

Tabla de Contenido

Resumen	i
Agradecimientos	iii
Lista de Figuras	vii
Lista de Tablas	ix
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivo general.....	1
1.1. Objetivos específicos.....	1
1.3. Estructura de la memoria.....	2
Capítulo 2 Marco teórico	3
2.1 Transformador de Poder	3
2.1.1 Introducción	3
2.1.2 Transformador ideal de dos enrollados.....	3
2.1.3 Transformador real	5
2.1.4 Rendimiento	11
2.1.5 Regulación de tensión.....	11
2.1.6 Ensayos a transformadores.....	11
2.1.7 Conexión en paralelo de transformadores monofásicos.....	14
2.2 Microformer	15
2.2.1 Introducción	15
2.2.2 El transformador de horno microondas (<i>MOT</i>).....	15
2.2.3 Modificación de los <i>MOT</i> 's.....	15
2.2.4 Resultados de estudios previos del Microformer	16
2.2.5 Adaptación del <i>MOT</i> como transformador de distribución	18
2.3 Sistemas de distribución	19
2.3.1 Características de los sistemas de distribución.....	19
2.3.2 Tipos de sistema de distribución.....	20
2.3.3 Sistema de distribución rural.....	20
2.4 Regulación de tensión.....	21

2.4.1	Tetrapolo del Microformer (circuito T o estrella)	21
2.4.2	Diagrama del extremo receptor y regulación de transmisiones radiales con admitancia.....	22
2.5	Estándares y normas.....	23
2.5.1	Niveles de tensión	23
2.5.2	Armónicos	24
2.5.3	Temperatura.....	25
Capítulo 3 Implementación.....		26
3.1	Construcción de Microformers	26
3.1.1	Caracterización de MOT's.....	26
3.1.2	Modificación de MOT's	29
3.2	Red experimental	31
3.2.1	Requerimientos.....	31
3.2.2	Diseño.....	31
3.2.3	Red experimental propuesta.....	36
3.2.4	Construcción.....	37
3.3	Modelo de red experimental en DigSILENT.....	41
3.3.1	Descripción	41
3.3.2	Componentes.....	42
Capítulo 4 Análisis y resultados		47
4.1	Pruebas de los Microformers.....	47
4.1.1	Primeras pruebas	47
4.1.2	Segundas pruebas.....	51
4.1.3	Análisis de resultados	54
4.2	Pruebas de la red experimental.....	57
4.2.1	Descripción general	57
4.2.2	Prueba sin condensadores	57
4.2.3	Prueba con condensador en alta tensión	58
4.2.4	Prueba con condensadores en baja	59
4.2.5	Armónicos	60
4.3	Simulaciones del modelo de la red experimental en DigSILENT.....	64
4.3.1	Prueba sin condensadores	64
4.3.2	Prueba con condensador en alta.....	65

4.3.3	Prueba con condensadores en baja	66
4.4	Análisis de las pruebas de la red experimental y su modelo en DigSILENT.....	67
4.4.1	Análisis de resultados	67
4.4.2	Validación del modelo.....	68
4.5	Simulación y análisis del modelo de red experimental en DigSILENT	71
4.5.1	Descripción	71
4.5.2	Caso Base	71
4.5.3	Caso 1: Microformers alimentadores en paralelo.....	72
4.5.4	Caso 2: Condensadores óptimos en alta	74
4.5.5	Caso 3: Generación distribuida	81
4.5.6	Caso 4: Red aislada.....	83
4.5.7	Observaciones generales	85
4.6	Incorporación del Microformer en red IEEE	87
Capítulo 5 Conclusiones		90
Bibliografía		93
Anexo A: Modelo de red IEEE de 34 nodos.....		95

