

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	2
1.1.1	Objetivos generales	2
1.1.2	Objetivos específicos	2
1.2	Alcances	3
1.3	Estructura del trabajo	4
2	Estado del arte	5
2.1	Antecedentes generales	5
2.1.1	Características de una Micro-Red	5
2.1.2	Modelos de las centrales de generación distribuida a considerar	6
2.1.2.1	Modelo de inversor	6
2.1.2.2	Modelo de Turbina Asíncrona	7
2.1.2.3	Modelo de Panel Fotovoltaico	9
2.1.2.4	Modelo de batería	10
2.1.2.5	Modelo de generador sincrónico	12
2.1.3	Esquemas de control en los inversores	13
2.1.3.1	Esquema de control P/Q	13
2.1.3.2	Esquema de control V/F	14
2.1.3.3	Control Droop	15
2.1.4	Estrategias de control en una Micro-Red	15

2.1.4.1	Estrategia de control Maestro-esclavo	15
2.1.4.2	Estrategia de control Peer to Peer	16
2.1.5	Dispositivos de Protecciones	16
2.1.5.1	Protecciones de sobre-corriente	17
2.1.5.2	Protecciones de sobre-corriente direccional	17
2.1.5.3	Protecciones de distancia	17
2.1.5.4	Protecciones diferenciales	18
2.1.6	Curvas de sobre corriente y coordinación en redes radiales	18
2.1.7	Pruebas para obtener los parámetros de un transformador	21
2.1.8	Características de la Red del Laboratorio de Energía y Accionamiento	24
2.2	Revisión bibliográfica	36
2.2.1	Comportamiento de los inversores sobre la corriente de cortocircuito	36
2.2.1.1	Bajo control P/Q	36
2.2.1.2	Bajo control V/f	37
2.2.2	Curva Low voltage ride through(LVRT)	37
2.2.3	Curva de carga CBEMA	38
2.2.4	Estadística de fallas en redes eléctricas	39
2.2.4.1	Impedancia de falla	42
3	Metodología	45
4	Resultados	51
4.1	Coordinaciones obtenidas	51
4.1.1	Caso base, protecciones de ajuste fijo	51
4.1.2	Caso conectado a la red con presencia de generación distribuida, protecciones adaptativas	56
4.1.3	Caso en modo isla con presencia de generación distribuida, protecciones adaptativas	65
4.2	Resultados obtenidos	74

5	Análisis	75
5.1	Fallas de baja impedancia	75
5.1.1	Caso 9	75
5.1.2	Caso 12	86
5.1.3	Caso 13	95
5.1.4	Caso 28	103
5.2	Fallas de alta impedancia	114
6	Conclusiones	115
	Bibliografía	118

Índice de figuras

2.1	Modelo de un inversor [10]	7
2.2	Circuito Turbina Asíncrona de imanes permanentes [10]	7
2.3	Modelo turbina asíncrona [10]	9
2.4	Modelo del Panel Fotovoltaico [10]	9
2.5	Control Panel Fotovoltaico [10]	10
2.6	Modelo de Bateria [10]	11
2.7	Estructura de la Bateria [10]	12
2.8	Modelo del Generador Síncrono [12]	12
2.9	Diagrama de bloque P/Q [13]	14
2.10	Diagrama de bloque V/F [16]	14
2.11	Comportamiento inversor bajo Control Droop [6]	15
2.12	Comportamiento bajo Control Maestro esclavo [16]	16
2.13	Curva de operación protección de sobre-corriente [9]	19
2.14	Coordinación de protección de sobre-corriente en una red radial [9]	19
2.15	Tiempo de operación térmica en dispositivos de sobre corriente [23].	21
2.16	Prueba de circuito abierto [24]	22
2.17	Prueba de circuito cerrado [24]	23
2.18	Prueba para obtener la impedancia de secuencia cero [24]	24
2.19	Red del Laboratorio de Energía y Accionamiento	25
2.20	Posición interruptores ajustables (marcados en color rojo)	27

2.21	Interruptor original instalado en la red de laboratorio	28
2.22	Curva de sobre-corriente IEC-947-2	29
2.23	Modelo de Micro-Red a simular	30
2.24	Controlador P/Q simple implementado en la unidad Fotovoltaica y la Eólica	31
2.25	Controlador V/F simple implementado en la batería	32
2.26	Control droop implementado en los inversores	33
2.27	Controlador de corriente esquema P/Q	33
2.28	Controlador de voltaje esquema V/F	34
2.29	Frame a utilizar para modelar la máquina síncrona	35
2.30	Diagrama de control de la corriente de campo	35
2.31	Diagrama de control de la velocidad de la máquina	36
2.32	Curva “Low voltage ride through”, para distintos estándares [31]	37
2.33	Curva de carga ITI [32]	38
2.34	Origen de las interrupciones del suministro en la red eléctrica Chilena según el CDEC-SIC	40
2.35	Fallas en la red eléctrica Chilena según el CDEC-SIC	40
2.36	Fallas eléctricas por fase	41
3.1	Metodología Propuesta	46
4.1	Situación caso base, red de distribución sin presencia de generación distribuida	52
4.2	Coordinación de protecciones de ajuste fijo, dirección desde la red de transmisión hacia las barras 2, 5 y 6	56
4.3	Situación Micro-Red con presencia de generación distribuida, modo conectado a la red de transmisión	57
4.4	Corriente de falla RMS generador diésel frente a una falla trifásica en la barra 1	60
4.5	Coordinación de protección no adaptativa barra 1 y gabinete	62
4.6	Coordinación de protecciones adaptativas, dirección desde la red de transmisión hacia las barras 2, 5 y 6	63
4.7	Coordinación de protecciones adaptativas, dirección desde la batería hacia la barra 3	64

