

# Tabla de Contenido

---

1.	Introducción.....	11
1.1	Motivación.....	11
1.2	Objetivos.....	12
1.2.1	Objetivo general.....	12
1.2.2	Objetivos específicos.....	12
1.3	Alcances.....	12
1.4	Metodología.....	13
1.4.1	Análisis Teórico y Levantamiento de Prácticas Internacionales.....	13
1.4.2	Caracterización del Sistema 154 kV.....	13
1.4.3	Análisis de la Caracterización.....	14
1.4.4	Propuesta de Compensación.....	14
1.4.5	Validación mediante DigSilent.....	14
2.	Elementos Teóricos Aplicables a la Compensación de Reactivos en Los Sistemas Zonales	15
2.1	Sistema Eléctrico de Potencia.....	15
2.1.1	Clasificación por Función.....	15
2.1.2	Clasificación por Nivel de Tensión.....	15
2.2	Potencia Eléctrica.....	16
2.3	Factor de Potencia.....	19
2.4	Consumos.....	20
2.4.1	Demanda.....	20
2.4.2	Factor de Diversidad.....	20
2.4.3	Factor de Coincidencia.....	21
2.5	Impacto de Reactivos en el Sistema.....	21
2.6	Compensación de Reactivos.....	21
2.6.1	Compensación Shunt.....	22
2.6.2	Compensación Serie.....	25
2.7	Transformador de Poder.....	25
2.7.1	Principio de Funcionamiento.....	25
2.7.2	Modelo Equivalente Monofásico.....	26
2.7.3	Refrigeración.....	27
2.7.4	Consumo Interno.....	28

2.7.5	Cambiadores de Derivación.....	29
3.	Análisis del Marco Regulatorio y Normativas Chilenas .....	30
3.1	Ley General de Servicios Eléctricos .....	30
3.1.1	Coordinador Independiente del Sistema Eléctrico Nacional.....	32
3.1.2	Servicios Complementarios.....	32
3.2	Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio .....	34
4.	Benchmarking de Prácticas Nacionales e Internacionales .....	36
4.1	Prácticas Internacionales: Recomendaciones para Entidades en Jurisdicción de NERC 36	
4.1.1	Estrategias y Prácticas Recomendadas por la “Reliability Guideline: Reactive Power Planning” .....	37
4.1.2	Tratamiento de Reactivos en Estados Unidos .....	41
4.2	Prácticas en Chile.....	50
4.2.1	Enel.....	50
4.2.2	Saesa.....	52
5.	Análisis del Sistema de Transmisión Zonal entre Subestación Alto Jahuel y Charrúa.....	54
5.1	Sistema de 154 kV y sus Requerimientos de Reactivos .....	54
5.1.1	Totalización de las demandas en MT .....	57
5.1.2	Diagrama unilineal del sistema.....	57
5.2	Metodología de Caracterización .....	58
5.3	Caracterización Actual del Parque de Transformadores Sistema 154 kV .....	60
5.3.1	Compensación de Reactivos Instalada en Sistema 154 kV .....	62
5.4	Proyectos Nuevos .....	63
5.4.1	Proyectos Publicados Mediante Resolución Exenta N°418.....	63
5.4.2	Proyectos Publicados Mediante Resolución Exenta N°528.....	65
5.5	Caracterización del Parque de Transformadores Sistema 154 kV Con Inclusión de Proyectos Nuevos .....	66
5.6	Determinación del Consumo Interno Reactivo Teórico .....	69
5.7	Obtención de Curvas de Carga y Consumo Interno Reactivo Estimado .....	70
5.7.1	Curvas de Carga .....	70
5.7.2	Consumo Interno Reactivo Estimado.....	72
5.8	Análisis de la Caracterización.....	74
6.	Metodología de Análisis para la Determinación de la Propuesta de Compensación .....	77
6.1	Etapa 1: Estudio de los Requerimientos de Reactivos.....	77
6.1.1	Análisis y Caracterización de Equipos: Transformadores y BBCC.....	77

