

ÍNDICE	PÁGINA
Agradecimientos.	i
Índice de Figuras.	vi
Índice de Tablas.	x
Glosario de Acrónimos y Variables.	xi
Introducción	xiv
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN.	
1.1 Introducción.	1
1.2 Antecedentes.	4
• Principios de Transmisión de Potencia Eléctrica.	
• Flujo de Potencia en Redes de Transmisión.	
• Límites de Transmisión.	
a) Restricciones físicas de la línea.	
b) Límites impuestos por la red.	
• Control de Potencia Reactiva.	
• Líneas de Transmisión Descompensadas.	
a) Compensación de Carga.	
b) Compensación de Sistema.	
1.3 Objetivo.	10
1.4 Justificación.	11
1.5 Logros.	12
1.6 Descripción del Contenido.	13

CAPÍTULO II

INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE FACTS.

2.1	Introducción.	14
2.2	Principio de Operación.	15
2.3	Tipos de Compensación, Controladores y Parámetros.	17
	a) Compensación Paralelo.	
	b) Compensación Serie.	
	c) Compensación de Ángulo de Fase.	
	d) Compensación Mixta.	
	• Controladores Combinados Serie-Serie.	
	• Controladores Combinados Serie-Paralelo.	
2.4	Importancia de los Diferentes Tipos de Controladores.	22
2.5	Beneficios del Empleo de Dispositivos FACTS.	23
2.6	Estudios para la Implementación de los Controladores FACTS.	24
	a) Estudios de Planeación.	
	b) Análisis de los Estudios.	
	c) Estudios de Diseño.	
	d) Estudios de Operación.	
	e) Fases de la Implementación.	
2.7	Conclusiones.	29

CAPÍTULO III

EL COMPENSADOR ESTÁTICO DE VAR's.

3.1	Introducción.	30
3.2	Antecedentes.	30
3.3	Elementos y Principio de Funcionamiento de un SVC.	32
3.4	Clasificación del SVC.	35
	• Reactor Controlado por Tiristores (TCR).	
	• Reactor Controlado por Tiristores con un Capacitor Fijo (TCR-FC).	
	• Capacitor Conmutado por Tiristores (TSC).	
	• Reactor Controlado por Tiristores con el Capacitor Conmutado por Tiristores (TCR-TSC).	
3.5	Curvas de Operación de un SVC.	41
3.6	Propiedades generales de un SVC.	46

3.7 Aplicaciones del SVC.	47
3.8 Conclusiones.	49

CAPÍTULO IV

EL COMPENSADOR ESTÁTICO (STATCOM).

4.1 Introducción.	50
4.2 FACTS Basados en Dispositivos Semiconductores Controlables.	50
4.3 Fuente Conmutada de Voltaje, (VSC).	52
4.4 El Compensador Estático, (STATCOM).	55
4.5 Elementos y Principio de Operación del STATCOM.	56
4.6 Curvas Características de Operación $V-I$ y $V-Q$ del STATCOM.	59
4.7 Aplicaciones.	60
4.8 Conclusiones.	62

CAPÍTULO V

COMPARACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA ENTRE STATCOM Y SVC.

5.1 Introducción.	64
5.2. Comparación de las Curvas Características $V-I$ y $V-Q$.	64
5.3 Análisis en Estado Estable.	66
5.4 Estabilidad Transitoria.	68
5.5 Tiempo de Respuesta.	71
5.6 Capacidad de Intercambio de Potencia Reactiva.	71
5.7 Tamaño Físico e Instalación.	72
5.8 Simulaciones.	73
<ul style="list-style-type: none"> • Flujos de potencia, Análisis de Estado Estable. • Análisis en Estado Transitorio. <ul style="list-style-type: none"> a) La red sin compensación durante la falla. b) La red compensada con un SVC instalado en el nodo LAGO durante la falla. c) La red compensada con un STATCOM instalado en el nodo LAGO durante la falla. • Perturbaciones dentro de una Red. 	89

a) La red sin compensación durante las perturbaciones.	
b) La red compensada con un SVC instalado en el nodo LAGO durante las perturbaciones.	
c) La red compensada con un STATCOM instalado en el nodo LAGO durante las perturbaciones.	
5.9 Análisis Económico.	105
5.10 Conclusiones.	116

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES FINALES Y TRABAJO FUTURO.