4.8	Coordinación de protecciones adaptativa, dirección desde el generador Diésel hacia la barra 2	65
4.9	Situación Micro-Red con presencia de generación distribuida, modo isla	71
4.10	Coordinación de protecciones adaptativa en modo isla, dirección desde el generador Diésel hacia las barras 5 y 6	72
4.11	Coordinación de protecciones adaptativa en modo isla, dirección desde la batería hacia las barras 2 y 5	73
5.1	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 1, caso 9,	77
5.2	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 2, caso 9,	79
5.3	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 3, caso 9,	80
5.4	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 4, caso 9,	81
5.5	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 5, caso 9,	83
5.6	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 6, caso 9,	85
5.7	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 1, caso 12,	87
5.8	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 2, caso 12,	89
5.9	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 3, caso 12,	90
5.10	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 4, caso 12,	91
5.11	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 5, caso 12,	93
5.12	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 6, caso 12,	94
5.13	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 1, caso 13,	97
5.14	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 2, caso 13,	98
5.15	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 3, caso 13,	99
5.16	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 4, caso 13,	100
5.17	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 5, caso 13,	101
5.18	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 6, caso 13,	102
5.19	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 1, caso 28.	104
5.20	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 2, caso 28.	106
5.21	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 3, caso 28.	108

5.22	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 4, caso 28.	110
5.23	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 5, caso 28.	112
5.24	Interruptores que deben abrirse en caso de una falla en la barra 6, caso 28.	113
6.1	Corrientes de falla del generador Diésel ante fallas en la barra 1, caso 9, protecciones de ajuste fijo.	129
6.2	Corrientes de falla de la batería ante fallas en la barra 1, caso 9, protecciones de ajuste fijo.	130
6.3	Corrientes de falla de la batería ante fallas en las barras 2, 3 y 4, caso 9, protecciones de ajuste fijo.	131
6.4	Corrientes de falla del generador Diésel ante fallas en las barras 2, 3 y 4, caso 9, protecciones de ajuste fijo.	132
6.5	Corriente en las líneas 3-4, 4-6 y 4-5 frente a fallas en la barra 5, caso 9, protecciones de ajuste fijo.	133
6.6	Corrientes de falla del generador Diésel y la batería ante fallas en la barra 6, caso 9, protecciones de ajuste fijo.	134
6.7	Corrientes de falla de la generación distribuida ante fallas en la barra 1, caso 12, protecciones de ajuste fijo.	142
6.8	Corriente en las líneas 1-2 y 1-3 frente a fallas en la barra 1, caso 12, protecciones de ajuste fijo.	143
6.9	Corriente en las línea 1-2 frente a fallas en la barra 2, caso 12, protecciones de ajuste fijo.	144
6.10	Corriente en las líneas 1-3 y 3-4 frente a fallas en la barra 3, caso 12, protecciones de ajuste fijo.	145
6.11	Corriente en las líneas 3-4 y 4-6 frente a fallas en la barra 4, caso 12, protecciones de ajuste fijo.	146
6.12	Corrientes de falla de la generación distribuida ante fallas en la barra 5, caso 12, protecciones de ajuste fijo.	147
6.13	Corriente en la línea 4-5 frente a fallas en la barra 5, caso 12, protecciones de ajuste fijo.	148
6.14	Corrientes de falla de la generación distribuida ante fallas en la barra 6, caso 12, protecciones de ajuste fijo.	149
6.15	Corriente en la línea 4-6 frente a fallas en la barra 6, caso 12, protecciones de ajuste fijo.	150

6.16 Corriente en las línea 1-2 y 1-3 frente a fallas en la barra 1, caso 28, protecciones de ajuste fijo.	161
6.17 Corriente en la línea 3-4 frente a fallas en la barra 3, caso 28, protecciones de ajuste fijo.	162
6.18 Corrientes de falla de la batería ante fallas en la barra 4, caso 28, protecciones de ajuste fijo.	163