6.1.2	Modelación del Parque de Transformadores y Determinación del Consumo Propio de Reactivos.....	78
6.1.3	Análisis de las Curvas de Consumo de Reactivos.....	79
6.1.4	Propuesta Preliminar de compensación.....	80
6.2	Etapa 2: Análisis Sistémico del Plan de Compensación.....	81
6.2.1	Simulación de Flujos de Potencia.....	81
6.2.2	Simulación de Contingencias.....	81
7.	Análisis de la Metodología y Resultados.....	82
7.1	Propuesta de Compensación.....	82
7.1.1	Chacahuín.....	84
7.1.2	El Peumo.....	85
7.1.3	Graneros.....	86
7.1.4	Isla de Maipo.....	87
7.1.5	Machalí.....	88
7.1.6	Rosario.....	89
7.1.7	Teno.....	90
7.1.8	Bajo Melipilla.....	92
7.1.9	Piduco.....	93
7.2	Validación de la Propuesta Mediante DigSilent.....	94
7.2.1	Análisis de Flujos de Potencia.....	94
7.2.2	Análisis de Contingencias.....	98
8.	Conclusiones.....	100
8.1	Conclusiones Generales.....	100
8.2	Conclusiones sobre Aspectos Específicos del Trabajo de Título.....	100
9.	Bibliografía.....	103
10.	Anexos.....	106
10.1	Anexo A: Resumen de la Experiencia Internacional Recopilada.....	106
10.2	Anexo B: Listado de Trasformadores Sistema 154kV con sus Parámetros de Modelación Matemática.....	113
10.3	Anexo C: Detalle del Consumo Interno Reactivo para cada Trasformador y Nivel de Carga. 118	
10.4	Anexo D: Resultados de la Validación con Simulación DigSilent.....	122

## Índice de tablas

Tabla 1: Resumen comparativo de los sistemas nuevos incluidos por la Ley N° 20.936. ....	30
Tabla 2: Resumen de los contenidos de planificación incluidos en la LGSE. ....	31
Tabla 3: Resumen de los requerimientos indicados en el Reglamento de SSCC. ....	33
Tabla 4: Resumen de los requerimientos de reactivos de acuerdo con la NTSyCS. ....	34
Tabla 5: Entidades revisadas, su categoría y enfoque de compensación. [26]. ....	42
Tabla 6: Especificaciones de la compensación de línea realizada por ISO-NE. ....	44
Tabla 7: Criterios utilizados por las compañías transmisoras para fijar su factor de potencia. [28] .....	45
Tabla 8: Resumen de las prácticas operacionales de ISO NE para compensar el factor de potencia. .....	46
Tabla 9: Regiones de Chile y sus respectivas horas de interrupción de servicio eléctrico al año. ....	55
Tabla 10: Proyectos de equipos transformadores de dos devanados a incluir mediante resolución exenta N°418. ....	63
Tabla 11: Proyectos de a incluir mediante resolución exenta N°418 que no contienen la inclusión de nuevos equipos transformadores. ....	64
Tabla 12: Proyectos de bancos de condensadores a incluir mediante resolución exenta N°528. ....	65
Tabla 13: Resumen caracterización sistema con proyectos actuales. ....	74
Tabla 14: Resumen caracterización sistema con proyectos actuales y nuevos. ....	74
Tabla 15: Transformadores a analizar. ....	80
Tabla 16: Propuesta de compensación Chacahuín. ....	84
Tabla 17: Propuesta de compensación El Peumo. ....	85
Tabla 18: Propuesta de compensación Graneros. ....	86
Tabla 19: Propuesta de compensación Isla de Maipo. ....	87
Tabla 20: Propuesta de compensación Machalí. ....	88
Tabla 21: Propuesta de compensación Rosario. ....	89
Tabla 22: Propuesta de compensación Teno 1. ....	90
Tabla 23: Propuesta de compensación Teno 2. ....	91
Tabla 24: Propuesta de compensación Bajo Melipilla. ....	92
Tabla 25: Propuesta de compensación Piduco. ....	93
Tabla 26: Estándares y criterios de compensación de reactivos Ercot, FRCC, Miso e ISO NE. ....	106
Tabla 27: Estándares y criterios de compensación de reactivos PJM, Southern Company y Salt River Project. ....	109
Tabla 28: Estándares y criterios de compensación de reactivos EKPC y Electric System Planning. .....	111
Tabla 29: Listado de equipos actuales, con inclusión de proyectos futuros y ampliaciones, con sus parámetros más relevantes. ....	113
Tabla 30: Listado de equipos actuales, con inclusión de proyectos futuros y ampliaciones, con su consumo interno reactivo para cada nivel de carga. ....	118
Tabla 31: Porcentajes de disminución de la cargabilidad de líneas en presencia de BBCC propuestos, escenario verano. ....	122
Tabla 32: Porcentajes de disminución de la cargabilidad de transformadores de dos devanados en presencia de BBCC propuestos, escenario verano. ....	126

