



**Atti del Seminario
"ENERGIA DAL MARE"
Mercoledì 29 Giugno 2016 - Ore 14
Aula Magna dell'Università Parthenope, Via Acton 38 Napoli**

TRASPORTO E GESTIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA IN AMBITO OFFSHORE E COSTIERO

**prof. Vincenzo Galdi
Dipartimento di Ingegneria Industriale
Università degli Studi di Salerno
vgaldi@unisa.it**

Outline

- *Energia dal mare*
- *I costi*
- *Come è fatto un impianto: l'eolico offshore*

Energia dal Mare

Introduzione

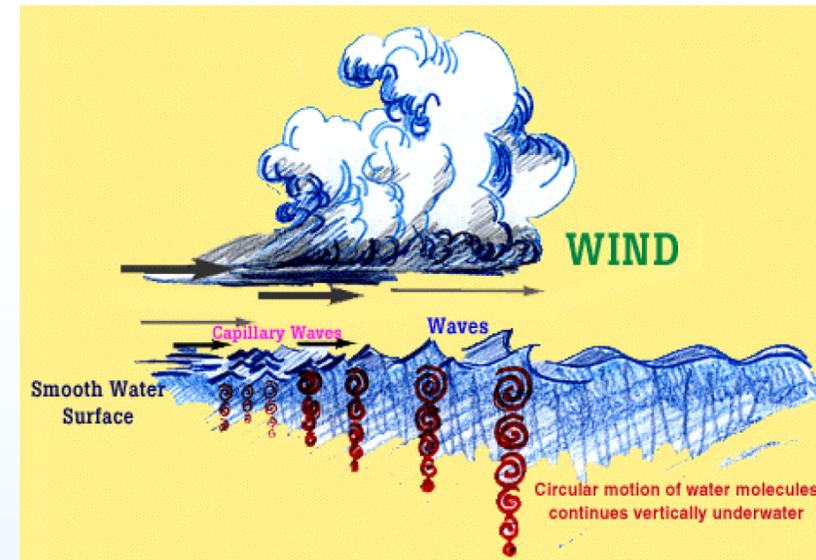
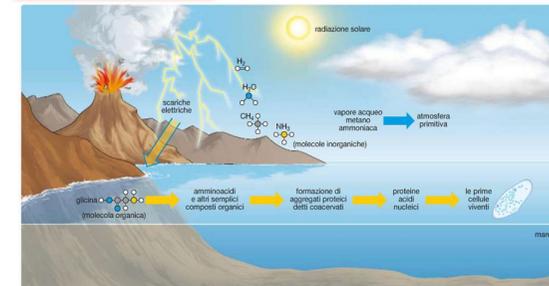
Il mare è fonte di vita: noi siamo figli del mare

Il mare è anche una fonte inesauribile di energia:

- *Energia dalle onde*
- *Energia dalle correnti marine*
- *Energia dalle maree*
- *Energia dal gradiente termico tra superficie e fondali*
- *Energia dal gradiente salino*
- *Energia dal vento*

Archeano

Ipotesi di OPARIN (1922):
il Brodo Primordiale



Source : M. Previsic

Energia dal Mare

Strumenti per la valutazione: i costi livellati

Per paragonare sistemi e tecnologie differenti si utilizza il **costo livellato dell'energia (LCOE – levelized cost of energy)** che permette il confronto delle tecnologie per la produzione di energia sulla base di costi medi ponderati. Tra i diversi modelli per calcolare LCOE, si può utilizzare il metodo di attualizzazione:

$$LCOE = \frac{PV(\text{Costs})}{PV(\text{Output})} = \frac{\sum_{t=0}^n C_t / (1+r)^t}{\sum_{t=0}^n O_t / (1+r)^t}$$

dove il flusso (reale) dei costi futuri e delle uscite (elettrica), identificati come C_t e O_t nel periodo t , sono attualizzati per un PV applicando il tasso di sconto r , considerato tipicamente pari al 10%

Energia dal Mare

Strumenti per la valutazione comparativa

*Il **costo livellato** è ottenuto dall'unione di diversi contributi, quali:*

- *il **costo** associato ai **permessi** e **licenze**, che è difficile da stimare, dal momento che il quadro normativo deve essere ancora stabilito e ci si aspetta di essere altamente variabile da paese a paese*
- *il **costo di capitale**, che comprende i costi per l'acquisto e l'installazione dei diversi elementi necessari al parco di generazione*
- *il **costi operativi** e di **manutenzione** necessari lungo tutta la vita del parco di generazione*
- *il **costo di smantellamento***

*Inoltre, per calcolare il **costo livellato**, è necessario conoscere il fattore di capacità di ogni tecnologia per determinare la potenza di uscita, e il **tasso di sconto** – il ritorno dell'investimento necessario per attrarre gli investitori – per ottenere il valore attuale di ogni costo*

Energia dal Mare

I costi dell'Eolico Offshore

Il costo di pre-sviluppo coinvolge tutte le spese sostenute per studi preliminari, progetti, valutazione di impatto ambientale, ecc., così come la direzione e il coordinamento delle attività di cui sopra. Essa dipenderà da vari fattori, come la posizione, come anticipato variano da paese a paese, o la dimensione dell'impianto

Si ritiene che questo costo varia tra € 500.000 e € 2.000.000 ed è generalmente espresso in percentuale del costo del capitale - CAPEX (€), con un valore tipico pari al 10%

Inoltre, il costo di permessi e licenze è stimato intorno ai € 43 per kW installato, che è circa il 2% del costo della turbina (€)

Energia dal Mare

I costi dell'Eolico Offshore

Le principali voci del *costo di capitale* per la realizzazione di un parco eolico offshore sono:

- *Costi delle turbine eoliche: 69,77%*
- *Costo del trasformatore della sottostazione: 6,71%*
- *Costi lavori di costruzione: 14,69%*
- *Costo impianto elettrici cablaggio interno parco, cavo di esportazione: 8,83%*

Source	Capital cost
BWEA	\$3450–\$5850/kW
Ernst and Young	\$4500/kW
Krohn <i>et al.</i>	\$2000–\$2700/kW
Heptonstall <i>et al.</i>	£2000/kW

Source : ' Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind Energy ' S. Astariz, A. Vazquez, and G. Iglesias)

Energia dal Mare

I costi dell'Eolico Offshore

La composizione dei costi operativi e di manutenzione è evidenziata in tabella

Categories	€/MW h	%
Maintenance	8.8	40.00
Administration and miscellaneous	5.5	25.00
Insurance	3.3	15.00
Rent	3.3	15.00
Electricity	1.1	5.00

Source : ' Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind Energy ' S. Astariz, A. Vazquez, and G. Iglesias)

Il costo di smantellamento in alcuni studi è valutato intorno al 0,5 - 1% del costo capitale, in altri 0,2 M€/MW

Energia dal Mare

I costi dell'energia dalle correnti

I costi di pre-sviluppo si presume essere simile a quelli dell'eolico offshore

Il costo di capitale varia tra € 1.800/kW e € 4.000/kW, dove il costo delle turbine è simile a quelle delle turbine eoliche offshore e varia tra il 30% e il 50% del costo di capitale

Distribution of the capital cost	Percentage of total cost
Turbine (and structure)	30%–50%
Installation	16%–30%
Electrical installation	15%–20%

Source : ' Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind Energy ' S. Astariz, A. Vazquez, and G. Iglesias)

I costi operativi e di manutenzione, i costi di assicurazioni, i costi di smantellamento sono stimati tra € 158.500/anno e € 412.600/anno, mentre il fattore di capacità è pari al 30%

Energia dal Mare

I costi dell'energia dalle onde

I costi di pre-sviluppo si presume essere simile a quelli dell'eolico offshore

Il costo di capitale comprende il costo per l'acquisto dei convertitori di energia dalle onde (WEC) e tutti gli elementi necessari per la costruzione del parco, e cioè ormeggi (Mooring), cavi sottomarini sottostazioni, ed ovviamente l'installazione

Element	Cost
WEC & installation	M€2.5–6.0/MW
Mooring system	10% WECs cost €0.265/N
Mooring installation	€50 000/day
Underwater cable	10% CAPEX
Cable installation	€2.07/m
Electrical substation	≈M€1.2

Source : ' Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind Energy ' S. Astariz, A. Vazquez, and G. Iglesias)

Energia dal Mare

I costi dell'energia dalle onde

I costi operativi e di manutenzione sono stimati intorno ai 30 €/MWh

È opportuno considerare che trascorsi 10 anni dal set up dell'impianto, i WEC devono essere rimossi dal mare per una revisione completa, con un ulteriore costo stimato intorno al 4,2% delle spese iniziali

Il costo di smantellamento in alcuni studi è valutato intorno al 0,5-1% dell'investimento iniziale

*Per quanto riguarda il **fattore di capacità**, questo varia tra il 20% e 50%*

Energia dal Mare

Valutazione e confronto in termini di *LCOE*

I costi livellati sono riportati in tabella per ciascuna tecnologia di conversione, ove si osserva come l'energia estratta dall'onde presenta il maggiore costo

