

# Tabla de contenido

Agradecimientos.....	iii
Tabla de contenido .....	iv
Índice de figuras .....	vi
Índice de tablas .....	viii
1. Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	1
1.2.1. Objetivo general .....	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.2.3. Alcances .....	2
1.2.4. Estructura del trabajo .....	3
2. Marco Teórico.....	4
2.1. Microrredes.....	4
2.1.1. Conceptos básicos .....	4
2.1.2. Estructura de una Microrred.....	5
2.2. Inversores.....	6
2.2.1. Modo formador de la red.....	7
2.2.2. Modo alimentador de la red .....	9
2.2.3. Modo soporte de la red.....	10
2.3. Control Primario.....	11
2.3.1. Conceptos básicos del control droop.....	12
2.3.2. Control droop en Microrredes .....	14
2.3.3. Control Droop con pendiente variable en Microrredes.....	18
2.4. Análisis de Estabilidad .....	25
2.4.1. Estabilidad de pequeña señal en SEP tradicionales .....	26
2.4.2. Estabilidad en Microrredes.....	29
3. Metodología.....	32
3.1. Metodología de estudio .....	32
3.2. Metodología de operación .....	33
3.3. Sistema Eléctrico a Estudiar .....	36
4. Modelación del sistema en estudio .....	39

4.1.	Modelo no lineal de la Microrred.....	39
4.1.1.	Inversor.....	39
4.1.2.	Red Eléctrica.....	42
4.1.3.	Cargas.....	42
4.2.	Modelo linealizado de la Microrred.....	43
4.2.1.	Inversor.....	44
4.2.2.	Red Eléctrica.....	50
4.2.3.	Cargas.....	51
4.2.4.	Modelo Completo de la Microrred.....	52
4.3.	Condiciones iniciales ejes DQ.....	53
5.	Resultados y análisis.....	54
5.1.	Ubicación y movimiento de polos.....	54
5.2.	Zonas de estabilidad e inestabilidad de la microrred.....	57
5.3.	Simulaciones dinámicas en Simulink.....	59
5.3.1.	Caso 1.....	60
5.3.2.	Caso 2.....	62
5.3.3.	Caso 3.....	65
5.3.4.	Caso 5.....	68
5.3.5.	Caso 6.....	71
5.3.6.	Variación porcentual de variables.....	74
5.3.7.	Discusión escalón de frecuencia en droop variable.....	76
6.	Conclusiones y trabajos futuros.....	80
6.1.	Conclusiones.....	80
6.2.	Trabajos futuros.....	82
7.	Bibliografía.....	83
	Anexo A. Código MATLAB® ubicación y movimiento de los polos de la microrred	85
	Anexo B Código MATLAB® obtención polos estables e inestables.....	86
	Anexo C Código MATLAB® cálculo de condiciones iniciales.....	88
	Anexo D Código MATLAB® de Newton-Rapshon.....	92
	Anexo E Código MATLAB® cálculo de polos en pequeña señal.....	96
	Anexo F Modelo microrred en Simulink.....	101
	Anexo G Caso 4 de simulación dinámica.....	111

# Índice de figuras

Figura 2-1 Arquitectura de una microrred [1] .....	6
Figura 2-2 Representación esquemática de un inversor DC-AC [5] .....	7
Figura 2-3 Circuito típico de un inversor trifásico de doble nivel [5] .....	7
Figura 2-4 Esquema de control modo grid-forming [5]. .....	8
Figura 2-5 Esquema de control modo grid-feeding [5]. .....	9
Figura 2-6 Esquema de control modo grid-supporting [6]. .....	11
Figura 2-7 Diagrama de bloques de un gobernador con control droop [7]. .....	12
Figura 2-8 Curva característica ideal de un gobernador con control droop [7]. .....	13
Figura 2-9 Repartición de carga mediante unidades paralelas con control droop en ambas [7]. .....	14
Figura 2-10 Diagrama de una fuente de generación con conexión mediante inversor [2]. .....	14
Figura 2-11 Característica P-f control droop [2]. .....	16
Figura 2-12 Característica Q-V control droop [2]. .....	17
Figura 2-13 Análisis de la variación de las pendientes del control droop P-f .....	20
Figura 2-14 Cambio de <b>P<sub>max</sub></b> ante fluctuación de la potencia activa .....	20
Figura 2-15 Análisis de la variación de las pendientes del control droop Q-V .....	21
Figura 2-16 Cambio de <b>Q<sub>max</sub></b> ante fluctuación de la potencia reactiva .....	21
Figura 2-17 Diagrama de un SOGI-FLL [10]. .....	23
Figura 2-18 Característica V-I de la red para una frecuencia particular [10]. .....	23
Figura 2-19 Diagrama de bloques de control droop adaptativo [10]. .....	25
Figura 2-20 Clasificación de la estabilidad en sistemas de potencia [7]. .....	26
Figura 3-1 Metodología de Estudio .....	32
Figura 3-2 Operación del modelo de pequeña señal .....	34
Figura 3-3 Obtención de región de estabilidad mediante modelo de pequeña señal .....	35
Figura 3-4 Simulación dinámica de la estrategia de control droop variable .....	36
Figura 3-5 Microrred en estudio .....	37
Figura 4-1 Diagrama de bloque del modelo completo de pequeña señal de la microrred .....	43
Figura 5-1 Ubicación de los polos de la microrred .....	55
Figura 5-2 Movimiento de polos al aumentar <b>mp</b> .....	56
Figura 5-3 Movimiento de polos al aumentar <b>nq</b> .....	56
Figura 5-4 Zona de operación estable para distintos puntos de operación .....	57
Figura 5-5 Coeficientes de pendiente del droop de frecuencia en función de la carga para <b>nq = 3, 1 · 10<sup>-4</sup></b> .....	58
Figura 5-6 Coeficientes de pendiente del droop de tensión en función de la carga para <b>mp = 2, 05 · 10<sup>-5</sup></b> .....	59
Figura 5-7 Evolución potencia activa caso 1 .....	60
Figura 5-8 Evolución de la tensión caso 1 .....	61
Figura 5-9 Evolución de la frecuencia caso 1 .....	62