Índice de tablas

2.1	Valores coeficientes según el tipo de curva [23]	20
2.2	Reactancias y Resistencias serie [26]	26
2.3	Parámetros transformador	26
2.4	Datos interruptores iniciales	28
2.5	Valores nominales a usar en la maquina Diésel [30]	34
2.6	Nomenclatura Fallas Eléctricas en la Red	39
2.7	Estadísticas de Fallas [4]	41
2.8	Corrientes de fallas típicas en distintos tipos de superficies en un sistema de distribución de 12,5 [kV] [35]	43
2.9	Potencias nominales de los transformadores de distribución del catálogo Rhona para tensiones de 12 y 13,2 [kV] [36]	43
2.10	Impedancias de falla [P.u]	44
3.1	Estados de operación	47
4.1	Nivel de la corriente de cortocircuito que circula por la Micro-Red en el caso 13	54
4.2	Leyenda correspondiente a las curvas de protecciones de ajuste fijo, dirección desde la red de transmisión hacia las barras 2, 5 y 6	56
4.3	Corrientes de falla suministradas por la batería caso 17	59
4.4	Corrientes de falla del generador Diésel frente a fallas caso 21	60
4.5	tensiones barra 2 frente a fallas caso 21	61
4.6	Leyenda correspondiente a la coordinación entre el gabinete y la barra 1	62

4.7	Leyenda correspondiente a las curvas de protecciones adaptativas, dirección desde la red de transmisión hacia las barras 2, 5 y 6	63
4.8	Leyenda correspondiente a las curvas de protecciones adaptativas, dirección desde la batería hacia la barras 3	64
4.9	Leyenda correspondiente a las curvas de protecciones adaptativas, dirección desde el generador Diésel hacia la barra 2	65
4.10	Corriente de falla suministrada por el generador Diésel en caso de fallas francas, caso 9	67
4.11	Corriente de falla suministrada por la batería en caso de fallas francas, caso 9	68
4.12	Leyenda correspondiente a las curvas de protecciones adaptativa en modo isla, dirección desde el generador Diésel hacia las barras 5 y 6	72
4.13	Leyenda correspondiente a las curvas de protecciones adaptativa en modo isla, dirección desde la batería hacia las barras 2 y 5	73
6.1	Tiempo de operación protecciones bajo esquema adaptativo, caso 9, fallas francas . . .	123
6.2	Tiempo de operación protecciones en generadores, caso 9, fallas francas, esquema adaptativo en la Micro-Red	124
6.3	Tiempo de operación protecciones bajo esquema tradicional, caso 9, fallas francas . . .	126
6.4	Tiempo de operación protecciones en generadores, caso 9, fallas francas, esquema tradicional en la Micro-Red	127
6.5	Tiempo de operación protecciones bajo esquema adaptativo, caso 12, fallas francas . .	136
6.6	Tiempo de operación protecciones en generadores, caso 12, fallas francas, esquema adaptativo en la Micro-Red	137
6.7	Tiempo de operación protecciones bajo esquema tradicional, caso 12, fallas francas . . .	139
6.8	Tiempo de operación protecciones en generadores, caso 12, fallas francas, esquema tradicional en la Micro-Red	140
6.9	Tiempo de operación protecciones bajo esquema adaptativo, caso 13, fallas francas . .	151
6.10	Tiempo de operación protecciones bajo esquema tradicional, caso 13, fallas francas . . .	153
6.11	Tiempo de operación protecciones bajo esquema adaptativo, caso 28, fallas francas . .	155
6.12	Tiempo de operación protecciones en generadores, caso 28, fallas francas, esquema adaptativo en la Micro-Red	156
6.13	Tiempo de operación protecciones bajo esquema tradicional, caso 28, fallas francas . . .	158

6.14 Tiempo de operación protecciones en generadores, caso 28, fallas francas, esquema tradicional en la Micro-Red	159
6.15 Tensiones en las barras del Sistema frente a fallas de alta impedancia, caso 9, ambos esquemas de protección	164
6.16 Corrientes en las líneas del Sistema frente a fallas de alta impedancia, caso 9, ambos esquemas de protección	165
6.17 Violación de la curva CBEMA en las cargas frente a fallas de alta impedancia, caso 9, ambos esquemas de protección	166
6.18 Tensiones en las barras del Sistema frente a fallas de alta impedancia, caso 12, ambos esquemas de protección	168
6.19 Corrientes en las líneas del Sistema frente a fallas de alta impedancia, caso 12, ambos esquemas de protección	169
6.20 Violación de la curva CBEMA en las cargas frente a fallas de alta impedancia, caso 12, ambos esquemas de protección	170
6.21 Tensiones en las barras del Sistema frente a fallas de alta impedancia, caso 13, ambos esquemas de protección	172
6.22 Corrientes en las líneas del Sistema frente a fallas de alta impedancia, caso 13, ambos esquemas de protección	173
6.23 Violación de la curva CBEMA en las cargas frente a fallas de alta impedancia, caso 13, ambos esquemas de protección	174
6.24 Tensiones en las barras del Sistema frente a fallas de alta impedancia, caso 28, ambos esquemas de protección	176
6.25 Corrientes en las líneas del Sistema frente a fallas de alta impedancia, caso 28, ambos esquemas de protección	177
6.26 Violación de la curva CBEMA en las cargas frente a fallas de alta impedancia, caso 28, ambos esquemas de protección	178