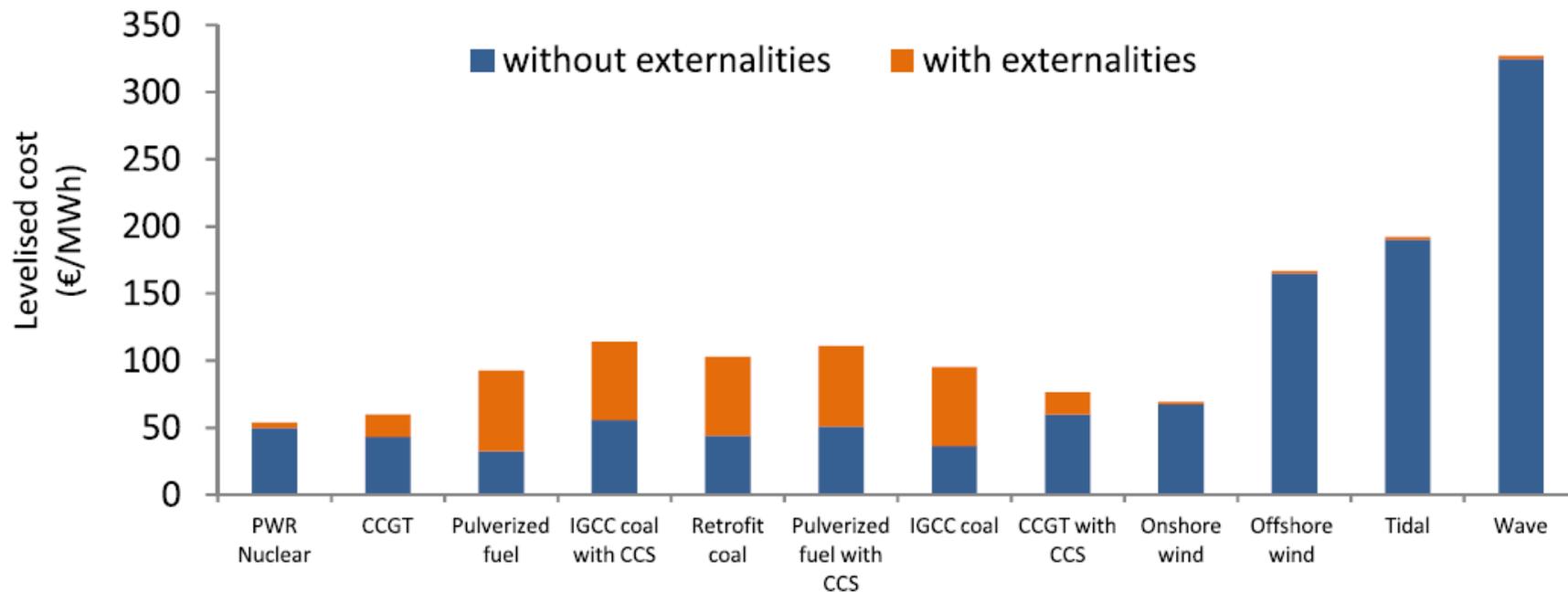
Technology	<i>LCOE</i> (€/MW h)
Offshore wind	165
Tidal	190
Wave	325

Source : ' Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind Energy ' S. Astariz, A. Vazquez, and G. Iglesias)

Le differenze di costi sono legate al grado di maturità della tecnologia: l'eolico offshore è avvantaggiata essendo praticamente l'unica tecnologia "commerciale", a differenza della tecnologia di estrazione di energia dalle onde dove la maggior parte dei WEC sono prototipi che non sono ancora testati su larga scala

Energia dal Mare

Valutazione e confronto: Costi livellati



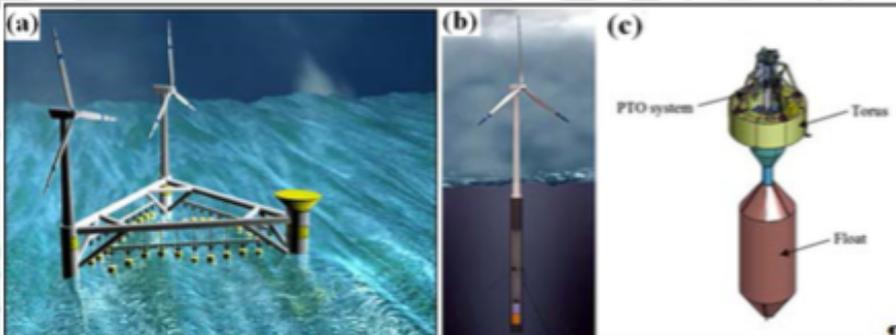
Costi livellati per differenti tecnologie compresi i costi esterni (Source : ' Evaluation and comparison of the levelized cost of tidal, wave, and offshore wind Energy ' S. Astariz, A. Vazquez, and G. Iglesias)

Energia dal Mare

Una soluzione? la integrazione

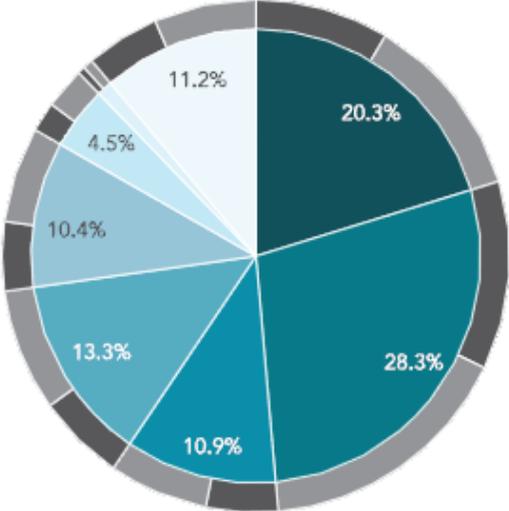
Può sembrare strano, ma anche nel mare c'è poco spazio (utile!)

Una soluzione per contenere i costi è quella di condividere le risorse e far coesistere nello stesso specchio d'acqua più sistemi di generazione, condividendo i costi di impianto

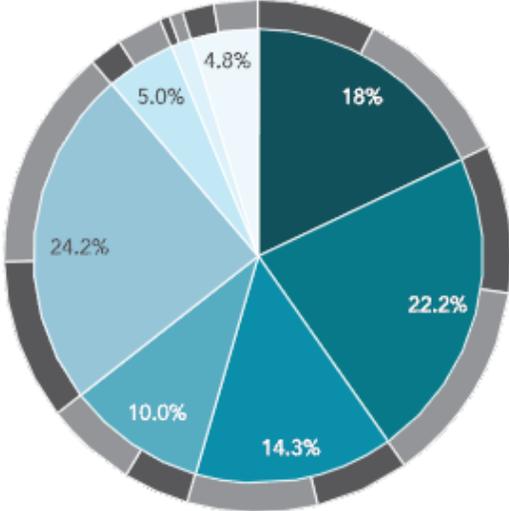


Energia dal Mare

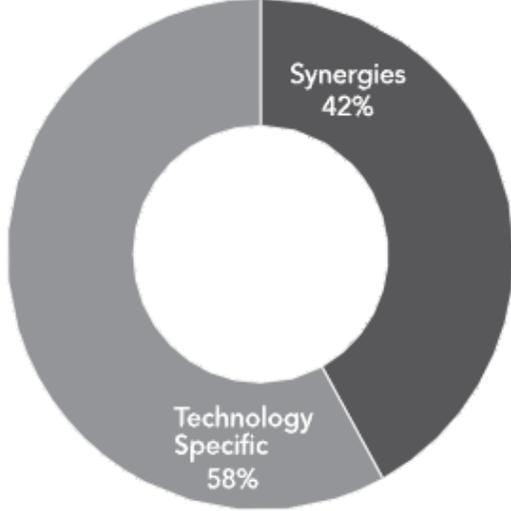
Una soluzione? la integrazione



Wave & Tidal



Offshore Wind



- O&M
- Power Take Off
- Electrical Infrastructure
- Support Structure
- Logistic & Installation
- Project Development Permit
- Other CAPEX
- Other VAR

Sinergie tra onde e correnti marine e eolico offshore Source: JRC 2014

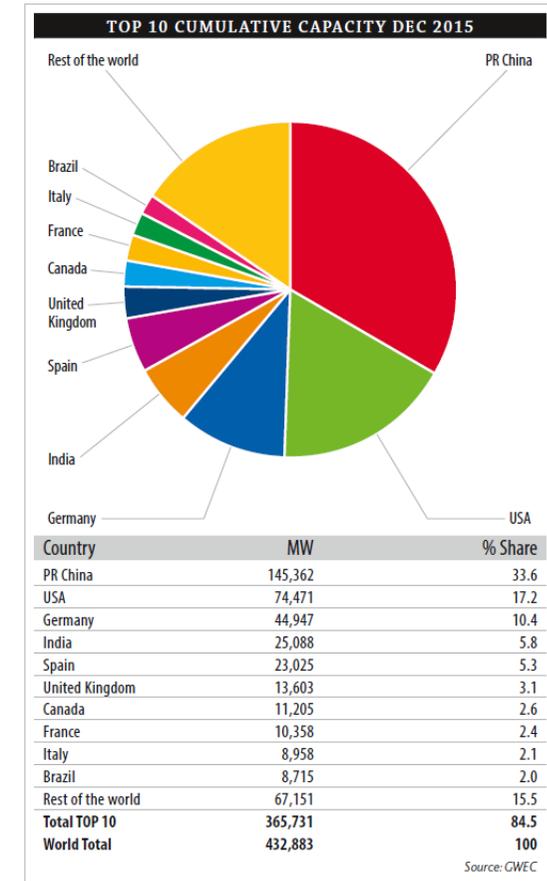
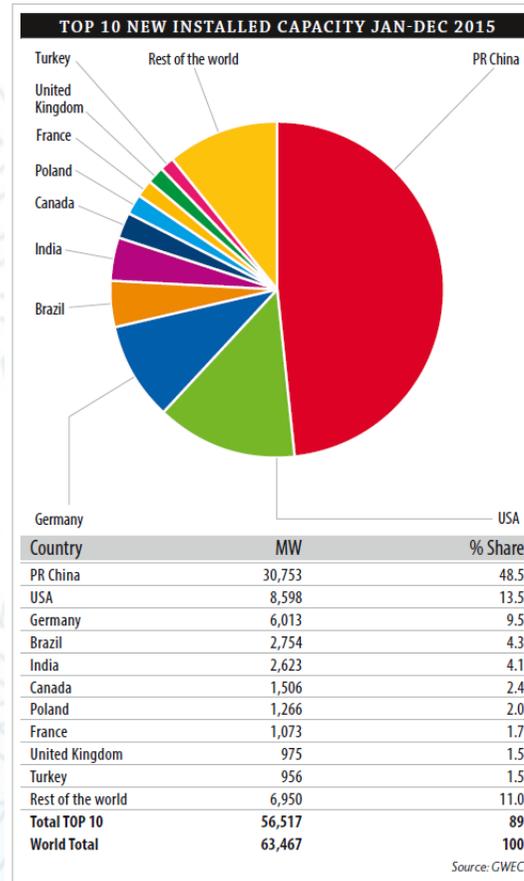
Potenza Eolica nel Mondo

