

Contenido

RESUMEN Y OBJETIVOS	1
1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 Situación actual de la energía eólica.....	5
1.2 Conexiones submarinas	10
2 PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Estudios de mercados	19
2.3 Generación de alternativas de diseño.....	21
2.4 Generación de escenarios	25
2.5 Descripción del problema	26
3 METODOLOGÍA.....	29
3.1 Evaluación económica del proyecto	29
3.2 Determinación del sentido de los flujos de potencia	31
3.2.1 Toma de decisiones 1. Fuente de energía: países	32
3.2.2 Toma de decisiones 2. Fuente de energía: parque eólico marino.....	36
3.3 Fuentes de energía y distribución de cargas	40
3.3.1 Energía producida por el parque eólico y los países	40
3.3.2 Distribución de cargas en el sistema	41
3.4 Cálculo de las pérdidas eléctricas en el sistema de transmisión.....	45
3.4.1 Pérdidas eléctricas en el sistema de transmisión.....	45
3.4.2 Pérdidas en sistemas de transmisión de corriente alterna (HVAC).....	45
3.4.3 Pérdidas en sistemas de transmisión de corriente continua (HVDC-VSC).....	47

3.5	Modelo de costes de los equipos de sistemas de transmisión de parques eólicos marinos.....	48
3.5.1	Cables de transmisión submarinos en corriente alterna.....	49
3.5.2	Transformadores y plataformas en corriente alterna	50
3.5.3	Unidades de compensación.....	51
3.5.4	Cables de transmisión submarinos en corriente continua.....	51
3.5.5	Estaciones convertidoras.....	52
3.6	Optimización.....	53
4	ENSAYOS Y RESULTADOS.....	57
4.1	Parámetros del sistema.....	57
4.2	Casos	60
4.2.1	Caso 4.1. Disposición clásica del sistema eléctrico	60
4.2.2	Caso 4.2. Conexión a dos países	63
4.2.3	Caso 4.3. Dos países y generación de energía por países.....	67
4.2.4	Análisis de sensibilidad	76
4.2.5	Caso 4.4. Optimización parcial de la tarifa de acceso	81
4.2.6	Caso 4.5. Optimización de todas las variables.....	87
5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	95
5.1	Conclusiones	95
5.2	Líneas futuras	96
	REFERENCIAS	99

Índice de Figuras

Figura 1. Evolución del consumo mundial de energía primaria.	5
Figura 2. Evolución esperada en los próximos años del consumo mundial de energía primaria.	8
Figura 3. Evolución anual de la potencia eólica instalada a nivel mundial.	9
Figura 4. Evolución de la potencia eólica marina instalada en la UE	10
Figura 5. Conexión típica entre dos sistemas eléctricos a través de un enlace eléctrico submarino.	11
Figura 6. Localización principales parques offshore en Europa.	13
Figura 7. Dcha: parque eólico offshore aislado, conexión tradicional. Izda: Conexión de varios parques eólicos marinos en una red global	18
Figura 8. Datos económicos del mercado de la electricidad en Reino Unido	20
Figura 9. Datos económicos del mercado de la electricidad en Noruega	20
Figura 10. Esquema de conexión de un parque eólico mediante un sistema de transmisión en corriente alterna.	21
Figura 11. Esquema simplificado de una estación convertidora.	23
Figura 12. Esquema de conexión de un parque eólico mediante un sistema de transmisión en corriente continua.	23
Figura 13. Árbol de decisión empleado para la generación de alternativas de diseño. ..	24
Figura 14. Ejemplo de curva de duración de un parque eólico de 500 MW.	25
Figura 15. Esquema simplificado del flujo de potencias en el problema	26
Figura 16. Esquema de la toma de decisiones para la energía entre países	33
Figura 17. Esquema básico de la distribución del sistema eléctrico.	34
Figura 18. Esquema básico de la distribución del sistema eléctrico con conexión de parque eólico.	36
Figura 19. Esquema de la toma de decisiones para la energía generada por el parque ..	37
Figura 20. Curva de duración de un parque eólico en función de la velocidad del viento.	40
Figura 21. Aportaciones de carga al tramo A en el punto IIA para un caso particular. ...	43
Figura 22. Aportaciones de carga al tramo B en el punto IB para un caso particular	44

