

TRANSFORMATIVE TRENDS

HGÜ für Offshore-Wind – eine bewährte Technologie

Die Offshore-Windenergie ist das am schnellsten wachsende Segment unter den erneuerbaren Energien. Für eine effiziente Anbindung von weit vor der Küste gelegenen Windparks an nationale Stromnetze ist Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungstechnik (HGÜ) erforderlich – ein Bereich, in dem ABB über langjährige Erfahrung verfügt. Welche Herausforderungen auf diesem Gebiet in den letzten zehn Jahren bewältigt wurden, zeigt dieser Artikel.



Athanasios Krontiris
HVDC Connections,
ABB Power Grids
Mannheim, Deutschland

athanasios.krontiris@
de.abb.com

Mit einem durchschnittlichen Wachstum von 13 % in den letzten fünf Jahren und einem Anstieg der installierten Gesamtleistung auf 540 GW im Jahr 2017 hat sich die Windenergie rasant entwickelt →1–2. Trotz eines Anteils an der installierten Gesamtleistung von nur 3,5 % ist das Wachstum im Bereich der Offshore-Windenergie mit 28 % sogar noch größer →3. Schwerpunkt der Offshore-Windenergieerzeugung ist die Nordsee, aber auch in Nordamerika, Ostasien, Indien und an anderen Orten der Welt verbreitet sie sich zunehmend.



Peter Sandeberg
HVDC Connections,
ABB Power Grids
Ludvika, Schweden

peter.sandeberg@
se.abb.com

Nicht nur die Bemessungsleistung von Offshore-Windenergieanlagen nimmt stetig zu, auch ihre Entfernung zur Küste wird immer größer.

Dabei nimmt nicht nur die Bemessungsleistung von Offshore-Windenergieanlagen stetig zu, auch ihre Entfernung zur Küste und zu den Netzanschlusspunkten wird immer größer. Dies ist mit erheblichen technischen Herausforderungen verbunden.



—
01 Im Jahr 2017 stieg die Offshore-Windenergieerzeugung um fast 30 %.

Anbindung mit Wechsel- oder Gleichstrom?

Bei der Frage, ob ein Offshore-Windpark über eine Wechselstrom- (AC) oder Gleichstromverbindung (DC) an das Stromnetz angebunden werden soll, spielen die Bemessungsleistung, die Entfernung zur Küste und die Entfernung an Land bis zum nächsten starken Netzanschlusspunkt eine entscheidende Rolle. Letztere kann dabei bis zu 100 km betragen, da sich die Anlandepunkte häufig in dünn besiedelten Gebieten mit schwachem Übertragungsnetz befinden.

Ein bedeutender Vorteil von Wechselstrom sind die niedrigen Stationskosten. Allerdings steigen bei der Wechselstromübertragung die Verluste mit der Spannung, Kapazität und Leitungslänge. Jenseits der sogenannten kritischen Länge (je nach Kabeltyp zwischen 100 und 150 km) bleibt keine Kapazität für die Wirkleistungsübertragung übrig. Die klassische Lösung zur Erhöhung der Übertragungskapazität ist das Erhöhen der Spannung. Doch da die Blindleistung mit dem Quadrat der Spannung ansteigt, verringert sich durch die Erhöhung der Spannung die kritische Länge.

Eine Gleichstromverbindung hat den Vorteil niedrigerer Kabelkosten. Und da die Kabel nur einmal beim Einschalten geladen werden, sind die Kabelverluste ab einer bestimmten Entfernung niedriger als bei der AC-Übertragung. Dies gleicht die höheren Kosten für die DC-Umrichter aus.