Crescita della produzione

Alla fine del 2015 :

➤ Oltre i **63 GW** di nuove installazioni, **22%** di crescita annuale, dovute soprattutto agli oltre **30 GW** installati in **Cina**

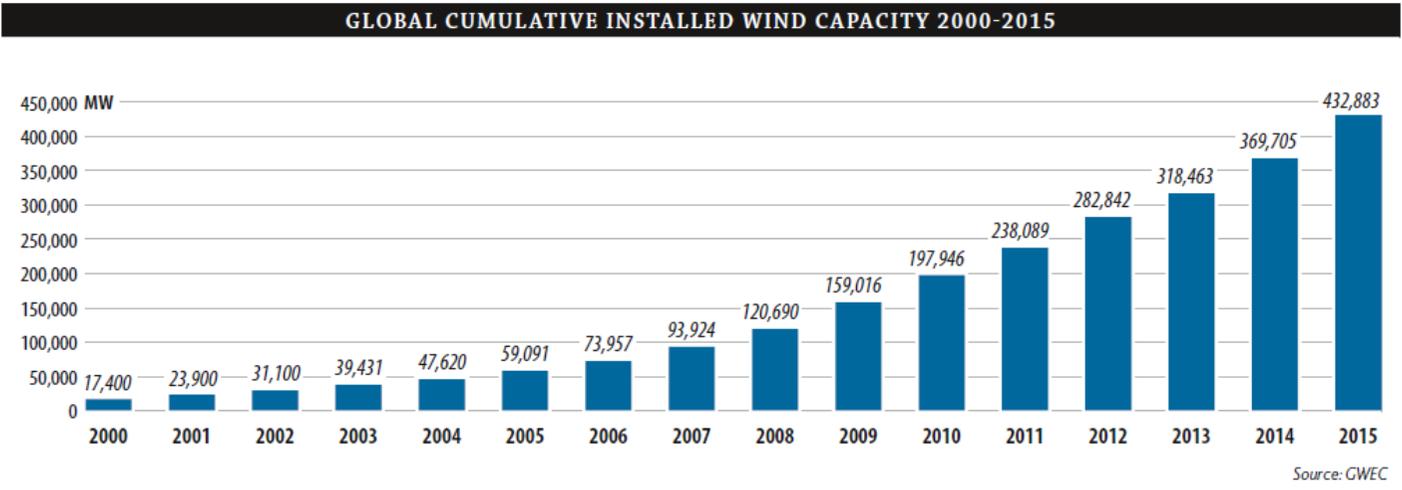
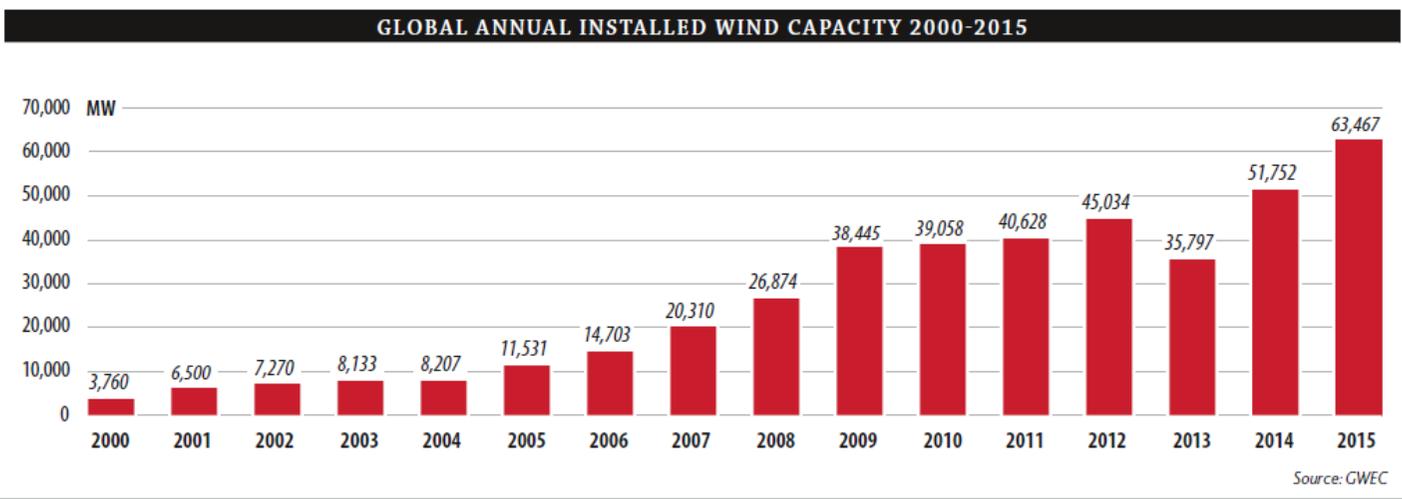
➤ Oltre i **432 GW** di potenza totale installata, con una crescita del **17%** rispetto al 2014