Figura 23. Corriente a lo largo del cable en función del tipo de compensación de reactiva ($P = 500$ MW, $V = 400$ kV, $S = 2000$ mm ² y Distancia = 60km).....	45
Figura 24. Esquema de la metodología seguida para la optimización del sistema eléctrico de transmisión.....	54
Figura 25. Distribución de las longitudes parciales y total del sistema de interconexión	58
Figura 26. Curva de duración del parque	59
Figura 27. Croquis del sistema eléctrico para el <i>Caso 4.1</i>	60
Figura 28. Evolución de carga en el sistema para el <i>Caso 4.1</i>	62
Figura 29. Croquis del sistema para el <i>Caso 4.2</i>	64
Figura 30. Distribución de carga en ambos sentido de flujo para el <i>Caso 4.2</i>	67
Figura 31. Croquis del sistema de transmisión sin la presencia de un parque eólico marino.....	68
Figura 32. Croquis del sistema de transmisión con la presencia de un parque eólico marino.....	71
Figura 33. Aportaciones de potencia al tramo A en el sentido de flujo del país B al A, para el <i>Caso 4.3.b</i>	74
Figura 34. Aportaciones de potencia al tramo B en el sentido de flujo del país A al B, para el <i>Caso 4.3.b</i>	75
Figura 35. Evolución de la rentabilidad del proyecto con la tarifa de acceso sin la presencia de parque eólico y bajo la configuración técnica del sistema del <i>Caso 4.3.a</i>	78
Figura 36. Evolución de la rentabilidad del proyecto con la tarifa de acceso incorporando un parque eólico de 250 MW y bajo la configuración técnica del sistema del <i>Caso 4.3.b</i>	80
Figura 37. Aportaciones de potencia al tramo A en el sentido de flujo del país B al A, para el <i>Caso 4.4.b</i>	86
Figura 38. Aportaciones de potencia al tramo B en el sentido de flujo del país A al B, para el <i>Caso 4.4.b</i>	86
Figura 39. Aportaciones de potencia al tramo A en el sentido de flujo del país B al A, para el <i>Caso 4.5.b</i>	92
Figura 40. Aportaciones de potencia al tramo B en el sentido de flujo del país A al B, para el <i>Caso 4.5.b</i>	93

Índice de Tablas

Tabla 1. Distribución de la potencia eólica instalada por áreas geográficas.	6
Tabla 2. Matriz de energías producidas por el parque eólico	41
Tabla 3. Costes de los cables submarinos de corriente alterna.	49
Tabla 4. Parámetros eléctricos de los cables submarinos de corriente alterna.	50
Tabla 5. Costes de los cables submarinos de corriente continua.	52
Tabla 6. Parámetros eléctricos de los cables submarinos de corriente continua.	52
Tabla 7. Convertidores empleados en el estudio.	53
Tabla 8. Principales características técnicas de la configuración óptima obtenida en el <i>Caso 4.1</i>	61
Tabla 9. Principales resultados económicos correspondientes a la configuración óptima para el <i>Caso 4.1</i>	63
Tabla 10. Principales características técnicas de la configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.2</i>	65
Tabla 11. Principales resultados económicos correspondientes a la configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.2</i>	66
Tabla 12. Principales características técnicas de la configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.3.a</i>	69
Tabla 13. Principales resultados económicos correspondientes a las configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.3.a</i>	70
Tabla 14. Principales características técnicas de la configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.3.b</i>	72
Tabla 15. Principales resultados económicos correspondientes a las configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.3.b</i>	73
Tabla 16. . Principales características técnicas del sistema eléctrico bajo el que se realiza el <i>Análisis de Sensibilidad 1</i>	77
Tabla 17. Principales características técnicas del sistema eléctrico bajo el que se realiza el <i>Análisis de Sensibilidad 2</i>	79
Tabla 18. Principales características técnicas de la configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.4.a</i>	82
Tabla 19. Principales resultados económicos correspondientes a las configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.4.a</i>	83

Tabla 20. Principales características técnicas de la configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.4.b</i>	84
Tabla 21. Principales resultados económicos correspondientes a las configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.4.b</i>	85
Tabla 22. Principales características técnicas de la configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.5.a</i>	88
Tabla 23. Principales resultados económicos correspondientes a las configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.5.a</i>	89
Tabla 24. Principales características técnicas de la configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.5.b</i>	90
Tabla 25.Principales resultados económicos correspondientes a las configuración óptima obtenida para el <i>Caso 4.5.b</i>	92