

TENDENCIAS DE TRANSFORMACIÓN

La tecnología HVDC para el sector de energía eólica marina está madurando

La energía eólica marina constituye el segmento de energía renovable con un crecimiento más rápido. La conexión de los parques eólicos marinos alejados de las redes nacionales terrestres requiere tecnología de corriente continua de alta tensión (HVDC), en la que ABB tiene una vasta experiencia. ¿Qué retos se han superado para desarrollar esta energía en la última década?



Athanasios Krontiris
HVDC Connections,
ABB Power Grids
Mannheim, Alemania

athanasios.krontiris@
de.abb.com

Con una tasa de crecimiento anual media del 13 % en los últimos cinco años y una capacidad instalada total que llegó a los 540 GW en 2017, la energía eólica ha experimentado un rápido desarrollo →1-2. Aunque de momento la energía eólica marina solo aporta el 3,5 % de la energía eólica instalada total, se está expandiendo a un ritmo cada vez mayor: 28 % →3. La energía eólica marina se concentra en el Mar del Norte, pero se está expandiendo a Norteamérica, Asia Oriental, India y otros lugares.



Peter Sandeberg
HVDC Connections,
ABB Power Grids
Ludvika, Suecia

peter.sandeberg@
se.abb.com

Además de crecer en términos de potencia nominal, las centrales eólicas marinas también se encuentran más lejos de las costas y los puntos de entrada a la red.

Además de crecer en términos de potencia nominal, las centrales eólicas marinas también se encuentran más lejos de las costas y los puntos de entrada a la red. Estos factores plantean desafíos técnicos significativos.



—
01 En 2017, la generación de energía eólica marina creció casi un 30 %.

CA frente a CC para conexiones en alta mar

Al elegir entre CA o CC para conectar parques eólicos marinos a la red, los principales parámetros que deben considerarse son la potencia nominal, la distancia a la costa y la distancia de la costa al punto de conexión de red fuerte más cercano, que puede estar a 100 km de distancia, ya que la entrada a la costa se encuentra a menudo en zonas poco pobladas donde la red de transporte de electricidad es débil.

Una ventaja importante de la CA es el bajo coste de la estación. Sin embargo, en la transmisión de CA las pérdidas aumentan con la tensión, la capacitancia y la longitud del cable. Más allá de la denominada longitud crítica (de 100 a 150 km, dependiendo del tipo de cable) no quedará capacidad para la transmisión eléctrica activa. La forma clásica de elevar la capacidad de transporte es aumentar el nivel de tensión, pero como la potencia reactiva aumenta con el cuadrado de la tensión, el aumento de tensión conlleva una reducción de la longitud crítica.

Una conexión de CC tiene la ventaja de tener menores costes de cableado. Y dado que los cables solo se cargan cuando están activos, y la capacidad completa de transporte de corriente puede utilizarse para la transmisión de electricidad, las pérdidas del cable por encima de una determinada distancia son inferiores a las de su equivalente de CA. Estos factores compensan los mayores costes de conversión de CC.