Source : GWEC – Global Wind 2015 Report

Potenza Eolica nel Mondo

Crescita della produzione

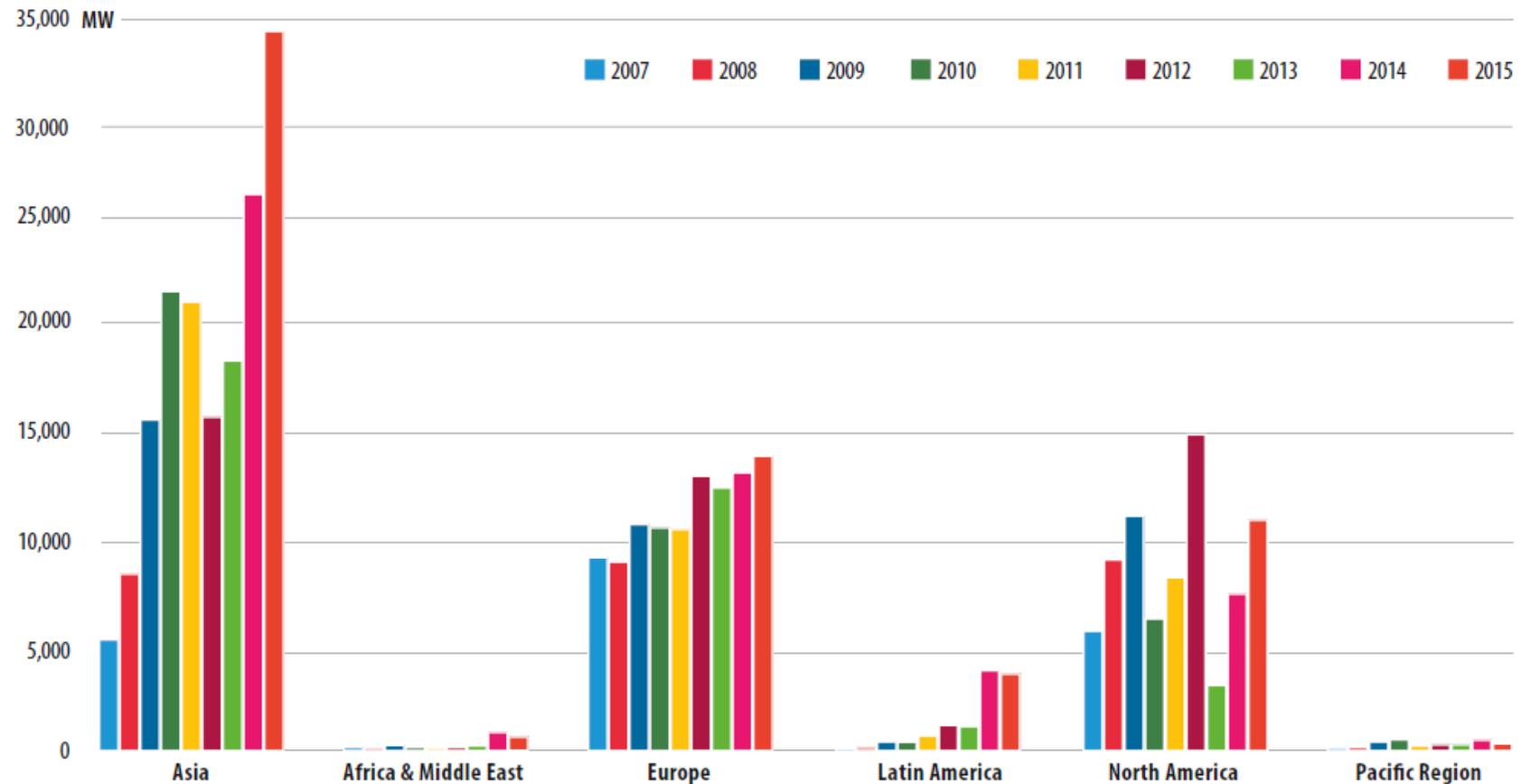


Source : Areva/Jan Oelker

Source : GWEC – Global Wind 2015 Report

Potenza Eolica nel Mondo

Capacità installata annua per regione dal 2007 al 2015

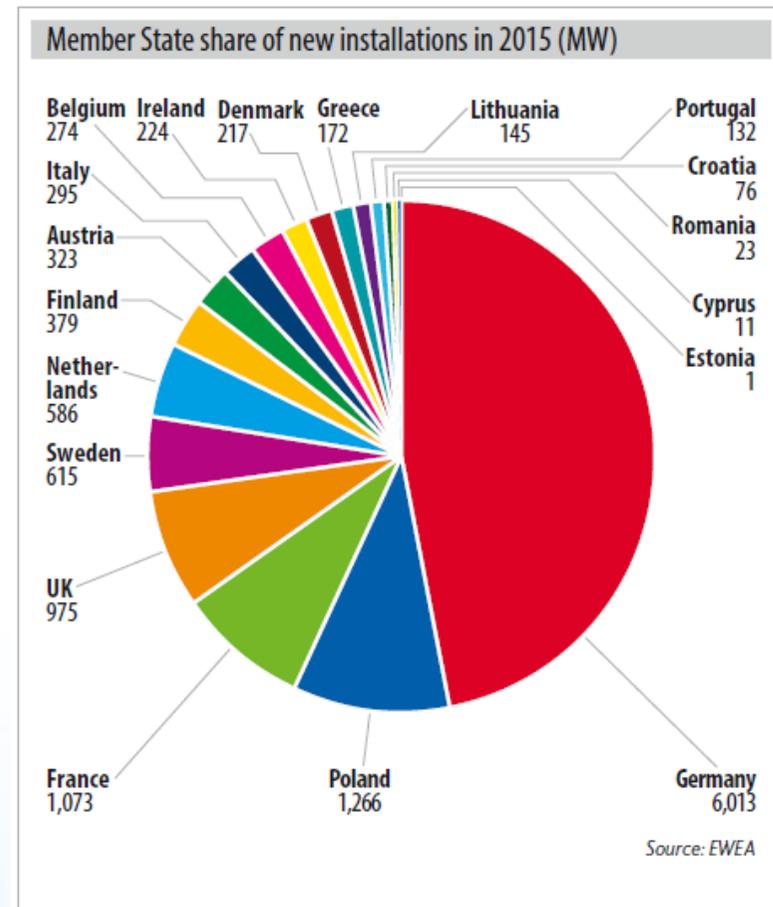


Source : GWEC – Global Wind 2015 Report

Unione Europea

Sviluppi dei mercati principali nel 2015

- **12.800 MW Nuove installazioni**
- **141.578 MW Potenza totale installata**
- **74.000 Turbine**
- **11,4% Domanda di energia elettrica coperta dall'eolico**
- **255000 Persone occupate nel settore eolico**
- **Leader produttori turbine: Enercon, Senvion, Vestas, GE Renewable Energy, Siemens, Nordex, Gamesa, MHI Vestas**



Sistema elettrico di un parco eolico offshore

Sezioni principali

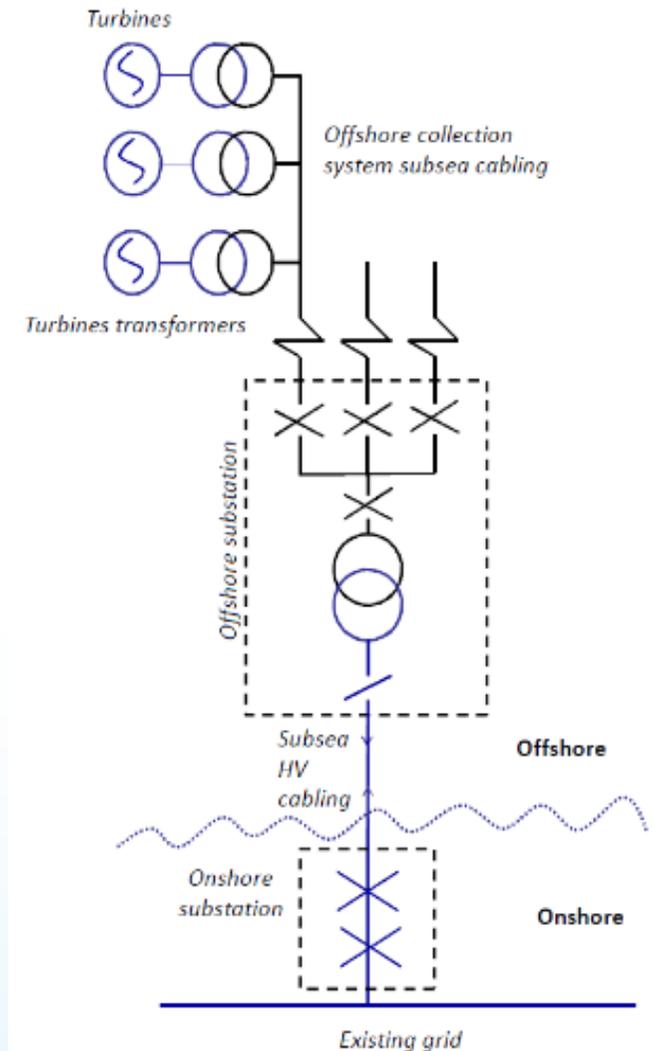
Il sistema elettrico di un parco eolico può essere diviso in 4 sezioni principali:

- ***Sistema di generazione** dell'energia elettrica tramite captazione dell'energia eolica e sua trasformazione in meccanica e, poi, in elettrica*
- ***Sistema di collezione** in alcuni centri o posizioni del campo eolico dell'energia elettrica generata all'interno del parco*
- ***Sistema di trasmissione** dell'energia alla rete a terra*
- ***Sistema di connessione** alla rete elettrica*

Sistema elettrico di un parco eolico offshore

Componenti

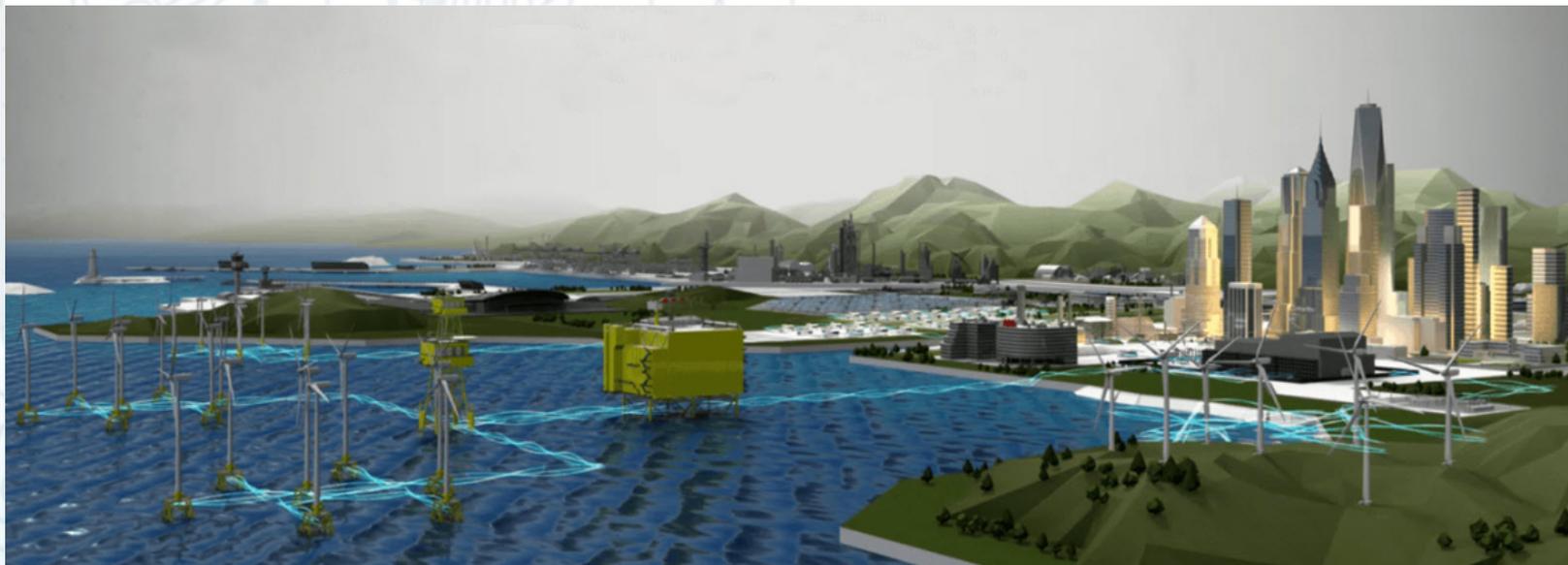
- **Generatore della turbina eolica**
- **Sistema offshore di connessioni fra le turbine**
- **Sottostazione offshore**
- **Sistema di trasmissione offshore – onshore**
- **Sottostazione onshore e cablaggi onshore**
- **Connessione alla rete**



Sistema elettrico di un parco eolico offshore

Elementi chiave

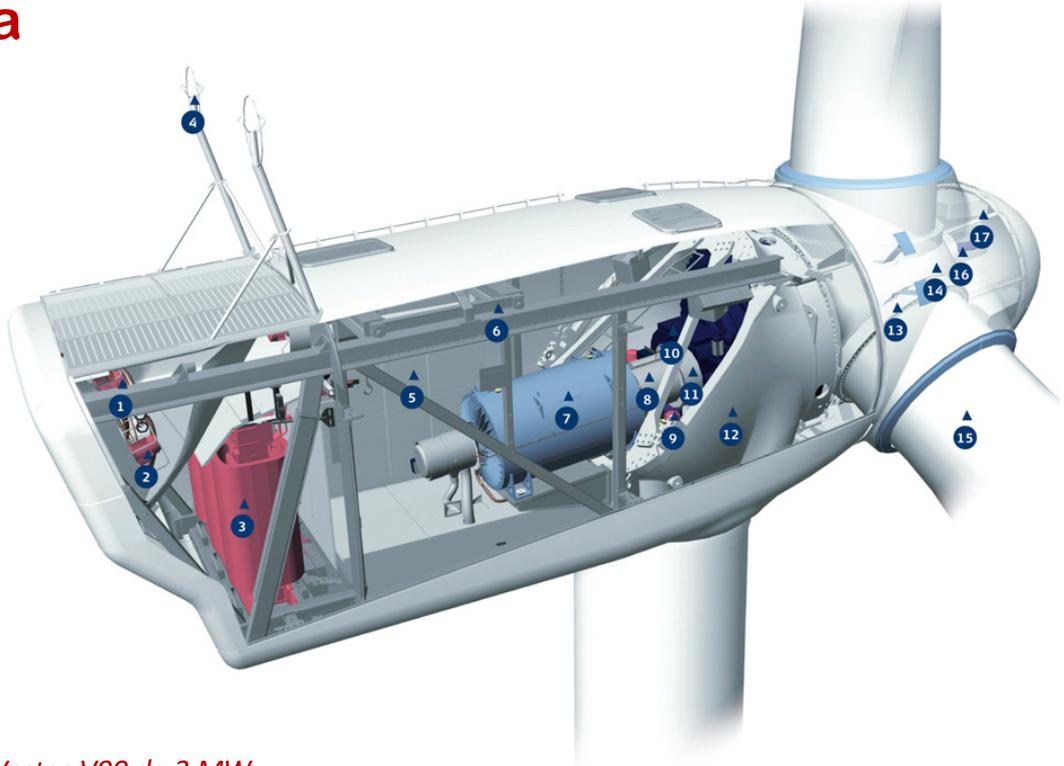
- *Generatore della turbina eolica*
- *Trasmissione offshore – onshore*
- *Sistema offshore di connessioni fra le turbine*
- *Sottostazione onshore e cablaggi onshore*
- *Sottostazione offshore*
- *Connessione alla rete*