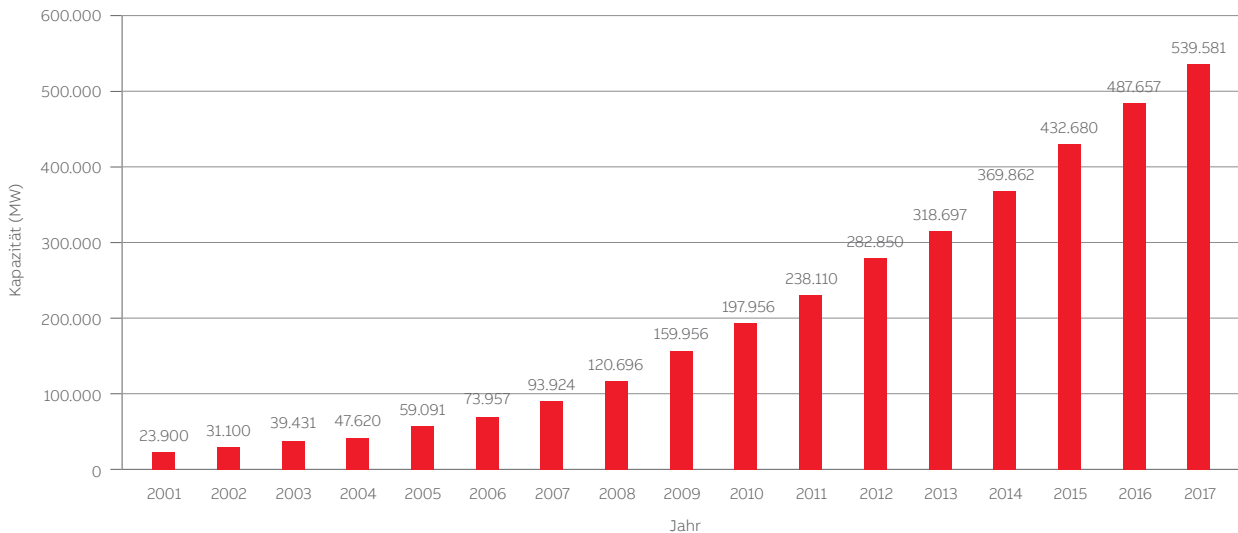
Darüber hinaus sind HGÜ-Kabel mit einer Isolierung aus vernetztem Polyethylen (XLPE) leichter als andere Kabel, was eine Installation im Offshore-Bereich einfacher und kostengünstiger macht. Das geringere Gewicht pro Längeneinheit ermöglicht den Transport längerer Kabelabschnitte, sodass weniger Kabelmuffen erforderlich sind, die Installationszeit verkürzt wird und das Ausfallrisiko sinkt.

Dies macht die Gleichstromlösung sowohl aus Sicht der Investitionskosten als auch der Betriebskosten mit zunehmender Leistung und Übertragungsentfernung konkurrenzfähig.

Offshore-HGÜ heute

Derzeit besitzen 40 der über 90 Offshore-Windparks in Europa eine Nennleistung (vorgesehene dauerhafte Erzeugungsleistung unter Vollast) von über 200 MW. Etwa ein Drittel davon ist einzeln oder in Gruppen per HGÜ mit dem Netz verbunden. Bisher sind sieben HGÜ-Systeme zur Anbindung von Offshore-Windparks in Betrieb, und drei weitere befinden sich im Bau. Alle Verbindungen befinden sich an der deutschen Nordseeküste und werden vom Übertragungsnetzbetreiber TenneT Offshore betrieben. Angesichts weiterer geplanter Projekte rund um den Globus sind die kurz- bis mittelfristigen Aussichten für die Offshore-HGÜ vielversprechend.





02

Mögliche Konfigurationen

Die einfachste Konfiguration für die HGÜ-Anbindung eines Offshore-Windparks ist eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen einem auf einer Plattform installierten Offshore-Umrichter und einem Umrichter an Land →4a. Alle bisher in Betrieb befindlichen Offshore-HGÜ-Verbindungen sind von diesem Typ.

Eine auf einer Plattform befindliche „Nabe“ wird über mehrere „Speichen“ mit Landnetzen im gleichen oder in verschiedenen Synchrongebieten verbunden.

Ein zunehmend interessantes Konzept ist ein Hybridsystem, d. h. eine Kombination aus Unterwasser-Kuppelleitungen zwischen Offshore-Netzen und deren Anbindung an das Festland →4b–4d. Solche sogenannten Hub-and-Spoke-Systeme (zu Deutsch Nabe-Speiche-Systeme) wurden kürzlich auch für die Nordsee vorgeschlagen. Dabei soll eine auf einer Offshore-Plattform oder künstlichen Insel befindliche „Nabe“ über mehrere „Speichen“ mit Landnetzen im gleichen oder in verschiedenen Synchrongebieten verbunden werden. Dieses Konzept eignet sich grundsätzlich sowohl für AC- als auch für DC-Verbindungen, wobei die AC-Option im Falle der Nordsee aufgrund der Entfernungen zur Küste nicht wirtschaftlich wäre. Bei einer Gleichstromlösung könnte die „Nabe“ mit mehreren parallelen Punkt-zu-Punkt-HGÜ-Verbindungen oder einer HGÜ-Mehrpunktverbindung angebunden werden.