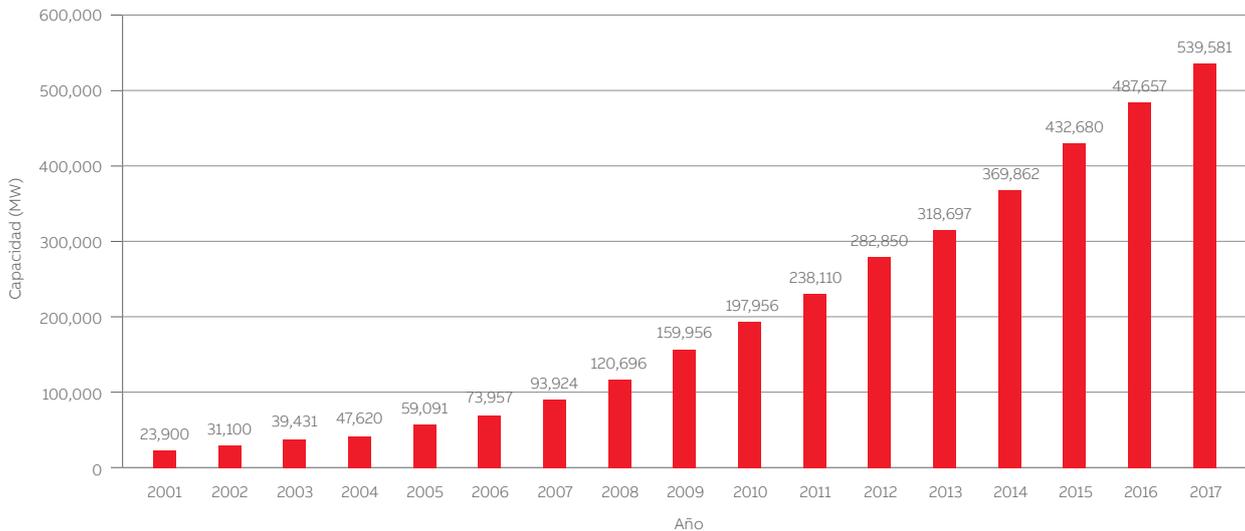
Además, los cables HVDC con aislamiento XLPE son más ligeros que otros cables, lo que hace que su instalación en alta mar sea más sencilla y más barata. Su menor peso por unidad de longitud permite el transporte de secciones más largas, lo que se traduce en menos empalmes de cable, menor tiempo de instalación y menor riesgo de fallo.

La alternativa de la CC, por lo tanto, resulta competitiva, tanto desde la perspectiva de los costes de inversión como de los costes operativos, con una distancia de transporte y un índice de potencia cada vez mayores.

La actual HVDC en alta mar

Actualmente, 40 de los más de 90 parques eólicos marinos de Europa tienen una capacidad nominal (producción sostenida a plena carga prevista) superior a 200 MW y cerca de un tercio de ellos están conectados a la red mediante transmisión HVDC, individualmente o en grupo. Hasta ahora, hay siete sistemas de conexión eólica de alta mar HVDC en funcionamiento y otros tres en construcción. Todos ellos están situados en la zona del Mar del Norte conocida como Bahía Alemana y su gestión depende de la operadora de sistemas de transmisión TenneT Offshore. Con nuevos proyectos en desarrollo en todo el mundo, las perspectivas a corto y medio plazo para la conexión HVDC eólica marina son brillantes.





02

Posibles configuraciones para la conexión HVDC

La configuración más sencilla del parque eólico marino HVDC es una conexión punto a punto de un convertidor marino, instalado sobre una plataforma, y un convertidor terrestre →4a. Hasta el momento, todas las conexiones HVDC eólicas marinas en funcionamiento son de este tipo.

—
Un nudo de enlace en alta mar situado en una plataforma se conecta a través de “radios” a varias redes en la costa en las mismas zonas o en diferentes áreas síncronas.

Un diseño cada vez más utilizado es el sistema híbrido, es decir, una combinación de interconectores submarinos entre redes marinas y la conexión de estas a tierra →4b-4d. Estos diseños han sido propuestos recientemente para el Mar del Norte y se denominan «disposición radial»: un nudo de enlace en alta mar situado en una plataforma, o incluso en una isla artificial, se conecta a través de “radios” a varias redes en la costa en las mismas o en diferentes áreas síncronas. Este diseño puede utilizarse tanto para conexiones de CA como para conexiones de CC a la costa, aunque las distancias a la costa en el Mar del Norte son prohibitivas para la opción de CA. Para la opción CC, el conector puede estar interconectado con múltiples enlaces HVDC punto a punto paralelos o con un sistema HVDC multiterminal.

Ventajas de la disposición radial

La interconexión con otras redes aumenta en gran medida la utilización de los enlaces, ya que la utilización de los enlaces de una conexión eólica marina única depende exclusivamente del carácter intermitente del viento local.

Además, si se adopta un planteamiento coordinado a escala internacional respecto a la instalación de la infraestructura de transmisión, los costes se reducirán. Se crearán beneficios adicionales provenientes del intercambio de energía entre los mercados internacionales.

Por último, la disposición radial permite una expansión gradual, con capacidad de transmisión añadida en etapas, lo que permite una mayor disponibilidad de energía en menor tiempo. El planteamiento gradual también permite efectuar cambios e introducir nuevas tecnologías según evolucione la energía eólica, y la inversión puede realizarse de manera paulatina.

