

Contenido

Agradecimientos	v
Resumen	vii
Resum	ix
Abstract	xi
Contenido	xiii
Índice de figuras	xvii
Índice de tablas	xxvii
Listas de símbolos y siglas	xxxi
1. Introducción	1
1.1. Problemática de una elevada penetración eólica	1
1.2. Objetivos de la tesis.....	4
1.3. Sumario de la tesis.....	5
2. Antecedentes	7
2.1. Tecnología de los aerogeneradores actuales	7
2.1.1. Turbina eólica	7
2.1.2. Generador eléctrico.....	9
2.1.3. Caja multiplicadora.....	10
2.2. Sistema eléctrico peninsular español	10
2.2.1. Potencia instalada y cobertura de la demanda	11
2.2.2. Interconexiones	22
2.3. Introducción al control de frecuencia-potencia	25
2.3.1. Regulación primaria.....	29
2.3.2. Regulación secundaria.....	33

2.3.3. Regulación terciaria	39
2.3.4. Gestión de desvíos generación-consumo	40
2.3.5. Gestión de la demanda	42
2.4. Respuesta de la energía eólica frente a variaciones de frecuencia	42
2.4.1. Estudios sobre el comportamiento de los aerogeneradores	43
2.4.2. Exigencias en la normativa de diferentes países	49
3. Modelo del aerogenerador	63
3.1. Datos de partida	65
3.2. Valores base para el cálculo de valores por unidad	67
3.3. Turbina eólica	69
3.3.1. Expresiones del coeficiente de potencia	71
3.3.2. Modelo dinámico	75
3.4. Sistema mecánico de transmisión	91
3.4.1. Constantes de inercia	93
3.4.2. Coeficiente de rigidez	94
3.4.3. Coeficiente de amortiguamiento	95
3.5. Control de velocidad	98
3.6. Control de potencia capturada	109
3.6.1. Interacción con el control de velocidad	112
3.6.2. Mantenimiento de la potencia nominal constante	116
3.6.3. Diseño del controlador. Planificación de ganancia	118
3.6.4. Comportamiento con el modelo dinámico de turbina	132
4. Modelo del sistema eléctrico	141
4.1. Turbina de vapor	143
4.2. Turbina hidráulica	147
4.3. Turbina de gas en ciclo combinado	149
4.4. Deslaste de cargas y desconexión de generación no gestionable	156
4.5. Interconexión de los diferentes elementos	160
4.5.1. Potencia aportada por cada tipo de generación	162
4.5.2. Inercia equivalente y amortiguamiento de las cargas	162
5. Control de frecuencia en aerogeneradores	165
5.1. Indicadores empleados	166

5.2. Casos estudiados	169
5.3. Desvíos de frecuencia cuando no hay contribución de los parques eólicos.....	173
5.3.1. Aumento de carga y misma inercia en valle que en punta	174
5.3.2. Disminución de carga y misma inercia en valle que en punta	177
5.3.3. Aumento de carga y menor inercia en valle.....	180
5.4. Referencia adicional de par electromagnético.....	182
5.4.1. Par adicional dependiente de la velocidad de giro	187
5.4.2. Comportamiento del control de velocidad	189
5.5. Comportamiento del control de potencia capturada	190
5.6. Desvíos de frecuencia cuando los parques eólicos emulan inercia	190
5.6.1. Aumento de carga y misma inercia en valle que en punta. Desconexión y reconexión sin saltos del control de velocidad.....	192
5.6.2. Disminución de carga y misma inercia en valle que en punta. Desactivación del sistema de comunicación entre controles	200
5.6.3. Aumento de carga y menor inercia en valle.....	203
5.7. Desvíos de frecuencia cuando los parques eólicos proveen regulación primaria	205
5.7.1. Aumento de carga y misma inercia en valle que en punta. Control de aceleración.	207
5.7.2. Disminución de carga y misma inercia en valle que en punta	223
5.7.3. Aumento de carga y menor inercia en valle.....	224
5.8. Desvíos de frecuencia cuando los parques eólicos emulan inercia y proveen regulación primaria simultáneamente.....	225
5.8.1. Aumento de carga y misma inercia en valle que en punta	226
5.8.2. Disminución de carga y misma inercia en valle que en punta	227
5.9. Desvíos de frecuencia cuando los parques eólicos emplean un control con filtro <i>washout</i>	227
5.9.1. Aumento de carga y misma inercia en valle que en punta	229
5.9.2. Aumento de carga y menor inercia en valle.....	229
5.10. Recomendaciones para la configuración del control de frecuencia	231
6. Efectos de la eólica en los mercados de servicios de ajuste del sistema	235
6.1. Mercados del sistema peninsular español	235

6.1.1. Resolución de restricciones técnicas	236
6.1.2. Gestión de desvíos	239
6.2. Mercados de otros países	245
6.3. Mejoras para facilitar la integración de la energía eólica en el mercado eléctrico español.....	247
7. Conclusiones, aportaciones y trabajos futuros	249
7.1. Conclusiones	249
7.2. Aportaciones más relevantes	255
7.3. Trabajos futuros.....	256
Anexo A. Parámetros de aerogeneradores comerciales	257
A.1. AW-1500 de Acciona	257
A.2. NM 92/2750 de NEG Micon.....	257
A.3. General Electric.....	258
Bibliografía	259