Vorteile des Hub-and-Spoke-Konzepts

Da die Auslastung einer Offshore-Windparkanbindung ausschließlich vom schwankenden Energiedargebot des herrschenden Winds bestimmt wird, lässt sich der Nutzungsgrad durch die Kopplung mit anderen Netzen erheblich verbessern.

Ein international koordinierter Ansatz bei der Installation der Übertragungsinfrastruktur kann zudem dabei helfen, Kosten zu reduzieren. Weitere Vorteile ergeben sich aus der Möglichkeit eines einfacheren Energieaustauschs zwischen internationalen Märkten.

Ferner ermöglicht das Hub-and-Spoke-Konzept einen schrittweisen Ausbau mit einer stufenweisen Erhöhung der Übertragungskapazität, wodurch früher eine höhere Verfügbarkeit der Energie erreicht werden kann. Bei einem schrittweisen Vorgehen können zudem Veränderungen vorgenommen und neue Technologien integriert werden, während sich der Windpark entwickelt. Auch Investitionen können schrittweise erfolgen.

Das erste Projekt dieser Art wird zurzeit in der Ostsee realisiert. Im Rahmen des Projekts Kriegers Flak – Combined Grid Solution (CGS) entsteht eine AC-Verbindung zwischen Dänemark und Deutschland über die Offshore-Windparks Kriegers Flak A und B sowie Baltic 1 und 2. Um die Frequenzkopplung zwischen den nordischen und kontinentaleuropäischen Synchrongebieten zu gewährleisten, liefert ABB eine HGÜ-Kurzkupplung, die am deutschen Anlandepunkt in Bentwisch errichtet wird, sowie eine übergeordnete Regelung, die eine bestmögliche Nutzung der Anlagen des hybriden Interkonnektors sicherstellt. Es wird erwartet, dass die bei dem Projekt gewonnene Betriebserfahrung eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung des Hub-and-Spoke-Konzepts spielen wird.

02 Kumulierte installierte Windenergie-Erzeugungskapazität in den Jahren 2001 bis 2017.

03 Weltweit installierte Erzeugungskapazität für Offshore-Windenergie.

03a Kumulierte Offshore-Kapazität nach Ländern für 2017 im Vergleich zu 2016.

03b Entwicklung der jährlichen kumulierten Kapazität für die Jahre 2011 bis 2017.

Offshore-HGÜ-Verbindungen von ABB

ABB hat bereits drei HGÜ-Verbindungen für Offshore-Windparks erfolgreich realisiert →5–7. Diese Projekte wären ohne die bedeutenden Entwicklungen der ABB-Partner auf dem Gebiet des Plattformdesigns und von ABB auf dem Gebiet der HGÜ-Technologie nicht möglich gewesen.

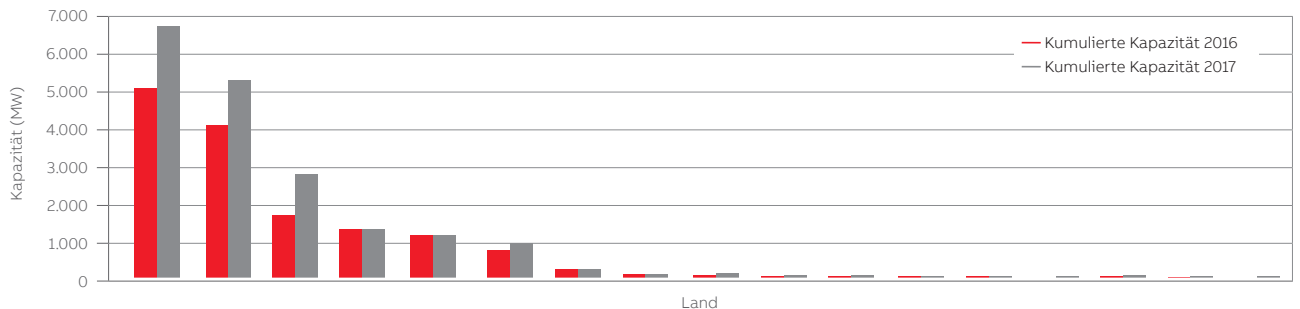
Das kompakte Design der HVDC-Light-Ausrüstung ermöglicht eine kostengünstige Implementierung auf einer Offshore-Plattform.

