

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción.....	1
1.1. Motivación.....	1
1.2. Objetivos.....	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Alcance	2
Capítulo 2: Marco teórico.....	3
2.1. Estabilidad en sistemas eléctricos de potencia	3
2.1.1. Introducción	3
2.1.2. Clasificación de estabilidad	4
2.1.3. Tipos de estabilidad	4
2.2. Características relevantes de las ERNC.....	9
Inercia	9
Niveles de cortocircuito	9
2.3. Efectos de las ERNC en la estabilidad.....	10
2.3.1. Estabilidad de ángulo de rotor	10
2.3.2. Estabilidad de voltaje	13
2.3.3. Estabilidad de frecuencia	19
2.4. Sistemas de potencia longitudinales	24

2.5. Estabilidad de pequeña señal	29
2.5.1. Conceptos fundamentales de estabilidad en sistemas dinámicos	29
2.5.2. Propiedades de la matriz de estados	35
2.5.3. Características de los problemas de estabilidad en pequeña señal	45
2.6. Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio	46
2.7. Importancia de las estrategias de control en las ERNC	46
Capítulo 3: Escenarios energéticos futuros para el sector eléctrico nacional	49
Capítulo 4: Metodología.....	52
4.1. Definición de escenario	52
4.2. Planificación de la transmisión	54
4.3. Selección de puntos de operación	55
4.4. Desarrollo de modelo dinámico	56
4.5. Estudio de pequeña perturbación	56
Capítulo 5: Resultados y análisis.....	57
5.1. Puntos de operación en estudio.....	57
5.2. Modos presentes en los puntos de operación en estudio	58
5.2.1. Mínima demanda neta	58
5.2.2. Máxima generación renovable	58
5.2.3. Máximo flujo por enlace SIC-SING (→)	60
5.2.4. Máximo flujo por enlace SIC-SING (←)	61

5.3. Medidas correctivas para modos mal amortiguados.....	64
5.3.1. Mínima demanda neta	65
5.3.2. Máxima generación renovable	66
5.3.3. Máximo flujo por enlace SIC-SING (→)	67
5.3.4. Máximo flujo por enlace SIC-SING (←)	68
5.4. Efectos de los modos mal amortiguados.....	69
5.4.1. Mínima demanda neta	69
5.4.2. Máxima generación renovable	71
5.4.3. Máximo flujo por enlace SIC-SING (→)	73
5.4.4. Máximo flujo por enlace SIC-SING (←)	75
Capítulo 6: Conclusiones y trabajo futuro.....	77
6.1. Trabajo futuro	79
Bibliografía.....	80
Capítulo 7: Anexos.....	84
7.1. Anexo A: Resultados modelo de planificación de transmisión	84

Índice de tablas

TABLA 1: ESCENARIOS DE PENETRACIÓN DE GENERACIÓN PV.	12
TABLA 2: CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA EN EL CASO BASE SIN GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.	13
TABLA 3: MÁRGENES DE POTENCIA REACTIVA DE ACUERDO CON CARGA DEL SISTEMA.....	17
TABLA 4: MÁRGENES DE POTENCIA REACTIVA EN LA BARRA 5 PARA NIVELES CRECIENTES DE CARGA Y PENETRACIÓN EÓLICA EN EL SISTEMA.	18
TABLA 5: VALORES UTILIZADOS PARA SIMULACIONES EN [1].	20
TABLA 6: CAPACIDAD INSTALADA A INCORPORAR POR REGIÓN PARA EL ESCENARIO C EN MW.	51
TABLA 7: CASO DE ESTUDIO, CAPACIDAD INSTALADA PARA EL AÑO 2046 OBTENIDO DE ACUERDO CON EL PLAN DE OBRAS DE LA PELP EN MW.	51
TABLA 8: CASO DE ESTUDIO DEFINITIVO, CAPACIDAD INSTALADA MODIFICADA PARA EL AÑO 2046 EN MW.	53
TABLA 9: CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS DE OPERACIÓN EN ESTUDIO.....	57
TABLA 10: RESULTADOS DEL MODELO DE PLANIFICACIÓN, LÍNEAS QUE SE DEBEN AGREGAR.	84
TABLA 11: RESULTADOS DEL MODELO DE PLANIFICACIÓN, TRANSFORMADORES QUE SE DEBEN AGREGAR.	85
TABLA 12: LÍNEAS A AGREGAR EN BASE A SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA.	86
TABLA 13: TRANSFORMADORES A AGREGAR EN BASE A SIMULACIONES DE FLUJOS DE POTENCIA.	87

