	Perfiles de voltaje en nodos del sistema ante la salida del Banco TR 2 incluyendo una carga D y un CEV.....	97
5.19	Flujos de potencia resultantes con la salida del Banco TR 3.....	98
5.20	Flujos de potencia resultantes de la salida del Banco TR 3 incluyendo una carga D y un CEV en el nodo 5.....	99
5.21	Resultados de flujos de potencia ante la salida del Banco TR 3 incluyendo una carga D y un CEV en el nodo 6.....	100
5.22	Distribución de flujos de potencia ante la salida del Banco TR 3 incluyendo una carga D y un CEV en el nodo 8.....	101
5.23	Perfiles de voltaje en nodos del sistema ante la salida de alguno de los bancos de transformación.....	102
5.24	Diagrama unifilar del anillo de 400 KV del Sistema Micro-red.....	108
5.25	Diagrama unifilar del anillo de 230 KV del Sistema Micro-red.....	109
5.26	Perfiles de voltaje de nodos del sistema ante la pérdida de la unidad generadora Antlia-U1 y algunos CEV's.....	111
5.27	Perfiles de voltaje de nodos del sistema ante la pérdida de la unidad generadora Velorum-U1 y algunos CEV's.....	113
5.28	Perfiles de voltaje de nodos del sistema ante la pérdida de la unidad generadora Kentaurus-UA y los CEV's.....	115
5.29	Perfiles de voltaje en nodos del sistema ante la pérdida de la unidad generadora Pollux-U1 y cada uno de los CEV's.....	117

5.30	Perfiles de voltaje en nodos del sistema ante la pérdida de la unidad generadora Tur-U1 y cada uno de los CEV's.....	119
5.31	Perfiles de voltaje en nodos del sistema ante la pérdida de la unidad generadora Tauro-U3 y cada uno de los CEV's.....	121
5.32	Perfiles de voltaje en nodos del sistema ante la pérdida de la unidad generadora Crux-U1 y cada uno de los CEV's.....	123
5.33	Perfiles de voltaje en nodos del sistema ante la pérdida de las unidades generadoras Vellorum-U1, Ballena-U2, Ballena-U3 y cada uno de los CEV's.....	125
5.34	Perfiles de voltaje en nodos del sistema ante la pérdida del CEV Telescopium y cada una de las líneas adyacentes al CEV.....	127
5.35	Perfiles de voltaje de los buses ante la pérdida del CEV Fénix y cada una de las líneas cercanas al CEV.....	129
	Perfiles de voltaje en nodos del sistema ante la pérdida del CEV Cráter y cada una de las líneas adyacentes al CEV.....	131

Lista de Tablas

	Pág.
4.1 Dispositivos utilizados para el control de la Potencia Reactiva.....	69
5.1 Datos de Generadores.....	78
5.2 Datos de Transformadores.....	78
5.3 Datos de Líneas de Transmisión.....	79
5.4 Datos de Cargas.....	79
5.5 Datos de Generadores.....	103
5.6 Datos de CEV's.....	104
5.7 Datos de Líneas de 400 KV.....	104
5.8 Datos de Líneas de 85 KV.....	104
5.9 Datos de Líneas de 230 KV.....	105
5.10 Datos de Transformadores.....	106
5.11 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida de generación de la unidad Antlia-U1 y cada uno de los CEV's.....	110
5.12 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida de generación de la unidad Velorum-U1 y cada uno de los CEV's.....	112
5.13 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida de generación de la unidad Kentaurus-UA y cada uno de los CEV's.....	114
5.14 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida de generación de la unidad Pollux-U1 y cada uno de los CEV's.....	116

5.15 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida de generación de la unidad Tauro-U1 y cada uno de los CEV's.....	118
5.16 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida de generación de la unidad Tauro-U3 y cada uno de los CEV's.....	120
5.17 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida de generación de la unidad Crux-U1 y cada uno de los CEV's.....	122
5.18 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida de generación de las unidades Velorum-U1, Ballena-U2, Ballena-U3 y cada uno de los CEV's.....	124
5.19 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida del CEV Telescopium y cada una de las líneas cercanas al CEV.....	126
5.20 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida del CEV Fénix y cada una de las líneas adyacentes al CEV.....	128
5.21 Aportación de potencia activa y reactiva de las unidades generadoras y los CEV's ante la pérdida del CEV Cráter y cada una de las líneas cercanas al CEV.....	130

Abreviaturas

Abreviaturas de términos conceptuales

CEV	Compensador Estático de VAR's
FACTS	Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna
Fcem	Fuerza contra electromotriz
fmm	Fuerza magnetomotriz
H	Constante de Inercia
MVAR	Mega Volt Amper Reactivos
MW	Mega Watts
km	kilómetro
p. u.	Por unidad.
P_a	Potencia acelerante
P_e	Potencia eléctrica
P_m	Potencia mecánica
rpm	Revoluciones por minuto
SEP	Sistemas Eléctricos de Potencia
SVC	Static VAR compensator
SVS	Sistema estático de VAR's
TCR	Reactor controlado con tiristores
TSC	Capacitor conmutado con tiristores

Abreviaturas de los nodos del Sistema Micro-Red

ACH	Achernar
ACU	Acuaris
ALC	Alcor
ALG	Algol
ALI	Alioth

ALT	Altair
ANT	Antares
APO	Apodis
AQU	Aquila
ARA	Auriga
ARI	Aries
ATL	Antlia
AUT	Australis
BLN	Ballena
BOR	Boreal
CAN	Canopus
CAS	Castor
CAR	Carina
CCR	Cáncer
CEF	Cefeo
CEH	Cepheus
CFD	Cefeida
CHA	Chamaéleon
CLM	Caelum
CMB	Columba
CPA	Capela
CPE	Casiopea
CPR	Capricornius
CRT	Cráter
CRX	Crux
CTS	Cetus
DFN	Delfín
DNB	Deneb
DOR	Doradus
DPA	Diphda
DRA	Dragón

DRM	Andrómeda
DRN	Aldebarán
ESP	Espiga
ETA	Beta
EYD	Pléyades
FEX	Fénix
FRT	Formalhaut
GRU	Grulla
HAD	Hadar
HAM	Hamal
HAS	Hiades
HKT	Phakt
HYD	Hydra
INS	Indus
JRF	Jirafa
KEN	Kentaurus
KLP	Kitalpha
LCE	Lince
LCT	Lacerta
LEO	León
LEP	Lepus
MES	Messier
MIR	Mira
MIZ	Mizar
MRK	Mirkaf
MRP	Microscopium
NOS	Naos
ORI	Orión
PAO	Pavo
PAS	Pegaso
PEK	Peacock

PIC	Pictor
POC	Procyon
POL	Pollux
PON	Phoenicis
POR	Polaris
PRC	Praecipua
PSO	Perseo
PYX	Pyxis
REL	Rigel
RET	Reticulum
SAG	Sagitta
SAL	Sadalsuud
SCP	Sculptor
SGN	Sygnus
SIS	Sirius
SRP	Serpens
STM	Scutum
STS	Sextans
TBA	Thuban
TEP	Telescopium
TUC	Tucana
TUR	Tauro
VEG	Vega
VIG	Virgo
VLM	Velorum