Eine Schlüsseltechnologie für Offshore-HGÜ-Verbindungen ist die erstmals von ABB unter dem Namen HVDC Light® auf den Markt gebrachte Spannungszwischenkreis-Umrichtertechnologie (englisch: Voltage Sourced Converter, kurz VSC). Durch direkte Regelung der Spannung und Frequenz im Offshore-AC-Inselnetz überträgt

die Offshore-Umrichterstation automatisch die gesamte erzeugte Wirkleistung in das landseitige Drehstromnetz und sorgt gleichzeitig für eine stabile Spannung und Frequenz im Offshore-AC-Netz. Außerdem ermöglicht das kompakte Design der HVDC-Light-Umrichterstation eine kostengünstige Implementierung auf einer Offshore-Plattform.

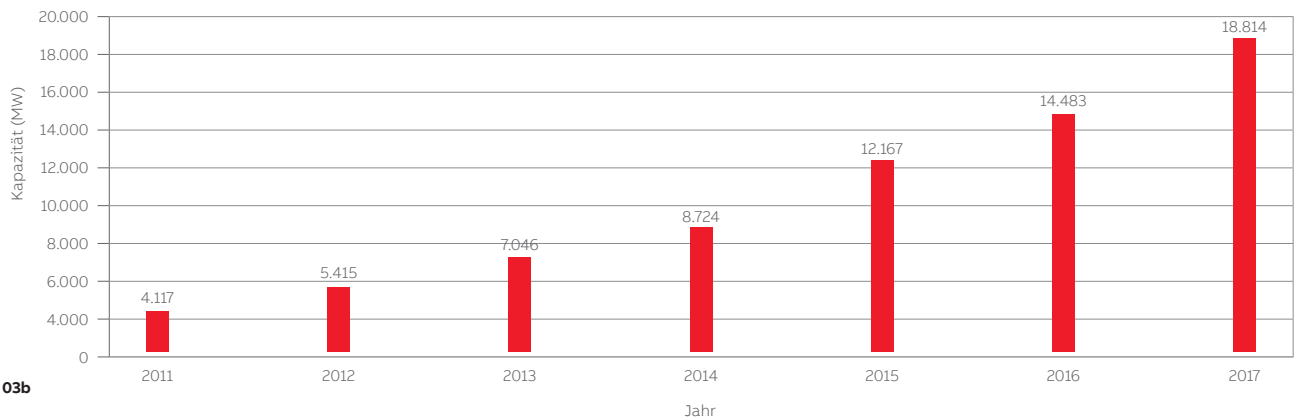
Pionierarbeit für die HGÜ-Anbindung von Offshore-Windparks

Im Vergleich zu anderen HGÜ-Anwendungen ist die Implementierung im Offshore-Bereich mit einigen besonderen Designanforderungen verbunden. Einige der Hauptherausforderungen ergeben sich aus den besonderen Umgebungsbedingungen, dem Fehlen anerkannter Standards für Offshore-HGÜ-Systeme und -Komponenten, der beschränkten Zugänglichkeit und dem Betrieb der Anlagen auf hoher See sowie dem anspruchsvollen Schnittstellenmanagement. Hinzu kommt, dass sich Offshore-AC-Inselnetze in ihrem Systemverhalten deutlich von typischen Übertragungsnetzen unterscheiden.