Sistema di generazione dell'energia elettrica

Generatore della turbina eolica

Tipicamente i generatori elettrici sono caratterizzati da una tensione di 690 V e grazie ad un trasformatore elevatore, posizionato nella navicella o alla base della torre, la tensione è innalzata sino a 30 kV



Vestas V90 da 3 MW

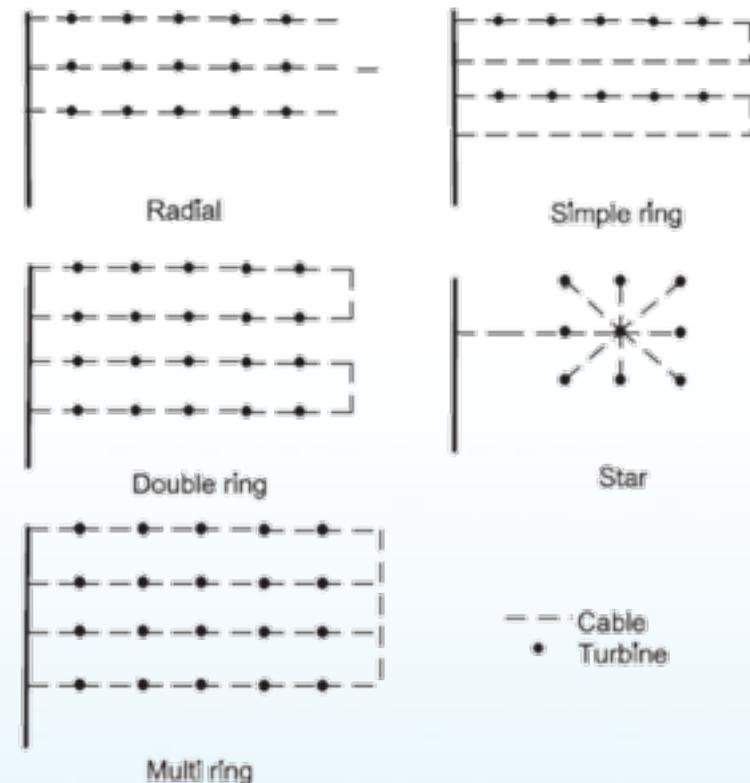
- | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|
| 1 Oil cooler | 6 Service crane | 11 Mechanical disc brake | 16 Pitch cylinder |
| 2 Water cooler for generator | 7 OptiSpeed® generator | 12 Machine foundation | 17 Hub controller |
| 3 High voltage transformer | 8 Composite disc coupling | 13 Blade bearing | |
| 4 Ultrasonic wind sensors | 9 Yaw gears | 14 Blade hub | |
| 5 VMP-Top controller with converter | 10 Gearbox | 15 Blade | |

Sistema di collezione dell'energia elettrica

Layout elettrico

In tabella sono riportati alcune caratteristiche delle varie configurazioni riferite alla configurazione radial

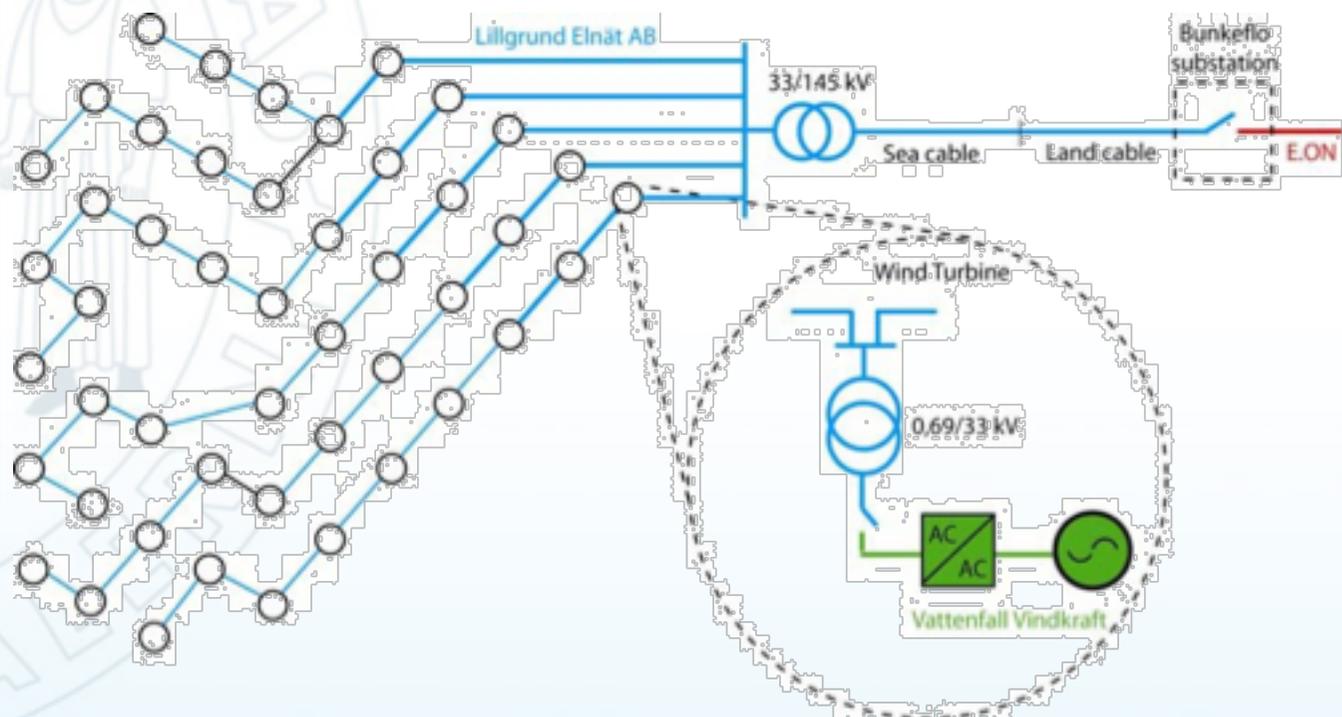
Type	Investment Cost (%)	Losses (%)
Radial	100	100
Single-side ring	210	54
Double-side ring	158	81
Star	97	101
Multi ring	118	76



Sistema di collezione dell'energia elettrica

Layout elettrico

La configurazione ottimale dei **collegamenti delle turbine** è normalmente un ibrido delle configurazioni precedenti, ottenuta **minimizzando i costi e le perdite di energia**



Schema con trasmissione a terra in AT (Source : Lilgrund)

Sistema di collezione dell'energia elettrica

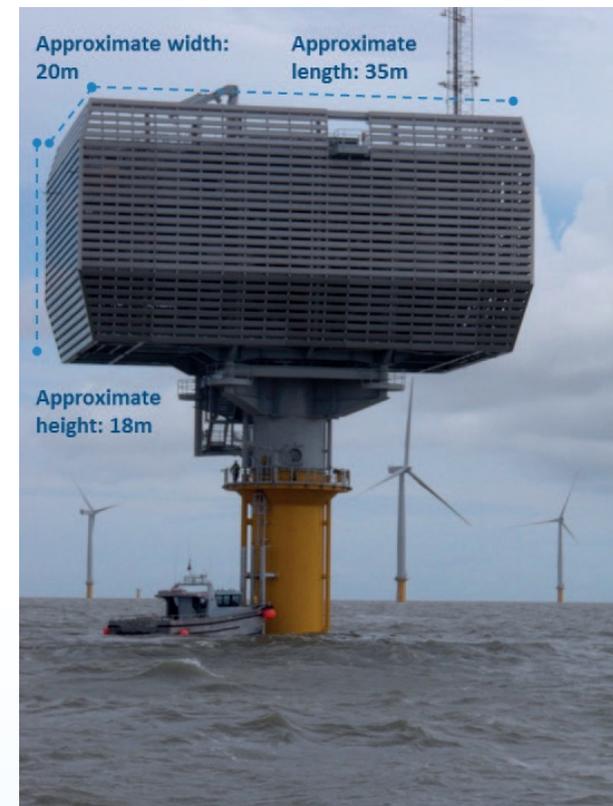
Sottostazione offshore

Consente di:

- Incrementare la tensione fino a 100-220 kV
- Ridurre le perdite energetiche nella trasmissione
- Ridurre i circuiti alla costa (subsea cables)

Non risultano necessarie se:

- Il progetto è piccolo (sotto i 100 MW)
- La distanza dalla costa è bassa (meno di 15 km)
- La connessione della rete è alla collection voltage



Esempio di Sottostazione AC offshore (170 MW) - Gunfleet Sands Offshore Wind Farm (Source : Royal HaskoningDHV)