El primer proyecto de este tipo está actualmente en desarrollo en el Mar Báltico. En el proyecto Kriegers Flak Combined Grid Solution, se ha establecido un interconector de CA entre Dinamarca y Alemania a través de los parques eólicos marinos Kriegers Flak A y B, y Baltic 1 y 2. Para facilitar el desacoplamiento de frecuencia entre las zonas síncronas de la Europa nórdica y continental, ABB suministra un convertidor HVDC (back-to-back) en el punto de entrada en Alemania (Bentwisch) y un controlador maestro que utiliza mejor los activos híbridos de interconector. Se espera que la experiencia operativa de este proyecto desempeñe un papel importante en el ulterior despliegue de la disposición radial.

02 Capacidad eólica global acumulada instalada entre 2001 y 2017.

03 Capacidad eólica marina instalada en todo el mundo.

03a Capacidad eólica marina acumulada en 2016 frente a 2017 por países.

03b Capacidad acumulada anual de 2011 a 2017.

Conexiones eólicas marinas HVDC de ABB

ABB ha entregado con éxito tres enlaces HVDC para conexión eólica marina →5-7. Estos proyectos no habrían sido posibles sin los grandes avances realizados en el diseño de plataformas por los socios de ABB y en la tecnología HVDC por parte de ABB.

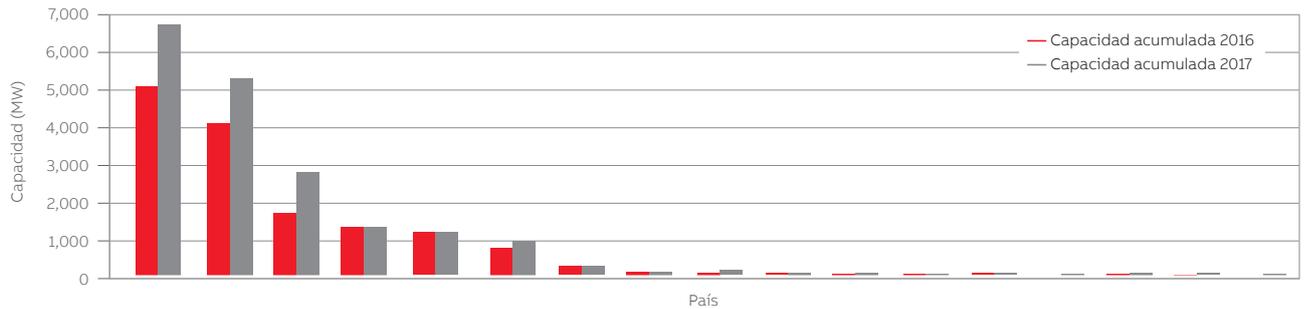
El diseño compacto del equipo HVDC Light permite una implementación rentable en una plataforma marina.

La tecnología del convertidor de fuentes de tensión, lanzada por primera vez por ABB como HVDC Light®, ha sido el factor clave para permitir los enlaces HVDC marinos. Al controlar la tensión y la frecuencia en la red de CA marina en una isla,

la estación convertidora marina automáticamente transmite toda la electricidad activa que producen los parques eólicos hacia la red de CA marina mientras mantiene una tensión y una frecuencia de CA estable en la red de CA marina. Al mismo tiempo, el diseño compacto del equipo HVDC Light permite una implementación rentable en una plataforma marina.