03a

	UK	Deutschland	VR China	Dänemark	Niederlande	Belgien	Schweden	Vietnam	Finnland	Japan	S. Korea	USA	Irland	Taiwan	Spanien	Norwegen	Frankreich	Gesamt
Gesamt 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
Neu 2017	1.680	1.247	1.161	0	0	165	0	0	60	5	3	0	0	8	0	0	2	4.331
Gesamt 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

Umgebungsbedingungen

Offshore-HGÜ-Systeme sind typischerweise rauen Umgebungsbedingungen in Form von mechanischen Schwingungsbelastungen, extremen Temperaturen, übermäßiger Feuchtigkeit und einer salzhaltigen Atmosphäre ausgesetzt. Zudem haben die Witterung, der Seegang und die Handhabung auf dem Wasser Einfluss auf die Lagerung und den Transport der Komponenten. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass diese Herausforderungen durch ein sorgfältiges Design bewältigt werden können.

—

ABB hat innovative Konzepte für die Regelung von Offshore-Inselnetzen im normalen und gestörten Betrieb entwickelt und implementiert.

Plattformdesign und Normen

Die ersten beiden Plattformen, die für HGÜ-Umrichterstationen zur Anbindung von Offshore-Windparks gebaut wurden, basierten auf einer herkömmlichen sogenannten Jacket-Topside-Lösung mit einer Gründung aus Stahlrohren (Jackets) und darauf ruhenden Aufbauten (Topsides). Für das Projekt DolWin 2 entwickelte

ABB in enger Zusammenarbeit mit einer norwegischen Werft eine innovative flexible, robuste und skalierbare Plattform, die eine effizientere Produktion und einfachere Installation (ohne Schwergutschiffe oder Hubvorgänge) ermöglicht →7-8.

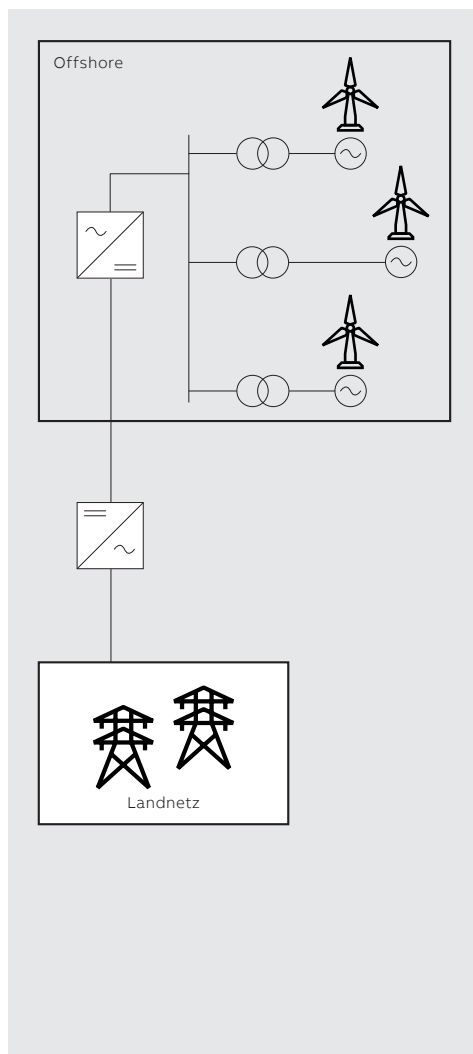
Die Plattform basiert auf einer Kombination aus Halbttaucher- und Schwerkraftfundament. Während des Transports und der Installation verhält sie sich wie eine Halbttaucherplattform, die anschließend durch Ballastierung auf dem Meeresboden verankert wird.

In der Offshore-Industrie herrschen strenge Anforderungen, und Konstruktionen müssen durch eine Zertifizierungsstelle genehmigt werden. Daher ist eine starke Partnerschaft mit einem sachkundigen Plattformkonstrukteur von entscheidender Bedeutung, um kurze Projektvorlaufzeiten zu gewährleisten und Risiken zu minimieren.