TN x l'energia elettrica

Introduzione

*Una volta generata in mare aperto, l'energia elettrica deve essere **trasportata** dai cavi sottomarini verso la costa e poi attraverso cavi interrati o linee aeree al punto di connessione più vicino con il sistema di trasmissione nazionale*

Le principali tecnologie di trasmissione alla costa sono:

- ***HVAC** – High Voltage Alternating Current*
- ***HVDC** – High Voltage Direct Current*

Sistema elettrico di un parco eolico offshore

Introduzione

La trasmissione sottomarina costituisce un aspetto fondamentale, in quanto:

- *poche aziende costruiscono i cavi sottomarini*
- *i tempi di fabbricazione sono lunghi*
- *le navi posacavo sono poche, molto costose e molto richieste*



TN x l'energia elettrica

Possibili scenari

I possibili scenari di progettazione delle infrastrutture dipendono:

- *dalla **posizione** della sottostazione onshore rispetto alle sottostazioni offshore*
- *dalla **complessità** della sottostazione onshore*
- *dalla **distanza** del sito dalla costa*
- *dalla **potenza installata***
- *dal metodo utilizzato per **trasmettere** l'energia dal mare aperto a riva*

TN x l'energia elettrica

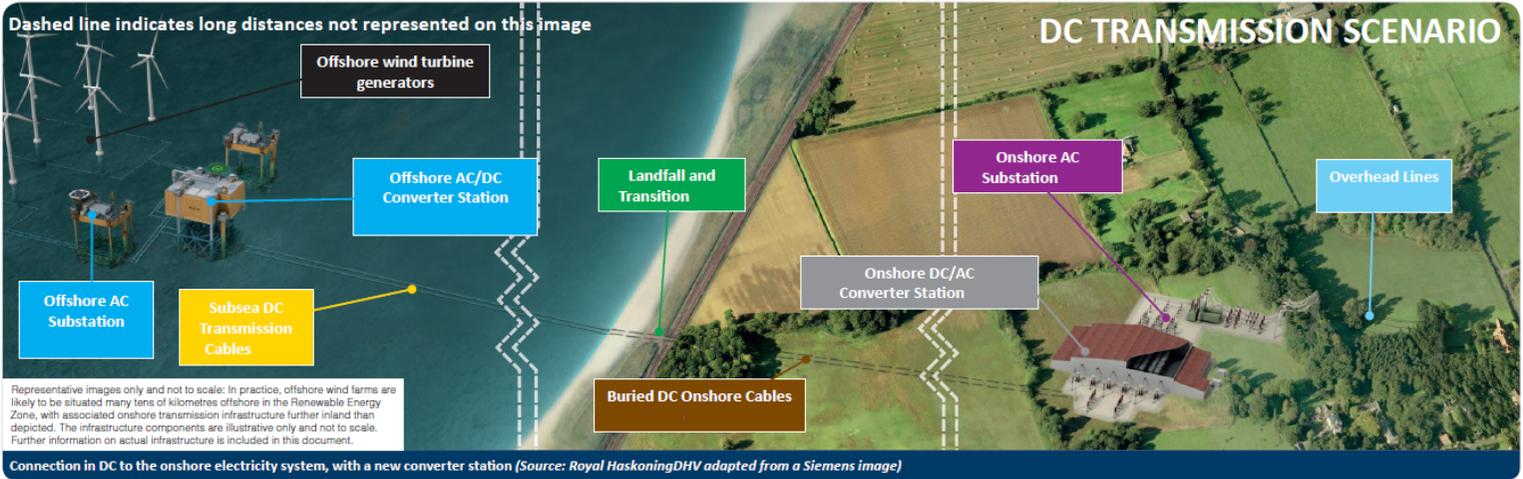
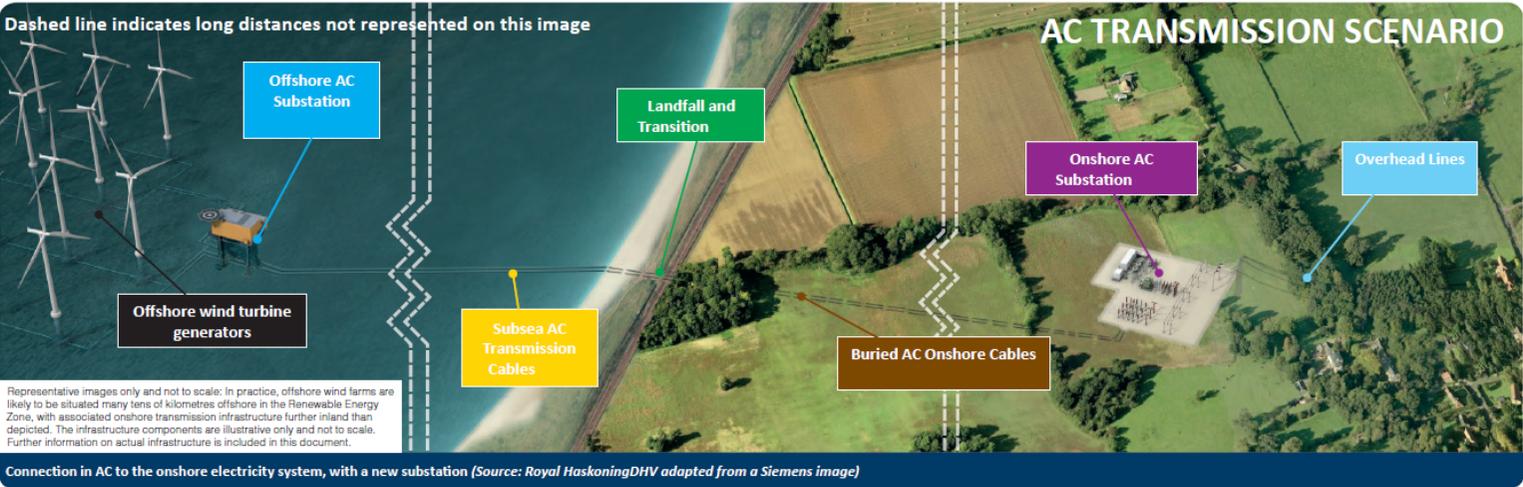
Scenari

Alcuni possibili scenari sono:

- **A** – Collegamento diretto alla sottostazione onshore del TSO (AC)
- **B1 e B2** – Collegamento alla sottostazione onshore del TSO con una nuova sottostazione vicina (AC o DC)
- **C1 e C2** – Collegamento alla sottostazione onshore del TSO con una nuova sottostazione separata (AC o DC)
- **D1 e D2** – Collegamento alla linea aerea onshore esistente del TSO (Tee-connection) con una nuova sottostazione separata (AC o DC)

TN x l'energia elettrica

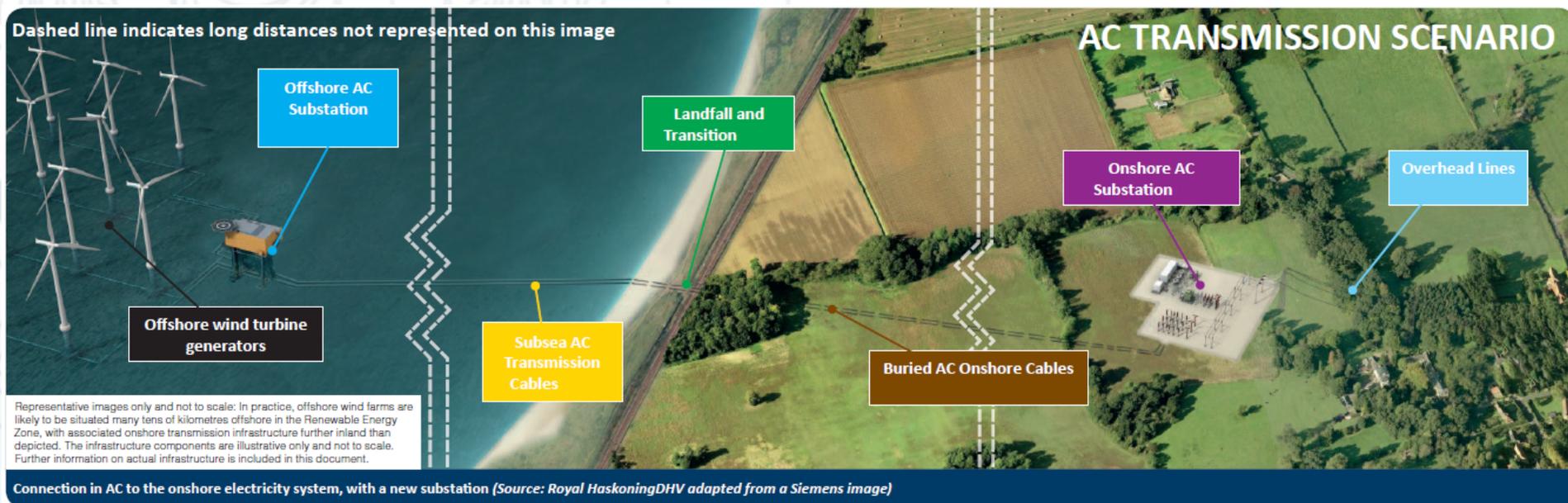
Possibili scenari: HVAC (B1) e HVDC (B2)



TN x l'energia elettrica

Scenario HVAC (B1)