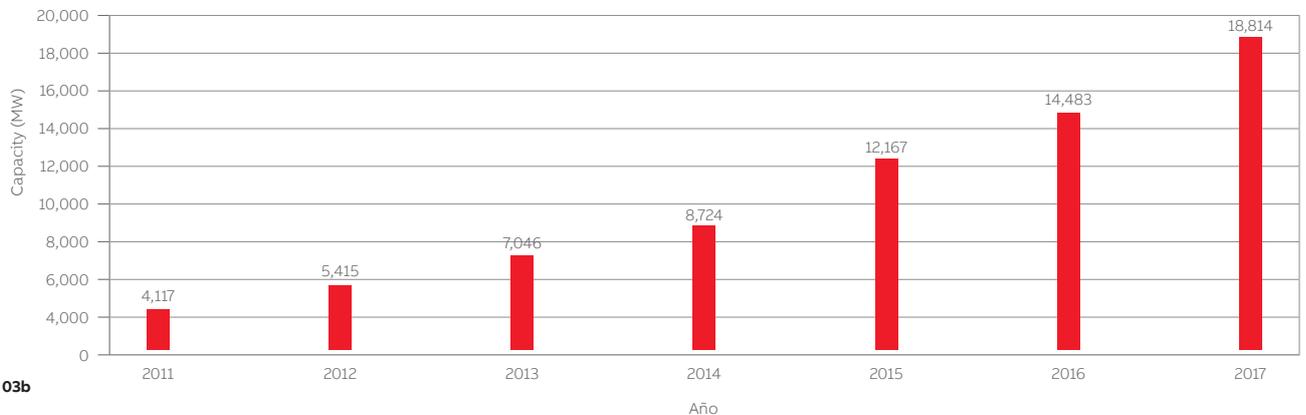
Trabajo pionero de HVDC para la conexión eólica marina

En comparación con otros escenarios HVDC, la implementación marina presenta algunos requisitos de diseño únicos. Algunos de los principales retos provienen de las condiciones medioambientales en el mar, la falta de normas estandarizadas para los sistemas y componentes HVDC en alta mar, las limitaciones de accesibilidad y operación en el mar y la difícil gestión de la interfaz. Al mismo tiempo, el comportamiento del sistema de una red de CA marina en una isla es muy diferente al de las redes de transporte típicas.



03a

	Reino Unido	Alemania	R.P. China	Dinamarca	Países Bajos	Bélgica	Suecia	Vietnam	Finlandia	Japón	Corea del Sur	Estados Unidos	Irlanda	Taiwán	España	Noruega	Francia	Total
Total 2016	5,156	4,108	1,627	1,271	1,118	712	202	99	32	60	35	30	25	0	5	2	0	14,483
Nueva 2017	1,680	1,247	1,161	0	0	165	0	0	60	5	3	0	0	8	0	0	2	4,331
Total 2017	6,836	5,355	2,788	1,271	1,118	877	202	99	92	65	38	30	25	8	5	2	2	18,814



03b

Condiciones medioambientales en alta mar

Los sistemas de transmisión HVDC marinos normalmente se enfrentan a condiciones ambientales duras, como carga mecánica por vibración, temperaturas extremas, humedad excesiva y contaminación salina. Además, las condiciones meteorológicas y marítimas y la manipulación en el mar afectan al transporte y almacenamiento de los equipos. Sin embargo, la experiencia demuestra que, con un diseño adecuado se pueden superar estos desafíos.

—

ABB ha desarrollado e implementado con éxito conceptos innovadores para el control de redes marinas en islas en condiciones normales y también en caso de perturbaciones.

Diseño de plataformas y códigos de diseño

Las dos primeras plataformas construidas para subestaciones de conversión de HVDC para parques eólicos marinos utilizaron una solución de estructura base (jacket) y estructura superior

(topside). Para el proyecto DolWin2, ABB desarrolló, en estrecha colaboración con un astillero noruego, una plataforma flexible, innovadora, robusta y ampliable para conseguir una mayor eficiencia de producción y facilitar la instalación (no se precisan gabarras de elevación de cargas pesadas ni operaciones de elevación hidráulicas) →7-8.

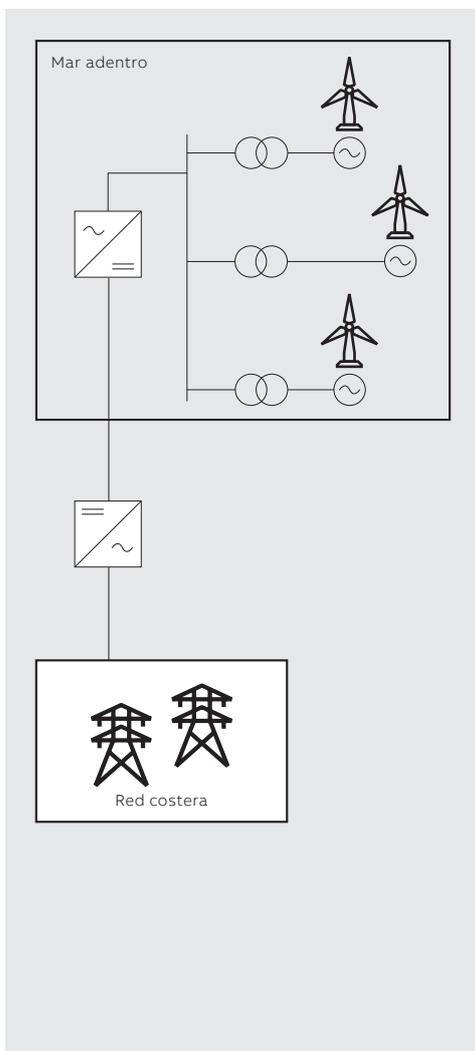
Esta plataforma se basa en una combinación de diseños semisumergibles de gravedad, es decir, actúa como una plataforma semisumergible durante el transporte y la instalación, tras lo cual se lastrada para que asiente firmemente sobre el lecho marino.