Tabla 33: Porcentajes de disminución de la cargabilidad de transformadores de tres devanados en presencia de BBCC propuestos, escenario verano. ....	130
Tabla 34: Porcentajes de disminución de la cargabilidad de líneas en presencia de BBCC propuestos, escenario invierno. ....	132
Tabla 35: Porcentajes de disminución de la cargabilidad de transformadores de dos devanados en presencia de BBCC propuestos, escenario invierno. ....	136
Tabla 36: Porcentajes de disminución de la cargabilidad de transformadores de tres devanados en presencia de BBCC propuestos, escenario invierno. ....	140
Tabla 37: Mejoras en la cargabilidad de las líneas para contingencias, escenario verano. ....	142

# Índice de ilustraciones

Figura 1: Diagrama de la metodología usada. ....	13
Figura 2: Gráfica sinusoidal de la potencia eléctrica.....	18
Figura 3: Diagrama fasorial corriente vs tensión.....	19
Figura 4: Diagrama fasorial P vs Q. ....	19
Figura 5: Diagrama fasorial del efecto de la compensación shunt. ....	23
Figura 6: Esquemático básico del principio de funcionamiento del transformador. [7] .....	26
Figura 7: Esquemático modelo interno transformador real. [7] .....	27
Figura 8: Esquemático simplificado al despreciar las componentes resistivas. ....	28
Figura 9: Curvas QV típicas. [26] .....	39
Figura 10: Curvas PV típicas. [26] .....	40
Figura 11: Mapa de EE. UU. con la ubicación espacial de las entidades revisadas.....	41
Figura 12: Jurisdicciones a las que está sometido ISO NE. ....	43
Figura 13: Ejemplo de curvas de factor de potencia generadas como estándares por el estudio. ...	46
Figura 14: Zonas de servicio de los integrantes de EKPC. ....	47
Figura 15: Zona de concesión de Enel distribución. ....	50
Figura 16: Zona de estudio correspondiente al sistema de 154 kV. [40] .....	56
Figura 17: Totalización de la demanda y su proyección al 2042. [40].....	57
Figura 18: Diagrama unilineal simplificado sistema 154 y 66 kV. [40] .....	57
Figura 19: Esquema de la metodología utilizada para la caracterización del sistema.....	58
Figura 20: Dispersión actual de equipos transformadores para el sistema de 154kV. ....	61
Figura 21: Dispersión actual de BBCC para el sistema de 154kV.....	62
Figura 22: Dispersión de transformadores para el sistema de 154kV con inclusión de nuevos proyectos.....	67
Figura 23: Dispersión de BBCC para el sistema de 154kV con inclusión de nuevos proyectos. .	68
Figura 24: Curvas de consumo propio reactivo para equipos del parque transformador. ....	69
Figura 25: Unilineal de la subestación Rosario. ....	70
Figura 26: Serie temporal de potencia activa y reactiva de la subestación Rosario.....	71
Figura 27: Carga de la subestación Rosario. ....	71
Figura 28: Esquemático del transformador y el punto de medición. ....	72
Figura 29: Esquemático del principio usado para calcular el consumo interno reactivo. ....	72
Figura 30: Consumo interno reactivo de la subestación Rosario. ....	73
Figura 31: Comparación actual y 2020 de capacidad instalada de transformadores y BBCC. ....	75
Figura 32: Déficit de reactivos debido al consumo interno.....	76
Figura 33: Razón representativa de qué porcentaje del Q total suministrado representa el consumo interno.....	76
Figura 34: Esquema resumen de la propuesta metodológica. ....	77
Figura 35: Consumo interno reactivo equipos 30 MVA. ....	78
Figura 36: Determinación de etapas de compensación subestación Piduco.....	79
Figura 37: Ubicación de las subestaciones escogidas para compensar. ....	83
Figura 38: Ubicación geográfica de los BBCC instalados y líneas que presentan mejoras. ....	95
Figura 39: Líneas con mejoras, zona Sur de Santiago - Rancagua.....	95
Figura 40: Transformadores 2D y 3D con mejoras, zona Sur de Santiago - Rancagua. ....	96
Figura 41: Transformadores 2D con mejoras, zona San Fernando - Teno.....	96

Figura 42: Líneas con mejoras, zona Talca - Linares.....	97
Figura 43: Transformadores 2D y 3D con mejoras, zona Talca - Linares. ....	97
Figura 44: Mejoras de líneas frente a pérdida de circuito 1 Alto Jahuel - Punta de Cortes 154 kV, zona Sur de Santiago - Rancagua. ....	98
Figura 45: Mejoras de líneas frente a pérdida de circuito 1 Alto Jahuel - Punta de Cortes 154 kV, zona Talca – Linares.....	99