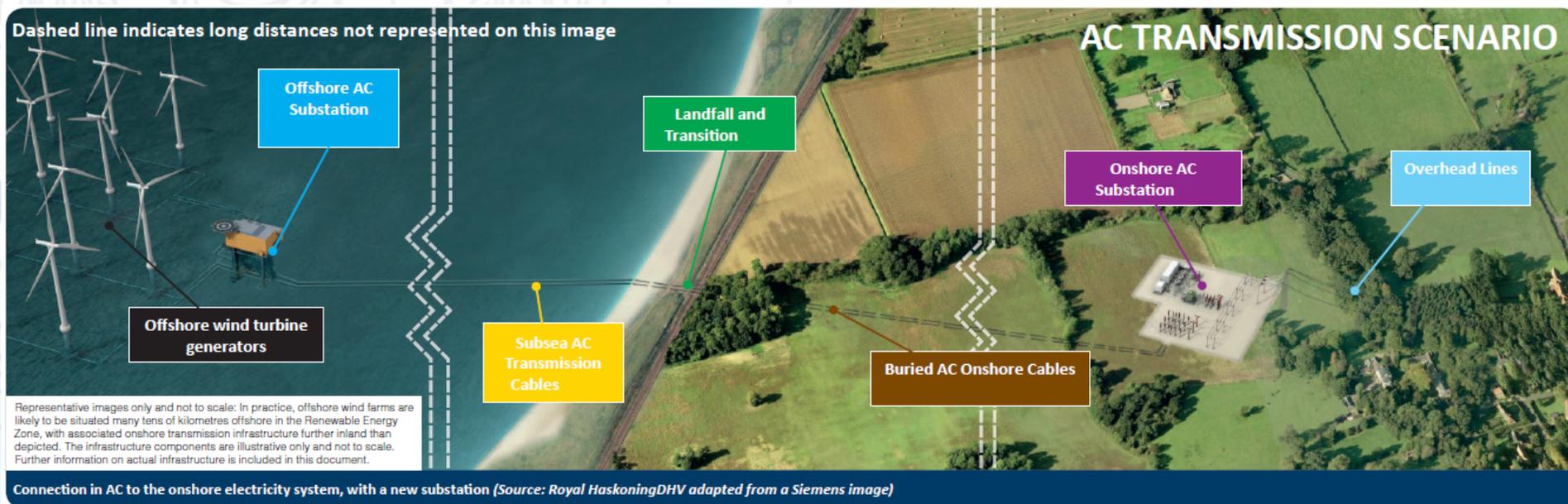
- *Un collettore di energia elettrica AC presso il parco eolico*
- *Una sottostazione di trasformazione offshore, con eventuale sistema di compensazione di potenza reattiva. Al crescere della lunghezza della linea la compensazione diventa necessaria*



TN x l'energia elettrica

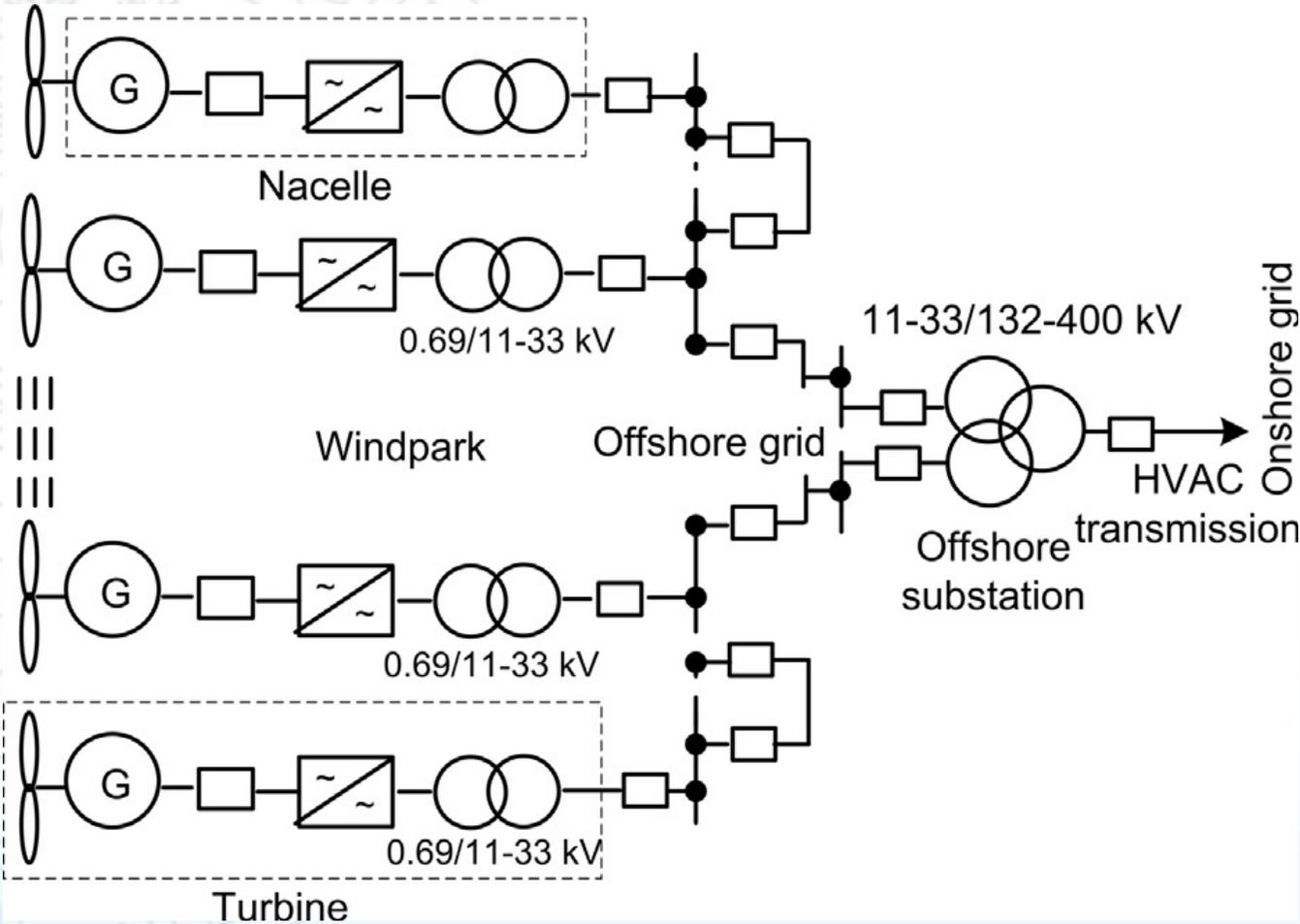
Scenario HVAC (B1)

- **Linea di trasmissione trifase.** Per tensioni di 150 kV si usano cavi a tre conduttori isolati (uno per fase). Per altissime tensioni (400 kV) invece si usano tre cavi disgiunti
- **Stazione di trasformazione onshore** che porta la tensione al livello della rete presente. È compresa un'unità di compensazione



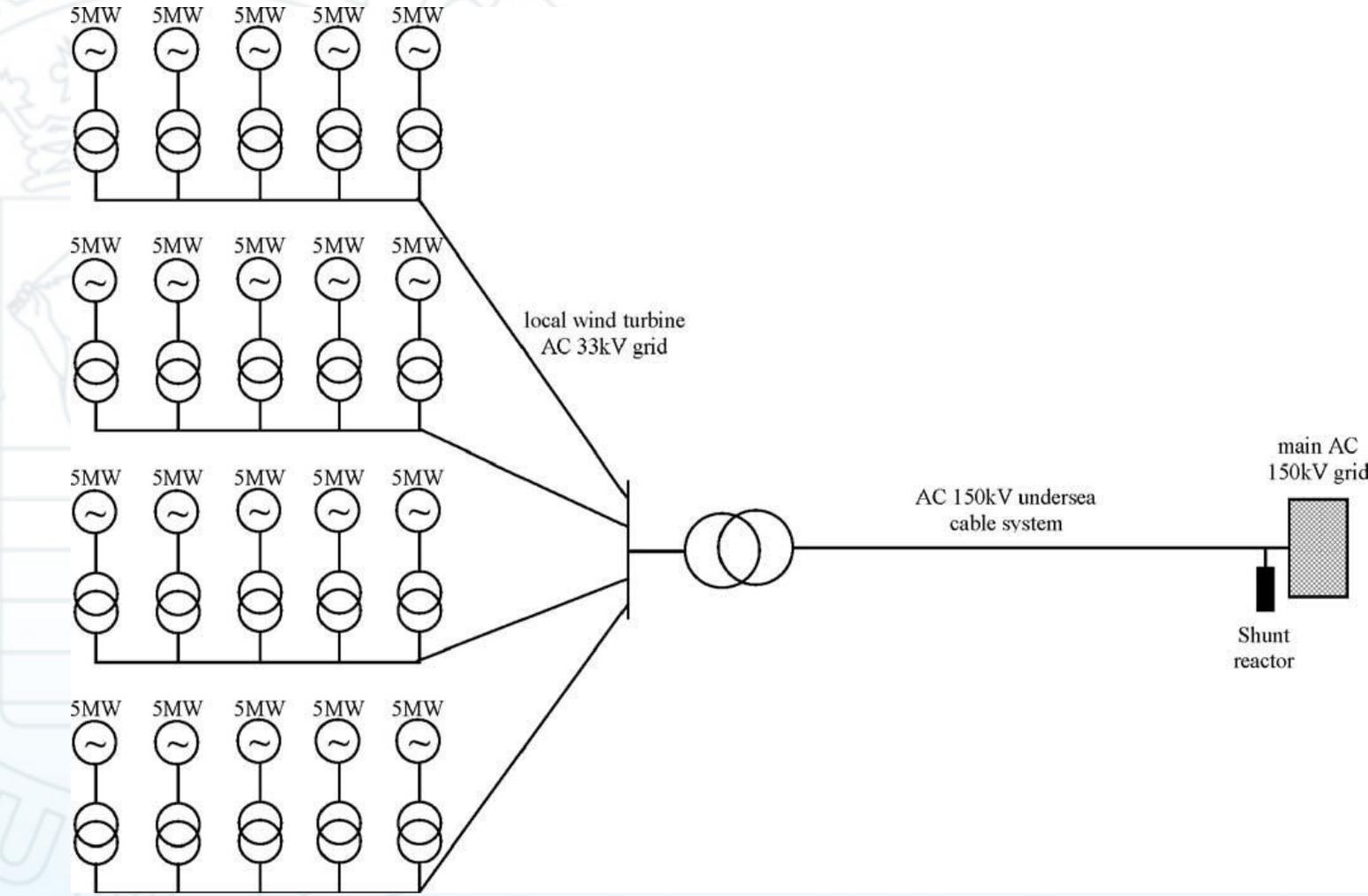
TN x l'energia elettrica

Scenario HVAC (B1)