La industria eólica marina debe cumplir unos requisitos muy estrictos y los diseños deben ser homologados por un organismo de certificación. Una sólida asociación con un diseñador de plataformas experimentado es crucial para garantizar menores plazos de entrega del proyecto y reducir el riesgo.

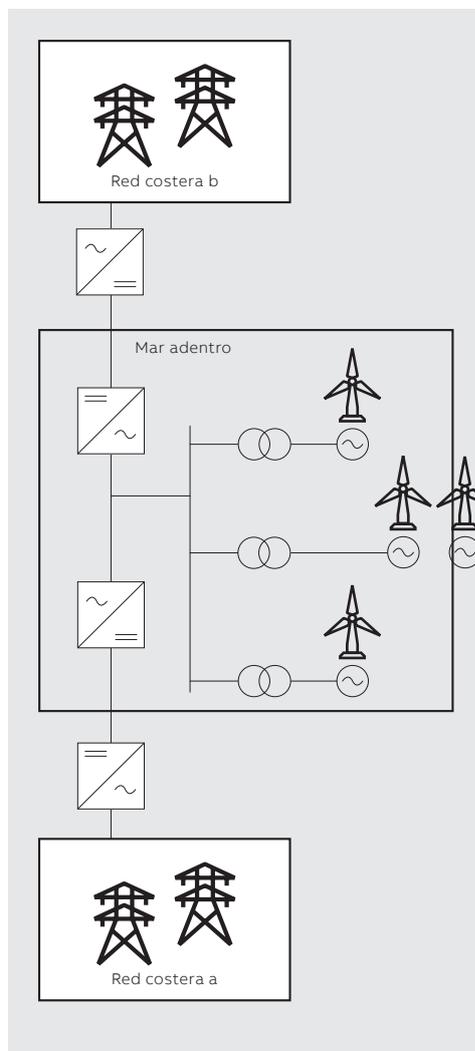
Modos de funcionamiento

ABB ha desarrollado e implementado con éxito conceptos innovadores para el control de redes marinas en islas en condiciones normales y también en caso de perturbaciones. Una de estas innovaciones es la instalación de un gran resistor de freno (chopper) controlado electrónicamente para mejorar la estabilidad de la red marina en caso de perturbaciones en la red terrestre.

04a



04b



04 Esquemas de conexión HVDC para el sector eólico marino.

04a Conexión punto a punto.

04b Disposición radial con múltiples enlaces HVDC.

04c Disposición radial con sistema HVDC multiterminal.

04d Disposición radial con enlaces de CA y subestación HVDC (back-to-back) como la instalada, por ejemplo, en el proyecto Kriegers Flak Combined Grid Solution.

Las lecciones aprendidas de las primeras conexiones eólicas marinas hicieron a TenneT ajustar los códigos de conexión de la red marina. El diseño del software de control modular y flexible utilizado por ABB para HVDC y FACTS (Sistemas flexibles de transmisión de corriente alterna) de ABB permitió la fácil implementación de los nuevos códigos de red en enlaces ya operativos.

El diseño del software de control modular y flexible utilizado para HVDC y FACTS permitió una implementación sencilla de los nuevos códigos de red en enlaces ya operativos.