6.1 Conclusiones.	119
6.2 Trabajo a Futuro.	120
Bibliografía.	121

Índice de Figuras.

Figura	Título	Página
Figura 1.1	Modelo simple de dos sistemas.	5
Figura 1.2	Característica de la potencia activa.	5
Figura 1.3	a) Representación de las pérdidas reactivas en un SEP y b) Formas de onda para el circuito.	7
Figura 1.4	a) Línea de transmisión corta y b) Diagrama fasorial.	8
Figura 1.5	a) Sistema compensado b) Diagrama fasorial del sistema compensado.	9
Figura 2.1	Símbolo general para un controlador FACTS.	15
Figura 2.2	Controladores con equipo no convencional de almacenamiento.	16
Figura 2.3	Tipos de compensación empleando tecnología FACTS.	18
Figura 2.4	Símbolo de un controlador paralelo.	18
Figura 2.5	Símbolo de un controlador serie.	19
Figura 2.6	Compensador de ángulo de fase.	20
Figura 2.7	Símbolo de un controlador combinado serie-serie, (IPFC).	21
Figura 2.8	Controlador unificado serie-paralelo (UPFC).	21
Figura 2.9	Curvas características para los diferentes tipos de compensación.	22
Figura 3.1	a) Reactor con interruptor mecánico y b) Capacitor con interruptor mecánico.	30
Figura 3.2	a) Reactor Conmutado por una válvula de Tiristores (TCR), b) Capacitor Conmutado por Tiristores (TSC).	31
Figura 3.3	Diagrama de conexiones de un SVC.	32
Figura 3.4	Principio de la compensación en paralelo de potencia reactiva.	33
Figura 3.5	Efecto de la compensación en paralelo.	33
Figura 3.6	Filtros armónicos.	35
Figura 3.7	Formas de onda ilustrando el efecto del control del ángulo de disparo del TCR.	36
Figura 3.8	Configuración de seis-pulsos de un TCR.	37
Figura 3.9	Reactor controlado por tiristores con un capacitor fijo.	37

Figura 3.10	Capacitor conmutado por tiristores.	38
Figura 3.11	Configuraciones trifásicas del TSC.	39
Figura 3.12	Configuración general de un SVC tipo TSC-TCR.	40
Figura 3.13	Característica de la compensación estática.	41
Figura 3.14	Comportamiento del SVC en una red.	42
Figura 3.15	Actuación del SVC.	42
Figura 3.16	Comportamiento del SVC ante la salida de un circuito de transmisión.	43
Figura 3.17	Esquemas de conexión del SVC. a) Configuración sin transformador de bajada, b) Configuración con transformador de bajada.	43
Figura 3.18	a) Esquema convencional del SVC sin transformador de bajada; b) Operación característica y c) Comportamiento de la suceptancia total.	44
Figura 3.19	Curva de operación del SVC con transformador de bajada.	46
Figura 3.20	SVC de 420 kV en Sylling, Noruega.	48
Figura 3.21	Banco de capacitores del SVC dentro de la subestación la Horqueta, Venezuela.	48
Figura 4.1	Símbolo general de: a) GTO e b) IGBT.	51
Figura 4.2	VSC trifásico de tres niveles con conmutadores IGBT.	53
Figura 4.3	VSC de seis pulsos.	54
Figura 4.4	Formas de onda para distintas configuraciones de VSC.	54
Figura 4.5	Modulación por ancho de pulso.	55
Figura 4.6	Diagrama unifilar del STATCOM.	56
Figura 4.7	Circuito Equivalente del STATCOM.	57
Figura 4.8	Intercambio de potencia reactiva entre el STATCOM y el sistema de CA.	57
Figura 4.9	Curva característica $V-I$ del STATCOM.	59
Figura 4.10	Característica voltaje-potencia reactiva del STATCOM.	60
Figura 4.11	STATCOM dentro de la subestación Teine, Japón.	61
Figura 4.12	Subestación Sullivan, Tennessee, USA.	62
Figura 5.1	Curvas características $V-I$ del a) STATCOM y b) SVC.	65
Figura 5.2	Curvas características $V-Q$ del a) STATCOM y b) SVC.	66
Figura 5.3	Circuito equivalente del STATCOM.	67