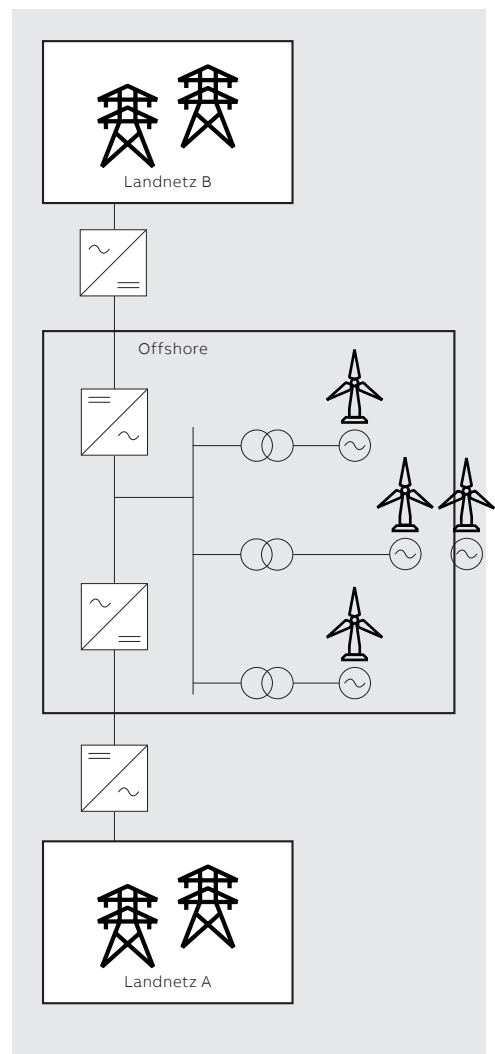
Betrieb von Offshore-AC-Netzen

ABB hat verschiedene innovative Konzepte für die Regelung von Offshore-Inselnetzen im normalen und gestörten Betrieb entwickelt und erfolgreich implementiert. Dazu gehört die Installation eines großen, elektronisch geregelten Bremswiderstands (Choppers) zur Verbesserung

04a



04b



—
04 HGÜ-
Anschlusskonzepte für
Offshore-Windparks.

04a Punkt-zu-Punkt-
Verbindung.

04b Hub-and-Spoke-
System mit mehreren
HGÜ-Verbindungen.

04c Hub-and-Spoke-
System mit HGÜ-
Mehrpunktverbindung.

04d Hub-and-Spoke-
System mit AC-
Verbindungen und HGÜ-
Kurzkupplung, wie sie z. B.
beim Projekt Kriegers Flak
– Combined Grid Solution
realisiert wird.

der Stabilität des Offshore-Netzes bei Störungen
im Landnetz.

Erfahrungen mit frühen Offshore-Anbindungen
hatten TenneT dazu veranlasst, die Netzan-
schlussregeln (Grid Codes) für Offshore-Anlagen
anzupassen. Dank des flexiblen, modularen

—
**Dank des flexiblen, modularen
Designs der Regelungssoftware
konnten die neuen Grid Codes
schnell umgesetzt werden.**

Designs der Regelungssoftware konnten die neuen
Grid Codes in bereits in Betrieb befindlichen
Verbindungen schnell umgesetzt werden. Die von
ABB entwickelte Regelungssoftware wird nicht
nur für HGÜ-Systeme, sondern auch für FACTS-
Anlagen (Flexible Alternating Current Transmission
Systems) eingesetzt.

Besondere Merkmale von Offshore-AC-Netzen

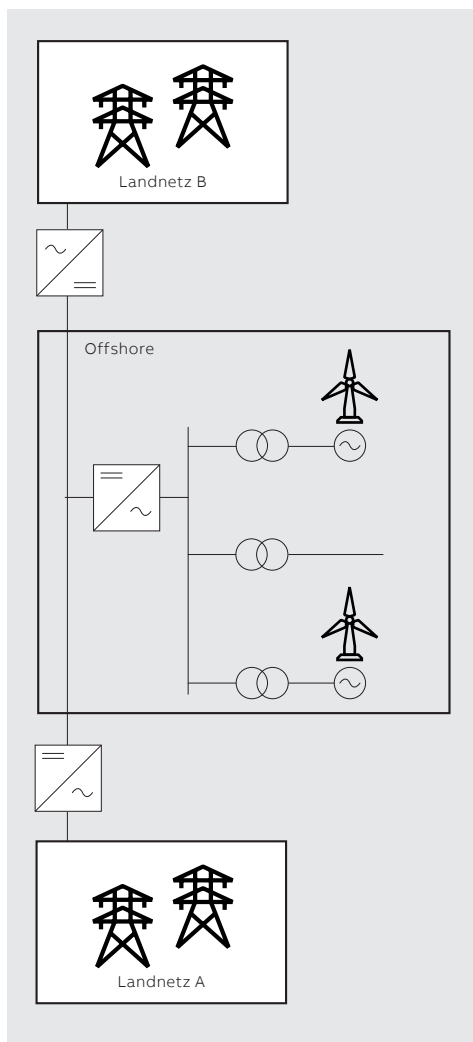
Anders als typische Übertragungsnetze mit
Übertragungsleitungen, Verbrauchern und
großen Erzeugungseinheiten auf der Basis von
Synchronmaschinen beinhaltet ein Offshore-
AC-Netz nicht synchrone Erzeugungseinheiten,

