

Contenido

Prefacio	1
Introducción	3
Capítulo 1. Problemas de almacenamiento de energía eléctrica	7
1.1. Dificultades para almacenar energía eléctrica.	7
1.2. ¿Por qué almacenar energía eléctrica?	8
1.3. Valoración del almacenamiento en redes eléctricas	13
1.4. Gestión del almacenamiento.	15
1.5. Bibliografía.	18
Capítulo 2. Situación actual del almacenamiento de energía	21
2.1. Introducción	21
2.2. Tecnologías de almacenamiento	21
2.3. Características de un sistema de almacenamiento	23
2.3.1. Capacidad de almacenamiento de energía	23
2.3.2. Potencia máxima y constante de tiempo	23
2.3.3. Pérdidas de energía y eficiencia energética.	24
2.3.4. Envejecimiento	25
2.3.5. Costos.	25
2.3.6. Energía y potencia específica.	26
2.3.7. Tiempo de respuesta	27
2.3.8. Energía gris	27

2.3.9. Estado de energía	27
2.3.10. Otras características	29
2.4. Almacenamiento hidráulico	29
2.4.1. Principio de almacenamiento hidráulico	29
2.4.2. Ejercicio: central eléctrica del lago Negro	30
2.5. Almacenamiento mediante aire comprimido	34
2.5.1. Principio de almacenamiento mediante aire comprimido	34
2.5.2. Almacenamiento mediante aire comprimido de primera y segunda generación	35
2.5.3. Almacenamiento mediante aire comprimido adiabático	37
2.5.4. Almacenamiento de aire	38
2.5.5. Almacenamiento hidroneumático	39
2.6. Almacenamiento térmico	40
2.6.1. Almacenamiento térmico sensible	40
2.6.2. Almacenamiento por calor latente	42
2.7. Almacenamiento químico	42
2.7.1. Almacenamiento electroquímico	42
2.7.2. Almacenamiento de hidrógeno	47
2.8. Almacenamiento cinético	48
2.9. Almacenamiento electrostático	50
2.10. Almacenamiento electromagnético	51
2.11. Rendimiento comparativo de las tecnologías de almacenamiento	52
2.12. Bibliografía	53

Capítulo 3. Valoración del almacenamiento de energía en las redes eléctricas 55

3.1. Introducción	55
3.2. Introducción a los sistemas eléctricos de potencia y su funcionamiento	58
3.2.1. Plantas de generación	59
3.2.2. Redes eléctricas	64
3.2.3. El consumo	66
3.2.4. Algunos elementos de funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia	68
3.3. Servicios que puede proporcionar el almacenamiento	81
3.3.1. Introducción	81
3.3.2. Servicios obligatorios para la conexión a la red de transmisión pública	83

3.3.3. Posibles servicios adicionales para un administrador de redes de transporte	85
3.3.4. Servicios potenciales de almacenamiento para un administrador de redes de distribución	88
3.3.5. Servicios para un productor de generación centralizada	102
3.3.6. Servicios para un productor descentralizado renovable.	105
3.3.7. Servicios para los consumidores	113
3.3.8. Servicios remunerados dentro de las actividades del mercado	119
3.4. Ejemplo de la contribución del almacenamiento para el tratamiento de las congestiones.	121
3.4.1. Indicador del estado de carga de la red	121
3.4.2. Escenario para la evolución de la red eléctrica.	122
3.4.3. Tratamiento de las congestiones en Bretaña	123
3.5. Ejemplo de disposición del almacenamiento para el soporte dinámico de la regulación de frecuencias en una red isla.	125
3.5.1. Contexto e interés potencial del servicio	125
3.5.2. ¿Qué es la desconexión de carga de baja de frecuencia?	125
3.5.3. Especificaciones técnicas del soporte dinámico	126
3.5.4. Método utilizado para el estudio detallado de los soportes dinámicos	128
3.5.5. Paso 1: enfoque teórico	129
3.5.6. Paso 2: simulaciones dinámicas	134
3.5.7. Paso 3: implementación experimental en el laboratorio	135
3.5.8. Valoración económica	138
3.5.9. Revisión del ejemplo	138
3.6. Conclusión	138
3.7. Bibliografía.	139

Capítulo 4. Introducción a la lógica difusa y aplicación a la gestión del almacenamiento inercial en un sistema híbrido eólico-diésel 145

4.1. Introducción	145
4.2. Introducción a la lógica difusa.	145
4.2.1. Principio del razonamiento difuso	146
4.2.2. Lógica difusa y lógica booleana	147
4.2.3. Etapas de un supervisor difuso	151
4.2.4. Ejemplo de razonamiento difuso	154