Figura 5.4	SVC visto como una reactancia en paralelo.	67
Figura 5.5	Comparación de la curva característica a) $V-I$ y b) $V-Q$ entre el SVC y STATCOM.	68
Figura 5.6	Potencia transmitida contra el ángulo de transmisión de un sistema de dos máquinas con un STATCOM en un punto medio a), y con un SVC en un punto medio b), obtenidos con valores de VAR diferentes.	79
Figura 5.7	Mejoramiento de estabilidad transitoria logrado con un STATCOM en punto medio a), y SVC en punto medio b) de un valor de VAR dado.	70
Figura 5.8	Intercambio de potencia activa y reactiva entre el STATCOM con fuente de Almacenamiento de Energía y el Sistema de CA.	72
Figura 5.9	Comparación de instalación física para a) SVC y b) STATCOM.	73
Figura 5.10	Red principal de cinco nodos.	74
Figura 5.11	Flujos de potencia, red simple.	76
Figura 5.12	Flujos de potencia instalando un compensador SVC en la red.	77
Figura 5.13	Flujos de potencia instalando un compensador STATCOM en la red.	78
Figura 5.14	Falla trifásica en el nodo SUR.	79
Figura 5.15	Magnitud de voltaje en los nodos para la falla trifásica.	80
Figura 5.16	Velocidad del rotor de las máquinas para la falla trifásica.	81
Figura 5.17	Ángulo del rotor de las máquinas para la falla trifásica.	82
Figura 5.18	Magnitud de voltaje en los nodos para la falla trifásica con SVC instalado.	83
Figura 5.19	Velocidad del rotor de las máquinas para la falla trifásica con SVC instalado.	84
Figura 5.20	Ángulo del rotor de las máquinas para la falla trifásica con SVC.	84
Figura 5.21	Operación de SVC durante la falla trifásica.	85
Figura 5.22	Magnitud de voltaje en los nodos para la falla trifásica con STATCOM instalado.	86
Figura 5.23	Velocidad del rotor de las máquinas para la falla trifásica con STATCOM instalado.	87

Figura 5.24	Ángulo del rotor de las máquinas para la falla trifásica con STATCOM instalado.	87
Figura 5.25	Operación del STATCOM durante la falla trifásica.	89
Figura 5.26	Voltajes de los nodos durante las perturbaciones.	91
Figura 5.27	Diferencia de ángulos nodales durante las perturbaciones.	92
Figura 5.28	Potencia activa durante las perturbaciones en las siete líneas.	93
Figura 5.29	Potencia reactiva durante las perturbaciones en las siete líneas.	93
Figura 5.30	Magnitud de voltajes de los nodos durante las perturbaciones conectando el SVC.	94
Figura 5.31	Diferencia de ángulos nodales durante las perturbaciones conectando el SVC.	95
Figura 5.32	Potencia activa durante las perturbaciones en las siete líneas con la presencia del SVC.	96
Figura 5.33	Potencia reactiva durante las perturbaciones en las siete líneas con la presencia del SVC.	97
Figura 5.34	Magnitud de voltaje en el nodo SVC.	98
Figura 5.35	Potencia reactiva suministrada por el SVC.	99
Figura 5.36	Magnitud de voltajes de los nodos durante las perturbaciones conectando el STATCOM.	100
Figura 5.37	Diferencia de ángulos nodales durante las perturbaciones conectando el STATCOM.	100
Figura 5.38	Potencia activa durante las perturbaciones en las siete líneas con la presencia del STATCOM.	102
Figura 5.39	Potencia reactiva durante las perturbaciones en las siete líneas con la presencia del STATCOM.	103
Figura 5.40	Magnitud de voltaje en el nodo STATCOM.	104
Figura 5.41	Potencia reactiva suministrada por el STATCOM.	104

Índice de Tablas.

Tabla	Título	Página
Tabla 4.1	Características principales de funcionamiento de los GTO e IGBT convencionales.	52
Tabla 5.1	Caraterísticas principales de los generadores.	74
Tabla 5.2	Características principales de los nodos.	75
Tabla 5.3	Características principales de las líneas.	75
Tabla 5.4	Características principales de las cargas.	75
Tabla 5.5	Caraterísticas principales de los generadores.	89
Tabla 5.6	Características principales de los nodos.	89
Tabla 5.7	Características principales de las líneas.	90
Tabla 5.8	Características principales de las cargas.	90
Tabla 5.9	Perturbaciones a la red.	90
Tabla 5.9.1	Desglose de Precios de un SVC en 400 kV de ± 300 MVAR's.	107
Tabla 5.9.2	Desglose de precios de un STATCOM en 400 kV de ± 300 MVAR's.	111
Tabla 5.9.3	Resumen de precios para un SVC en 400 kV de ± 300 MVAR's.	115
Tabla 5.9.4	Resumen de precios para un STATCOM en 400 kV de ± 300 MVAR's.	116
Tabla 5.10	Resumen técnico-comparativo entre SVC y STATCOM de CIGRE.	117

Glosario de Acrónimos y Variables.