Índice de figuras

FIGURA 1: CLASIFICACIÓN DE ESTABILIDAD [31].	4
FIGURA 2: MODELO DEL SISTEMA OESTE IEEJ DE 10 MÁQUINAS UTILIZADO EN [16].	10
FIGURA 3: TIEMPO CRÍTICO DE DESPEJE DE FALLA SEGÚN EL NIVEL DE PENETRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES PARA CADA ESCENARIO.....	11
FIGURA 4: DIAGRAMA UNILINEAL DEL SISTEMA DE ESTUDIO EN [17].	12
FIGURA 5: MÁXIMA DIFERENCIA DE ÁNGULO DE ROTOR PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE PENETRACIÓN DE GENERACIÓN PV.	13
FIGURA 6: DIAGRAMA UNILINEAL CERCANO A LA BARRA DONDE OCURRE LA FALLA TRIFÁSICA.	14
FIGURA 7: TENSIONES EN LAS BARRAS AFECTADAS POR LA FALLA PARA DISTINTOS NIVELES DE PENETRACIÓN DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICA.	14
FIGURA 8: COMPARACIÓN DE TENSIONES EN LA BARRA 1001 PARA EL CASO SIN GENERACIÓN PV Y EL CASO CON 20% DE GENERACIÓN PV.	15
FIGURA 9: DIAGRAMA UNILINEAL DE ESTUDIO EN EL CASO BASE.	16
FIGURA 10: CURVAS Q-V PARA LA BARRA 5 PARA NIVELES DE CARGA CRECIENTES.	16
FIGURA 11: DIAGRAMA UNILINEAL DE SISTEMA DE ESTUDIO EN [19] AGREGANDO PENETRACIÓN DE GENERACIÓN EÓLICA.	17
FIGURA 12: CURVAS Q-V PARA NIVELES CRECIENTES DE CARGA EN LA BARRA 5, CONSIDERANDO UNA PENETRACIÓN EÓLICA DE 26.56%.	18
FIGURA 13: VARIACIÓN DE TENSIÓN EN BARRA 5 FRENTE A UNA FALLA EN LA LÍNEA 4-5, PARA UN CASO SIN PE Y OTRO CON PE.	19
FIGURA 14: DIAGRAMA UNILINEAL UTILIZADO EN [21].	20
FIGURA 15: RESPUESTA EN FRECUENCIA EN CASO DE CONTINGENCIA PARA UNA CARGA DE 2,200[MW].	21
FIGURA 16: SIM MODIFICADO PARA EL ESTUDIO.	22
FIGURA 17: FRECUENCIA Y TASA DE VARIACIÓN DE FRECUENCIA EN LAS BARRAS DEL SISTEMA PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE PENETRACIÓN EÓLICA PARA LA CONTINGENCIA DEL CASO 1.	23
FIGURA 18: FRECUENCIA Y TASA DE VARIACIÓN DE FRECUENCIA EN LAS BARRAS DEL SISTEMA PARA DIFERENTES ESCENARIOS DE PENETRACIÓN EÓLICA PARA LA CONTINGENCIA DEL CASO 2.	23
FIGURA 19: DIAGRAMA UNILINEAL SIMPLIFICADO DEL SIC CONSIDERANDO LAS BARRAS IMPORTANTES PARA EL ESTUDIO.	24
FIGURA 20: EVOLUCIÓN EN VOLTAJES DE BARRAS DEL SISTEMA.	26
FIGURA 21: ACCIÓN DE CAMBIADORES DE TAP BAJO CARGA EN BARRA ALTO JAHUEL.	26
FIGURA 22: VOLTAJES DE EXCITACIÓN DE LOS PRINCIPALES GENERADORES DEL SISTEMA	27
FIGURA 23: EVOLUCIÓN DE POTENCIA ACTIVA EN PRINCIPALES PLANTAS GENERADORAS DEL SISTEMA.	28
FIGURA 24: EVOLUCIÓN DE POTENCIA REACTIVA GENERADA.	28
FIGURA 25: EVOLUCIÓN DE FRECUENCIAS EN GENERADORES PRINCIPALES DEL SISTEMA.	29
FIGURA 26: DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA REPRESENTACIÓN EN EL ESPACIO DE ESTADOS.	34
FIGURA 27: PUNTOS SINGULARES CORRESPONDIENTES A SEIS POSIBLES COMBINACIONES DE PARES DE VALORES PROPIOS.	42
FIGURA 28: CONTROL DE FRECUENCIA DE UN CONVERTIDOR EN MODO <i>GRID-FOLLOWING</i> .	47
FIGURA 29: CONTROL DE FRECUENCIA DE UN CONVERTIDOR EN MODO <i>GRID-FORMING</i> .	48
FIGURA 30: DEMANDA ELÉCTRICA PROYECTADA EN LA PELP PARA LOS DISTINTOS ESCENARIOS ENERGÉTICOS.	50