Seekabel und viele Transformatoren in den AC-
Umspannstationen und Windenergieanlagen (WEAs),
die in unmittelbarer Nähe zueinander liegen.

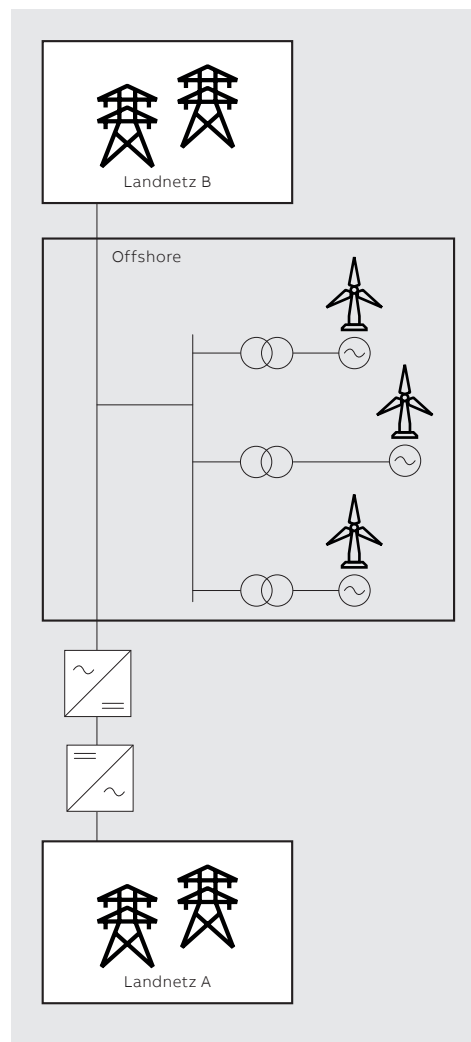
Aufgrund der fehlenden Synchronmaschinen besitzt
ein Offshore-AC-System nur eine geringe bzw. gar
keine Trägheit. In einem solchen System kann es
im Falle eines Lastabwurfs infolge eines Fehlers
im Onshore- oder Offshore-Netz zu einer großen
Frequenz- und Phasenwinkelabweichung kommen.
Dies erschwert den phasengekoppelten Regelkreisen
(PLL) der WEA-Regler die genaue Verfolgung der
Netzspannung. Bei Fehlern im Landnetz fungiert der
oben genannte DC-Chopper als Firewall und nimmt
die überschüssige Energie von den Windparks auf,
die nicht in das Landnetz übertragen werden kann,
und verhindert so, dass die Störung vom Landnetz in
das Offshore-Netz gelangt.

Zusammen mit der Frequenz- und Spannungs-
regelung im Offshore-HGÜ-Umrichter garantiert
der Chopper so die Stabilität des Offshore-
Netzes. Im Hinblick auf Fehler im Offshore-Netz
ist ein entsprechender Regelungsentwurf für die
HGÜ und WEAs erforderlich.

04c



04d



	BorWin1	DolWin1	DolWin2
Kunde (Standort)	TenneT (Deutschland)	TenneT (Deutschland)	TenneT (Deutschland)
In Betrieb seit	2009	2013	2014
Nennleistung (MW)	400	800	916
Offshore-AC-Spannung (kV)	155	155	155
DC-Spannung (kV)	±150	±320	±320
Offshore-AC-Spannung (kV)	380	380	380
Landkabellänge (km)	2 x 75	2 x 90	2 x 90
Seekabellänge (km)	2 x 125	2 x 75	2 x 45
Plattformlieferant	Heerema Fabrication Group	Heerema Fabrication Group	Aibel AS
Plattformkonstruktion	Jacket-Topside	Jacket-Topside	Schwerkraftfundament
Angeschlossene Offshore-Windparks	Bard Offshore 1	Borkum West II MEG Offshore 1 Borkum Riffgrund 1	Merkur Offshore Trianel Borkum Borkum Riffgrund 1

05

Weiterhin werden Resonanzen, die durch die Kapazität von Kabeln und die Induktivität von Kabeln und Transformatoren entstehen, schwach gedämpft. Das gilt besonders während der Einschaltvorgänge im Offshore-AC-System, wenn nur wenig bzw. gar keine Windenergieerzeugung stattfindet.