- **Acrónimos.**

SEP	Sistema Eléctrico de Potencia.
MW	Mega Watts.
SVC	Static VAR Compensator.
CFE	Comisión Federal de Electricidad.
FP	Flujo de Potencia.
OPF	Flujo de Potencia Óptimo.
PSS/E	Power System Simulator for Engineering.
ASP	Active Server Pages (Software).
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission System.
STATCOM	Static Synchronous Compensator.
IEEE-PES	Institute of Electrical and Electronics Engineers – Power Electric Systems.
kV	Kilo Volts.
kA	Kilo Amperes.
GTO	Gate Turn-off Thyristor.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor.
STATCOM/BESS	Static Compensator with Battery Energy Storage Systems.
TCR	Thyristor Controlled Reactor.
TSR	Thyristor Switched Reactor.
TCR-FC	Thyristor Reactor Controlled with Fixed Capacitor.
TSC	Thyristor Switched Capacitor.
TSSC	Thyristor Switched Series Capacitor.
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor.
SSVC	Series Static VAR Compensator.
SSSC	Static Synchronous Series Compensator.
CA	Corriente Alterna.
PAR	Phase Angle Shifter.
TCPST	Thyristor Controller Phase Shift Transformer.
CD	Corriente Directa.
IPFC	Interline Power Flow Controller.
UPFC	Unified Power Flow Controller.
MVA	Mega Volts Amperes.
EPRI	Electric Power Research Institute.
MSR	Mechanical Switch Reactor.
MSC	Mechanical Switch Capacitor.
VAR	Volts Amperes Reactivos.

MVAR	Mega Volts Amperes Reactivos.
ms	Miliseundos.
L	Inductancia.
B	Suceptancia.
Q	Potencia Reactiva.
HVDC	High Voltage Direct Current.
KHz	Kilo Hertz.
VSC	Voltage Source Converter.
PWM	Pulse Width Modulation.
SSC	Static Synchronous Compensator.
μ s	Microsegundos.
$^{\circ}$	Grados.
Z	Impedancia.
V	Voltaje.
I	Corriente.

- **Variables.**

V_s	Magnitud de Voltaje del Sistema Emisor.
V_r	Magnitud de voltaje del Sistema Receptor.
δ	Ángulo de Fase entre V_s y V_r (Ángulo de Transmisión o Carga).
X_l	Reactancia Característica de la Línea.
I_X	Magnitud de Corriente Reactiva.
Δ	<i>Incremento de una Variable.</i>
I_L	Corriente de Carga.
I_C	Corriente Capacitiva.
I_{Cmax}	Corriente de Salida Capacitiva Máxima.
α	Ángulo de Encendido, alfa.
β	Ángulo de Apagado, beta.
γ	Ángulo de Conducción, gama.
V_M	Voltaje Medio.
$P^{máx}$	Potencia Máxima.
V_{ref}	Voltaje de Referencia.
X_{eq}	Característica Equivalente del Sistema.
X_{SVC}	Característica del Sistema SVC.
I_{SVC}	Corriente Inyectada por el SVC.
V_{SVC}	Voltaje del SVC.
B_{SVC}	Suceptacia del SVC.
Q_{SVC}	Potencia Reactiva Inyectada por el SVC.
B_{Cn}	Suceptancia de “n” Capacitores.
B_{TCR}	Suceptancia del TCR.

B_L	Suceptancia del Reactor
B_σ	Suceptancia del Transformador.
$V_{STATCOM}$	Voltaje a la Salida del Convertidor del STATCOM.
V_T	Voltaje del Sistema.
X	Reactancia de Acoplamiento.
δ	Ángulo entre $V_{STATCOM}$ y V_T
δ_c	Ángulo de Transmisión Crítico.
φ	Angulo de fase entre Voltaje y Corriente.