FIGURA 31: CAPACIDAD INSTALADA PROPUESTA PARA EL ESCENARIO ENERGÉTICO C.....	50
FIGURA 32: DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA A DESARROLLAR.	52
FIGURA 33: CAPACIDAD INSTALADA EN CADA REGIÓN CORRESPONDIENTE AL SEN DE ACUERDO CON LA PROYECCIÓN REALIZADA PARA EL 2046.	54
FIGURA 34: MODOS PRESENTES EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÍNIMA DEMANDA NETA.	58
FIGURA 35: MODOS PRESENTES EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMA GENERACIÓN RENOVABLE.....	59
FIGURA 36: MODOS PRESENTES EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMO FLUJO POR EL ENLACE SIC-SING (→).....	60
FIGURA 37: MODOS PRESENTES EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMO FLUJO POR EL ENLACE SIC-SING (←).....	61
FIGURA 38: DIAGRAMA UNILINEAL SIMPLIFICADO QUE INCLUYE UBICACIÓN APROXIMADA DE CENTRALES QUE PARTICIPAN DE MODOS MAL AMORTIGUADOS.	63
FIGURA 39: MODOS PRESENTES EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÍNIMA DEMANDA NETA TRAS APLICAR METODOLOGÍA DE AMORTIGUAMIENTO DE MODOS.....	65
FIGURA 40: MODOS PRESENTES EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMA GENERACIÓN RENOVABLE TRAS APLICAR METODOLOGÍA DE AMORTIGUAMIENTO DE MODOS.....	66
FIGURA 41: MODOS PRESENTES EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMO FLUJO POR ENLACE SIC-SING (→) TRAS APLICAR METODOLOGÍA DE AMORTIGUAMIENTO DE MODOS.....	67
FIGURA 42: MODOS PRESENTES EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMO FLUJO POR ENLACE SIC-SING (←) TRAS APLICAR METODOLOGÍA DE AMORTIGUAMIENTO DE MODOS.....	68
FIGURA 43: VELOCIDAD Y ÁNGULO DE ROTOR DE NUEVA ALDEA U3 PARA EL CASO CON MODOS MAL AMORTIGUADOS EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÍNIMA DEMANDA NETA.	69
FIGURA 44: VELOCIDAD Y ÁNGULO DE ROTOR DE NUEVA ALDEA U3 PARA EL CASO CON MODOS AMORTIGUADOS EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÍNIMA DEMANDA NETA.	70
FIGURA 45: VELOCIDAD Y ÁNGULO DE ROTOR DE SAN PEDRO U1 PARA EL CASO CON MODOS MAL AMORTIGUADOS EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMA GENERACIÓN RENOVABLE.	71
FIGURA 46: VELOCIDAD Y ÁNGULO DE ROTOR DE SAN PEDRO U1 PARA EL CASO CON MODOS AMORTIGUADOS EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMA GENERACIÓN RENOVABLE.	72
FIGURA 47: VELOCIDAD Y ÁNGULO DE ROTOR DE SAN PEDRO U1 PARA EL CASO CON MODOS MAL AMORTIGUADOS EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMO FLUJO POR ENLACE SIC-SING (→).....	73
FIGURA 48: VELOCIDAD Y ÁNGULO DE ROTOR DE SAN PEDRO U1 PARA EL CASO CON MODOS AMORTIGUADOS EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMO FLUJO POR ENLACE SIC-SING (→).....	74
FIGURA 49: VELOCIDAD Y ÁNGULO DE ROTOR DE ANTUCO U2 PARA EL CASO CON MODOS MAL AMORTIGUADOS EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMO FLUJO POR ENLACE SIC-SING (←).....	75
FIGURA 50: VELOCIDAD Y ÁNGULO DE ROTOR DE ANTUCO U2 PARA EL CASO CON MODOS AMORTIGUADOS EN EL PUNTO DE OPERACIÓN MÁXIMO FLUJO POR ENLACE SIC-SING (←).....	76