4.3. Combinación de energía eólica y almacenamiento inercial en un sitio aislado con generador diésel.	159
4.3.1. Introducción	159
4.3.2. Estrategia de gestión energética	160
4.3.3. Supervisor de lógica difusa	162
4.3.4. Resultados de la simulación con el supervisor difuso	164
4.3.5. Resultados de simulación con un filtrado sencillo.	167
4.4. Conclusión	170
4.5. Bibliografía.	170

Capítulo 5. Metodología para la construcción del supervisor de una fuente eólica asociada al almacenamiento 173

5.1. Introducción	173
5.2. El sistema energético estudiado	174
5.3. Metodología de desarrollo del supervisor	175
5.4. Las especificaciones.	175
5.4.1. Los objetivos.	176
5.4.2. Las limitaciones.	176
5.4.3. Losmedios de acción	177
5.5. La estructura del supervisor	178
5.5.1. Las magnitudes de entrada	178
5.5.2. Las magnitudes de salida	178
5.5.3. Herramientas de desarrollo del supervisor	179
5.6. Identificación de los diferentes estados de funcionamiento: el grafo funcional	182
5.6.1. Grafo de nivel N1	183
5.6.2. Grafo de nivel N1.1.	184
5.6.3. Grafo de nivel N1.2.	185
5.6.4. Grafo de nivel N1.3.	186
5.7. Las funciones de membresía.	187
5.8. El grafo operacional.	190
5.8.1. Grafo de nivel N1	191
5.8.2. Grafo de nivel N1.1.	191
5.8.3. Grafo de nivel N1.2.	192
5.8.4. Grafo de nivel N1.3.	192
5.9. Las reglas difusas	193
5.10. Validación experimental	194
5.10.1. La implementación del supervisor	194

5.10.2. La configuración experimental	196
5.10.3. Resultados y análisis	198
5.11. Conclusión	202
5.12. Bibliografía	203

Capítulo 6. Construcción del supervisor de una fuente híbrida con múltiples fuentes y almacenamiento múltiple 205

6.1. Introducción	205
6.2. Metodología para la construcción del supervisor de una fuente híbrida incorporando energía eólica	207
6.2.1. Determinación de las especificaciones del sistema	208
6.2.2. Estructura del supervisor.	210
6.2.3. Determinación de grafos funcionales	212
6.2.4. Determinación de las funciones de membresía.	216
6.2.5. Determinación de los grafos operacionales.	220
6.2.6. Extracción de reglas difusas.	222
6.3. Rendimiento comparativo de diferentes variantes de fuentes híbridas	222
6.3.1. Características del sistema simulado.	223
6.3.2. Simulaciones de diferentes variantes de fuentes híbridas.	225
6.3.3. Comparación de los resultados de las diferentes fuentes híbridas utilizando indicadores	235
6.4. Conclusión	236
6.5. Apéndices.	236
6.5.1. Rango de variaciones de variable de salida.	236
6.5.2. Reglas difusas	238
6.6. Bibliografía.	240

Capítulo 7. Gestión y valorización de un sistema de almacenamiento adiabático de aire comprimido integrado en una red eléctrica. 243

7.1. Introducción	243
7.2. Servicios que ofrece el almacenamiento.	245
7.2.1. Planificación de almacenamiento.	245
7.2.2. Control de frecuencia.	245
7.2.3. Gestión de las congestiones	245
7.2.4. Garantía de producción renovable variable.	246
7.3. Estrategia de supervisión.	246
7.3.1. Metodología	246

- 7.3.2. Objetivos, limitaciones y medios de acción. 248
- 7.3.3. Estructura del supervisor. 248
- 7.3.4. Determinación de grafos funcionales 249
- 7.3.5. Determinación de las funciones de membresía. 254
- 7.3.6. Determinación de los grafos operacionales 257
- 7.3.7. Extracción de reglas difusas. 257
- 7.3.8. Indicadores. 257
- 7.4. Valor económico de los servicios. 258
 - 7.4.1. La acción de compra y venta 259
 - 7.4.2. Facturación de la referencia de frecuencia 260
 - 7.4.3. Facturación de los servicios adicionales. 260
- 7.5. Aplicación 260
 - 7.5.1. Red de pruebas 260
 - 7.5.2. Interés de la contribución del almacenamiento a los servicios del sistema 263
 - 7.5.3. Interés en el supervisor difuso en relación con un supervisor booleano 266
- 7.6. Conclusión 269
- 7.7. Agradecimientos 269
- 7.8. Bibliografía 269

Índice alfabético 271