Lista de Figuras

Figura 2.1: Principio de funcionamiento del transformador de dos enrollados	3
Figura 2.2: Circuito magnético equivalente.....	5
Figura 2.3: Flujo mutuo y flujos de fuga.....	6
Figura 2.4: Circuito equivalente incluyendo el efecto de flujos de fuga.	8
Figura 2.5: Circuito equivalente incluyendo resistencias de los enrollados.....	8
Figura 2.6: Circuito equivalente incluyendo reactancia de magnetización.....	9
Figura 2.7: Corriente en vacío para núcleo con pérdidas [5].....	10
Figura 2.8: Representación fasorial de corriente en vacío para núcleo con pérdidas [5].	10
Figura 2.9: Circuito equivalente exacto del transformador real.	11
Figura 2.10: Prueba de polaridad con corriente continua.	12
Figura 2.11: Prueba de circuito abierto	13
Figura 2.12: Prueba en cortocircuito.	14
Figura 2.13: Unidad MOT típica [1].	15
Figura 2.14: Adición de espiras a enrollado primario [7].....	16
Figura 2.15: Esquema del contenedor del MOT hecho con tarro de pintura y bornes de PVC [1].....	18
Figura 2.16: Sistema eléctrico típico donde se muestra las divisiones operacionales [10]...	19
Figura 2.17: Circuito T o estrella.....	21
Figura 2.18: Diagrama del extremo receptor [2].....	23
Figura 3.1: Dimensiones del núcleo.....	26
Figura 3.2: MOT 1	27
Figura 3.3: MOT 2	27
Figura 3.4: MOT 3	27
Figura 3.5: MOT 4	27
Figura 3.6: MOT 5.....	27
Figura 3.7: MOT 6	27
Figura 3.8: MOT 7	28
Figura 3.9: MOT 8	28
Figura 3.10: MOT 9.....	28
Figura 3.11: MOT 10	28
Figura 3.12: Red experimental propuesta.....	32
Figura 3.13: carga resistiva	34
Figura 3.14: Condensador de baja tensión (a) y condensador de microondas de 2kV (b) ...	35
Figura 3.15: Esquema de la red experimental	36
Figura 3.16: Contenedor de MOT's	37
Figura 3.17: Resistencia construida con alambre de tantalio y acrílico	38
Figura 3.18: Vista superior de caja de resistencias	38
Figura 3.19: Condensadores de alta	39
Figura 3.20: Caja contenedora de seis resistencias junto al arreglo de condensadores	39
Figura 3.21: Red experimental de Microformers	40
Figura 3.22: Red experimental implementada en DigSILENT.....	41
Figura 3.23: Modelo del transformador en DigSILENT [16]	43

Figura 3.24: Conexión D-D para transformador monofásico [16]	44
Figura 3.25: Carga fase neutro [16]	45
Figura 4.1: Variación de la temperatura de los transformadores en el tiempo.....	48
Figura 4.2: Esquema de prueba de regulación	51
Figura 4.3: Curva de saturación de los MOT's de bajada	53
Figura 4.4: Curva de saturación de los MOT's de subida.....	54
Figura 4.5: Curvas saturada y no saturada del MOT 6.....	56
Figura 4.6: Flujo de potencia del caso base	72
Figura 4.7: Flujo de potencia con Microformers de subida en paralelo	73
Figura 4.8: Flujo de potencia del caso base con condensadores en alta.....	76
Figura 4.9: Flujo de potencia con Microformers trifásicos en paralelo y condensadores	79
Figura 4.10: Flujo de potencia con transformador industrial y compensación.....	80
Figura 4.11 Flujos de potencia con generación distribuida	82
Figura 4.12: Flujos de potencia con MOT 11 en generación distribuida.....	83
Figura 4.13: Flujo de potencia para la red experimental aislada	85
Figura 4.14: Modelo de red IEEE 34 nodos.....	87
Figura 4.15: Red 2.3 y 3.1 en la red modelo IEEE 34 nodos	89