Características especiales de las redes de CA marinas

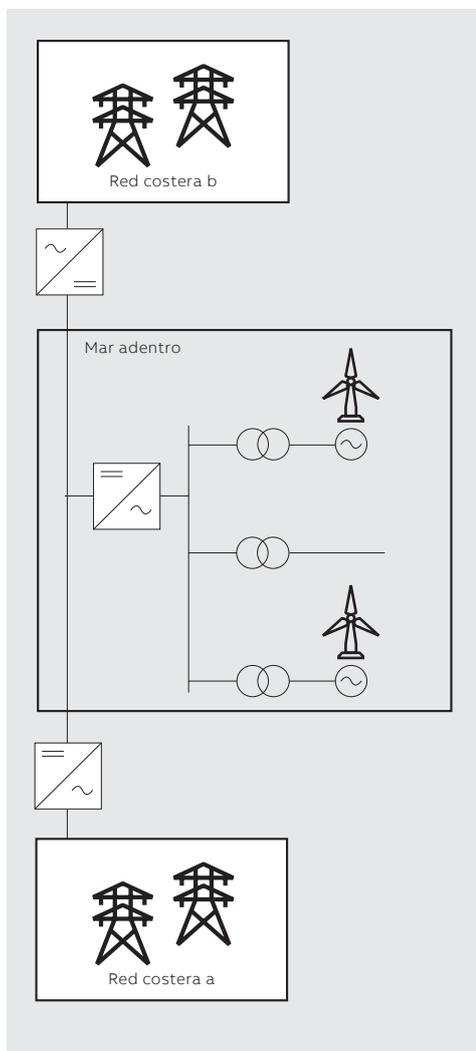
A diferencia de las típicas redes de transporte con líneas de transmisión, cargas y grandes unidades de generación basadas en máquinas síncronas, una red de CA marina comprende unidades generadoras no sincronizadas, cables submarinos, así como muchos transformadores en las subestaciones step-up de CA y los generadores de turbina eólica (WTG) próximos entre sí. Debido a la falta de máquinas síncronas, un sistema de CA marino tiene una inercia baja,

incluso nula. En dicho sistema puede tener lugar un salto transitorio de ángulo de fase y frecuencia en el caso de rechazo de carga causado por un fallo de CA marino o terrestre.

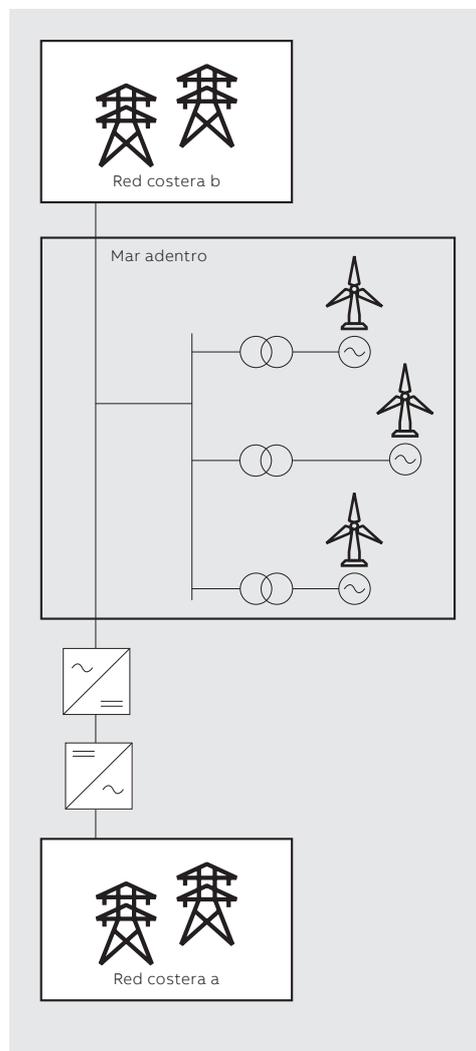
Esto dificulta que el bucle de seguimiento de fase (PLL) de los controladores de las WTG realice un seguimiento preciso de la tensión de la red. En el caso de fallos en la red en tierra, el chopper de CC mencionado anteriormente actúa como cortafuegos, absorbiendo el exceso de energía de los parques eólicos que no puede transmitirse a la red en tierra y, por tanto, evitando que la perturbación en esta entre en la red en alta mar. Junto con el control de frecuencia y tensión en el convertidor HVDC marino, el chopper garantiza la estabilidad de la red marina. Para fallos en la red marina se requiere un diseño de control adecuado para los HVDC y los WTG. Además, las resonancias generadas por la capacitancia y la inductancia de los cables y transformadores están mal amortiguadas, especialmente durante la fase inicial de activación del sistema de CA, cuando la generación de viento es escasa o nula.