Figura 5-10 Evolución de la potencia activa caso 2 .....	63
Figura 5-11 Evolución de la tensión caso 2.....	64
Figura 5-12 Evolución de la frecuencia caso 2.....	65
Figura 5-13 Evolución de la potencia activa caso 3 .....	66
Figura 5-14 Evolución de la tensión caso 3.....	67
Figura 5-15 Evolución de la frecuencia caso 3.....	68
Figura 5-16 Evolución de la potencia activa caso 5 .....	69
Figura 5-17 Evolución de la tensión caso 5.....	70
Figura 5-18 Evolución de la frecuencia caso 5.....	71
Figura 5-19 Evolución de la potencia caso 6.....	72
Figura 5-20 Evolución de la tensión caso 6.....	73
Figura 5-21 Evolución de la frecuencia caso 6.....	74
Figura 5-22 Comportamiento de las pendientes en metodología utilizada .....	77
Figura 5-23 Propuesta de metodología de droop variable.....	78
Figura 5-24 Zoom a propuesta de metodología de droop variable.....	79
Figura 0-1 Modelo completo microrred control droop convencional Simulink.....	101
Figura 0-2 Bloque de inversores control droop convencional Simulink.....	102
Figura 0-3 Modelo interno inversores control droop convencional Simulink .....	103
Figura 0-4 Modelo interno control droop convencional Simulink .....	103
Figura 0-5 Modelo interno controlador de corriente Simulink.....	104
Figura 0-6 Modelo interno controlador de tensión Simulink .....	104
Figura 0-7 Modelo interno bloque cargas Simulink.....	105
Figura 0-8 Modelo dinámico interno carga Simulink .....	105
Figura 0-9 Modelo bloque líneas Simulink.....	106
Figura 0-10 Modelo dinámico interno línea Simulink .....	106
Figura 0-11 Modelo interno bloque cálculo de tensiones Simulink.....	107
Figura 0-12 Modelo completo microrred control droop variable Simulink .....	108
Figura 0-13 Modelo interno bloque inversores control droop variable Simulink .....	109
Figura 0-14 Modelo interno inversor control droop variable Simulink .....	109
Figura 0-15 Modelo interno controlador de potencia con control droop variable Simulink .....	110
.....	
Figura 0-16 Modelo para cálculo de pendientes para control droop variable Simulink .....	110
.....	
Figura 0-1 Evolución de la potencia activa caso 4 .....	111
Figura 0-2 Evolución de la tensión caso 4.....	112
Figura 0-3 Evolución de la frecuencia caso 4 .....	112

# Índice de tablas

Tabla 2-1 Valores típicos de impedancias de línea [6].....	15
Tabla 3-1 Parámetros de la microrred en estudio .....	37
Tabla 3-2 Parámetros Inversor 10 kVA.....	38
Tabla 5-1 Parámetros ubicación de polos del sistema para un punto de operación .....	54
Tabla 5-2 Rango de <b><i>mp</i></b> y <b><i>nq</i></b> para observar movimiento de polos.....	55
Tabla 5-3 Porcentajes de variación de variables eléctricas para ambas estrategias de control.....	75