Außerdem sind beim Anfahren eines Offshore-Windparks aufgrund der elektrischen Nähe der Transformatoren Wechselwirkungen bei deren Einschalten zu erwarten, die zu vorübergehenden harmonischen Überspannungen, einer erhöhten Belastung der Transformatorwicklungen und einer möglichen Fehlfunktion des

—
Der DC-Chopper nimmt überschüssige Energie auf und verhindert, dass Störungen vom Landnetz in das Offshore-Netz gelangen.

Differential- und Überstromschutzes von Transformatoren führen können. Das Anfahren eines Offshore-AC-Netzes ist alles andere als trivial. Zu den möglichen Maßnahmen zur Verhinderung von Resonanzen oder resonanten

06



—
05 Von ABB bereitgestellte HGÜ-Systeme zur Anbindung von Offshore-Windparks.

—
06 Die DolWin2-Plattform auf dem Weg zu ihrem Standort.

—
07 Die HGÜ-Plattform DolWin2 Beta.

Wechselwirkungen von Transformatoren gehören synchrones Schalten, erweitertes Filtern von Oberschwingungen mithilfe des Offshore-HGÜ-Umrichters oder die Installation von Oberschwingungsfiltern. In Zusammenarbeit mit TenneT hat ABB Lösungen zur Bewältigung solcher Instabilitäten entwickelt.

—
Wichtige Faktoren für eine weitere Senkung der Kosten sind ein robustes, praxiserprobtes Design und die Offenheit für technische Innovationen.

Standardisierung – Chancen und Risiken

In den vergangenen zehn Jahren hat die Branche wertvolle Erfahrungen im Entwurf und im Betrieb von HGÜ-Verbindungen für Offshore-Windparks gesammelt. Die gewonnenen Erkenntnisse und bewährten Verfahrensweisen (Best Practices) fließen in Anwendungsregeln und Grid Codes ein. Die Standardisierung des Systemdesigns ist eine wirksame Möglichkeit, um die Nutzung von Best Practices zu fördern und die Harmonisierung zwischen Anbietern zu verbessern.

Allerdings sollte verhindert werden, dass technische Innovationen wie das zurzeit diskutierte Konzept der direkten Anbindung

von Windenergieanlagen an den Offshore-HGÜ-Umrichter ohne zwischengeschaltete AC-Umspannstationen auf separaten Plattformen durch die Standardisierung behindert werden.

Um die Kosten für die Offshore-Windenergieerzeugung weiter zu senken, ist es wichtig, den richtigen Mittelweg zwischen dem Festhalten an einem robusten, praxiserprobten Design und der Offenheit für technische Innovationen mit potenziellen Vorteilen zu finden.

Markt mit Rückenwind

Die Offshore-Windbranche ist in den vergangenen zehn Jahren rasant gewachsen und wird – unterstützt durch die Entwicklung von Erzeugungseinheiten mit immer höheren Bemessungsleistungen und Windparks mit immer höheren Nennleistungen – in Zukunft noch weiter wachsen. Dies wird zur einer verstärkten Nachfrage nach HGÜ-Verbindungen führen. Die mittlerweile erprobte Technologie und die zunehmend positiven Erfahrungen mit bereits in Betrieb befindlichen Systemen helfen dabei, Risiken zu reduzieren und eine termingerechte und effiziente Implementierung von Netzanbindungen sicherzustellen. Gleichzeitig wird ABB im Rahmen ihres langfristigen Engagements auf dem Gebiet der Offshore-Windparkanbindungen weiter an Innovationen in der HGÜ-Technologie arbeiten, um stärkere, intelligenter und umweltfreundlichere Offshore-Netze zu ermöglichen. ●

07