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Parámetros del MOT norteamericano referido al primario.....	17
Tabla 2.2: Parámetros del MOT norteamericano referido al primario sin barras magnéticas.	17
Tabla 2.3: Parámetros del MOT chileno referido al primario con distintas modificaciones.	17
Tabla 2.4: Límites de distorsión de tensión.....	24
Tabla 2.5: Límites de distorsión de corriente para sistemas entre 120 V y 69 kV	24
Tabla 3.1: Dimensiones de los transformadores	27
Tabla 3.2: Datos de placa de los transformadores	28
Tabla 3.3: Número de vueltas calculados para cada transformador	30
Tabla 3.4: Número de espiras extras por transformador.....	30
Tabla 3.5: Posición final de los Microformers	32
Tabla 3.6: Características del cable de 14 AWG	33
Tabla 3.7: Características de las líneas del circuito propuesto	34
Tabla 3.8: Valores de las cargas resistivas	34
Tabla 3.9: Características de los condensadores.....	35
Tabla 3.10: Valores de resistencia de línea del laboratorio.	38
Tabla 3.11: Tensiones nominales de las barras	42
Tabla 3.12: Parámetros del transformador trifásico MOT 3F	43
Tabla 3.13: Parámetros de los Microformers de bajada.....	44
Tabla 3.14: Potencia nominal de las cargas.....	45
Tabla 3.15: Características de los condensadores	45
Tabla 3.16: Parámetros de línea	46
Tabla 4.1: Resultados de la prueba de calentamiento	47
Tabla 4.2: Razón de transformación de los MOT's sin barras magnéticas y modificados	49
Tabla 4.3: Resultados de la prueba en vacío	49
Tabla 4.4: Resultados de la prueba de cortocircuito.....	50
Tabla 4.5: Resultados de la prueba de regulación MOT 2.....	51
Tabla 4.6: Razón de transformación de los MOT's de bajada	52
Tabla 4.7: Resultado de la prueba en vacío para los MOT's de bajada.....	52
Tabla 4.8: Resultados de la prueba de cortocircuito para los MOT's de bajada	52
Tabla 4.9: Resultados de la prueba de regulación MOT 2 modificado.	54
Tabla 4.10: Parámetros de los Microformers.	55
Tabla 4.11: Valores promedios de los parámetros.	55
Tabla 4.12: Prueba sin condensadores en vacío.....	58
Tabla 4.13: Prueba sin condensadores a media carga.....	58
Tabla 4.14: Prueba sin condensadores a plena carga	58
Tabla 4.15: Prueba con condensador en alta en vacío	59
Tabla 4.16: Prueba con condensador en alta a media carga	59
Tabla 4.17: Prueba con condensador en alta a plena carga	59
Tabla 4.18: Prueba con condensadores en baja en vacío	60
Tabla 4.19: Prueba con condensadores en baja a media carga.....	60
Tabla 4.20: Prueba con condensadores en baja a plena carga.....	60

Tabla 4.21: Distorsión armónica en vacío	61
Tabla 4.22: Distorsión armónica a plena carga	61
Tabla 4.23: Distorsión armónica en vacío con condensadores de alta tensión.	62
Tabla 4.24: Distorsión armónica a plena carga con condensadores de alta tensión.	62
Tabla 4.25: Distorsión armónica en alimentador en vacío con condensadores de baja tensión.....	63
Tabla 4.26: Distorsión armónica a plena carga con condensadores de baja tensión.	63
Tabla 4.27: Distorsión armónica a plena carga con condensadores de baja tensión sin MOT's 8 y 10.	64
Tabla 4. 28: Resultados de la prueba sin condensadores en circuito abierto en DigSILENT	64
Tabla 4.29: Resultados de la prueba sin condensadores con carga C1 en DigSILENT.....	65
Tabla 4. 30: Resultados de la prueba sin condensadores con carga C2 en DigSILENT.....	65
Tabla 4.31: Resultados de la prueba con condensador 3 en circuito abierto en DigSILENT	65
Tabla 4. 32: Resultados de la prueba con condensador 3 bajo carga C1 en DigSILENT.....	66
Tabla 4.33: Resultados de la prueba con condensador 3 bajo carga C2 en DigSILENT.....	66
Tabla 4.34: Resultados de la prueba con condensadores en baja en vacío en DigSILENT....	66
Tabla 4.35: Resultados de la prueba con condensadores en baja con carga C1 en DigSILENT	67
Tabla 4.36: Resultados de la prueba con condensadores en baja con carga C3 en DigSILENT	67
Tabla 4.37: Errores entre los resultados de las pruebas en vacío de la red y su modelo	69
Tabla 4.38: Errores entre los resultados de las pruebas con condensador en alta de la red y su modelo.....	69
Tabla 4.39: Errores entre los resultados de las pruebas con condensadores en baja de la red y su modelo	70
Tabla 4.40: Errores entre los MOT's de subida y el MOT 3F	70
Tabla 4.41: Potencia nominal de los consumos del caso base.....	71
Tabla 4.42: Consumo de reactivos de los Microformers de bajada.....	75
Tabla 4.43: Consumo total de reactivos en la red por fase a plena carga	76
Tabla 4.44: Potencia nominal de los consumos nuevos.....	77
Tabla 4.45: Potencia reactiva consumida por fase en la red.....	77
Tabla 4.46: Largo de líneas para el caso 3.....	81
Tabla 4.47: Fuentes de generación	81
Tabla 4.48: Microformers usados para el caso 4	84
Tabla 4.49: Consumo y generación de potencia reactiva	84
Tabla 4.50: Resistividad de conductores	86
Tabla 4.51: Sección transversal de conductores.....	86
Tabla 4.52: Largos máximos de línea por Microformer.....	86
Tabla 4.53: Largo mínimo de línea.....	87
Tabla 4.54: Variación de potencia en el nodo 888	88