Asimismo, debido a la cercanía eléctrica de los transformadores, puede esperarse una interacción simpática durante la activación del transformador en la puesta en marcha de un parque eólico en alta mar, causando sobretensiones armónicas temporales, mayor

04c



04d



	BorWin1	DolWin1	DolWin2
Ubicación del cliente	TenneT (Alemania)	TenneT (Alemania)	TenneT (Alemania)
En funcionamiento desde	2009	2013	2014
Potencia nominal (MW)	400	800	916
Tensión CA (mar adentro) (kV)	155	155	155
Tensión CC (kV)	±150	±320	±320
Tensión CA (línea de costa) (kV)	380	380	380
Longitud de cable en tierra (km)	2 x 75	2 x 90	2 x 90
Longitud de cable marino (km)	2 x 125	2 x 75	2 x 45
Proveedor de la plataforma	Heerema Fabrication Group	Heerema Fabrication Group	Aibel AS
Diseño de la plataforma	Superestructura tipo "jacket"	Superestructura tipo "jacket"	De gravedad
Parques eólicos marinos conectados	Bard Offshore 1	Borkum West II MEG Offshore 1 Borkum Riffgrund 1	Merkur Offshore Trianel Borkum Borkum Riffgrund 1

05

tensión en los devanados del transformador y un mal funcionamiento potencial del diferencial del transformador y la protección contra sobreintensidades. La puesta en marcha de una red de CA en alta mar no es en absoluto una tarea trivial. Entre las posibles medidas para evitar resonancias de excitación o la interacción simpática de los transformadores se incluyen la conmutación controlada (point-on-wave), el filtrado armónico mejorado con el convertidor HVDC marino o la instalación de filtros armónicos. Junto con TenneT, ABB ha desarrollado soluciones para abordar este tipo de inestabilidades.

— El chopper de CC absorbe el exceso de energía para evitar que las perturbaciones de la red en tierra entren en la red marina.

El valor de la estandarización

A lo largo de la última década, la industria ha recopilado una valiosa experiencia en el diseño y la operación de conexiones eólicas HVDC marinas. Las lecciones aprendidas y las mejores prácticas se recogen en las recomendaciones del sector y

06



—
05 Sistemas HVDC para conexión eólica marina proporcionados por ABB.

—
06 Plataforma DolWin2 en ruta hacia su lugar de instalación.

—
07 Plataforma DolWin2 Beta HVDC.

los códigos de red. La estandarización del diseño del sistema es una forma poderosa de explotar las mejores prácticas y mejorar la armonización entre operadores.

—

Un diseño robusto probado en la práctica y la apertura hacia innovaciones técnicas son factores importantes para reducir aún más el coste de la generación eólica marina.

Sin embargo, la estandarización no debería obstaculizar las innovaciones técnicas, como el concepto, debatido actualmente de conexión directa de las turbinas eólicas al convertidor marino de HVDC sin subestaciones step-up de CA intermedias en plataformas independientes.

Mantener el equilibrio adecuado entre disponer de un diseño sólido ya probado en la práctica y abrirse a innovaciones técnicas con posibles ventajas es importante para reducir aún más el coste de la generación eólica marina.

Vientos a favor del mercado

La industria eólica marina se ha expandido con rapidez durante la última década y seguirá haciéndolo, respaldada por la economía de escala en toda una cadena dedicada al suministro de unidades generadoras y parques eólicos con potencias nominales cada vez más altas. Este desarrollo creará más demanda de conexiones HVDC. La madurez tecnológica, junto con la creciente experiencia positiva de los sistemas ya operativos, ayuda a reducir el riesgo y a garantizar la implementación puntual y eficiente de las conexiones de red. Al mismo tiempo, ABB, con su compromiso a largo plazo con las conexiones eólicas marinas, seguirá introduciendo innovaciones en la tecnología HVDC con el fin de crear redes marinas más fuertes, más ecológicas y más inteligentes. ●

07