TN x l'energia elettrica

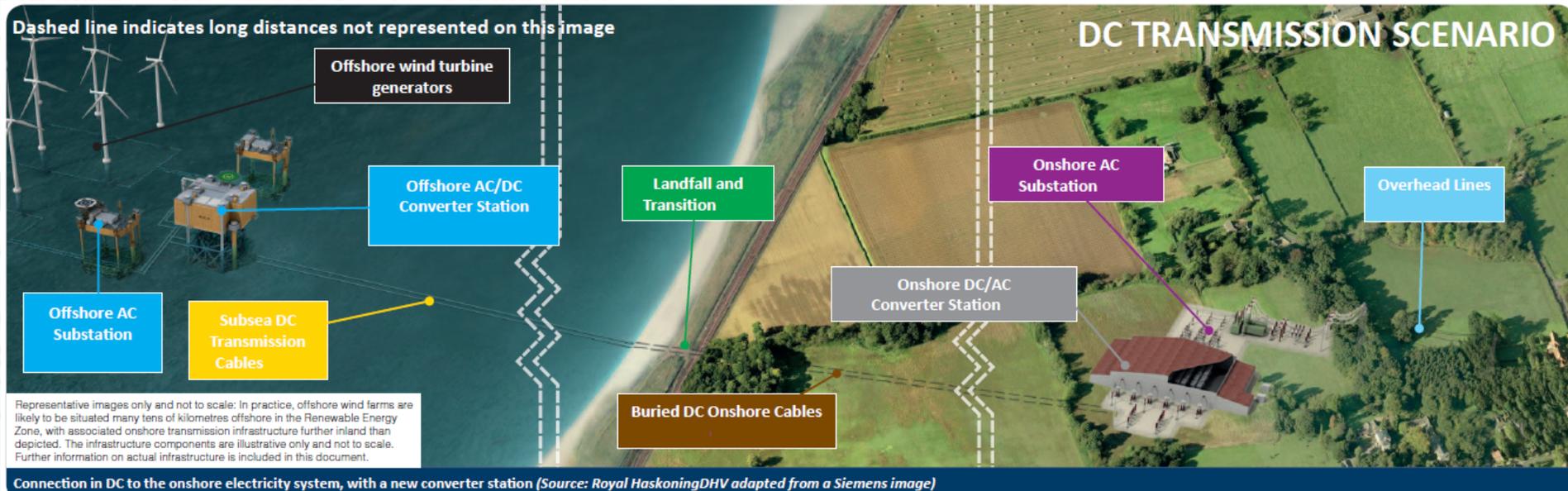
Scenario HVAC (B1)



TN x l'energia elettrica

Scenario HVDC (B2)

- *Un collettore di energia elettrica AC presso il parco eolico*
- *Una sottostazione di trasformazione offshore*
- *Una stazione di conversione AC/DC offshore*

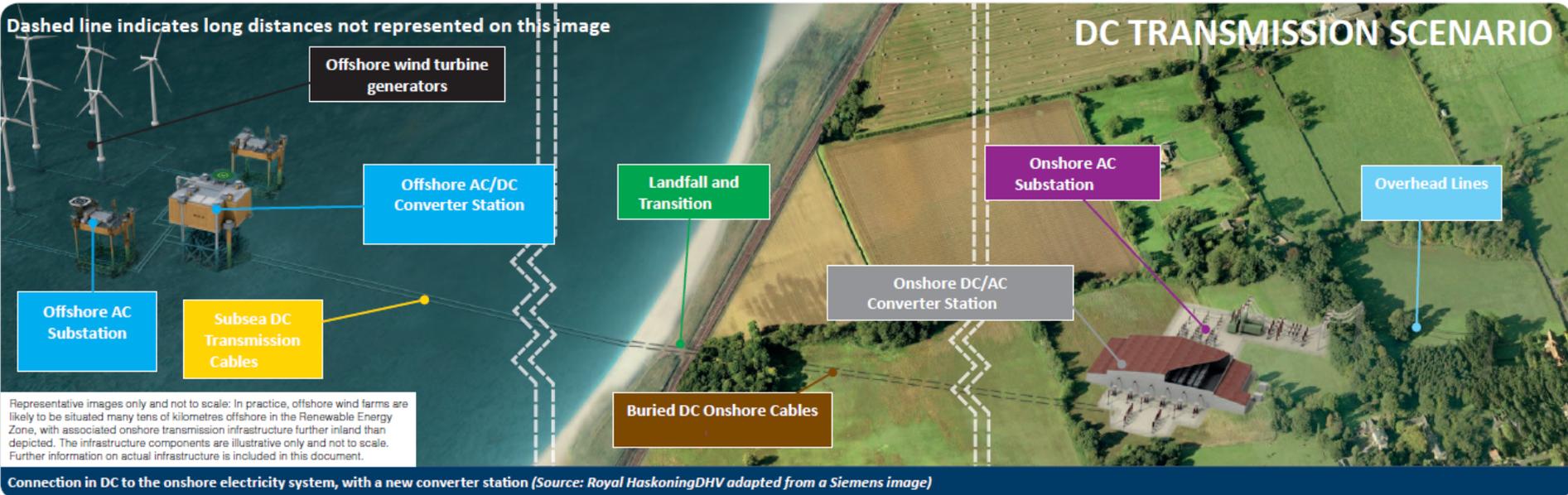


TN x l'energia elettrica

Scenario HVDC (B2)

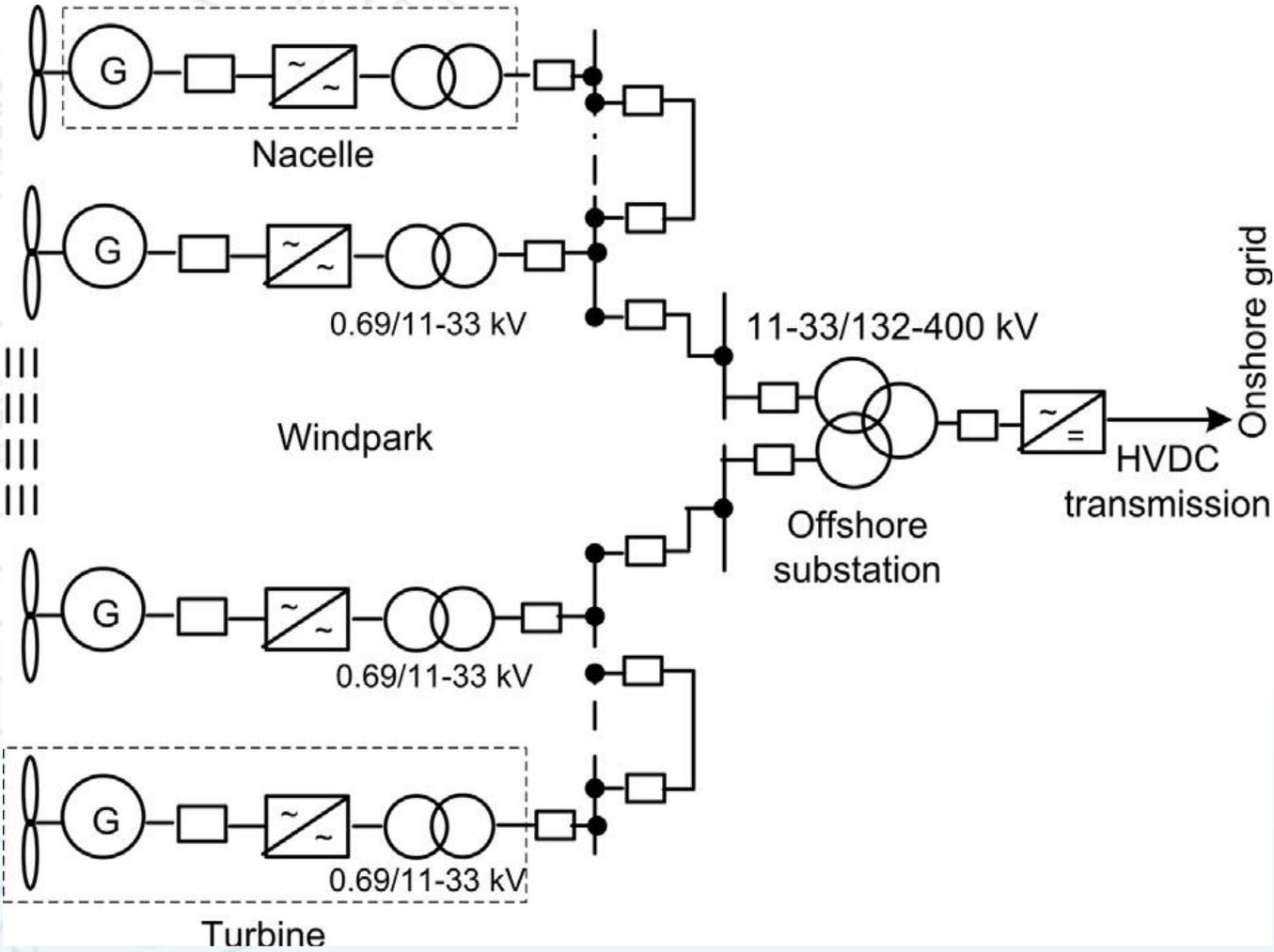
- *Linea di trasmissione fino alla costa con Cavi DC*
- *Una stazione di conversione DC/AC e di trasformazione onshore che porta la tensione al livello della rete presente*

Si noti che le sottostazioni offshore sono 3 volte più grandi rispetto alle HVAC



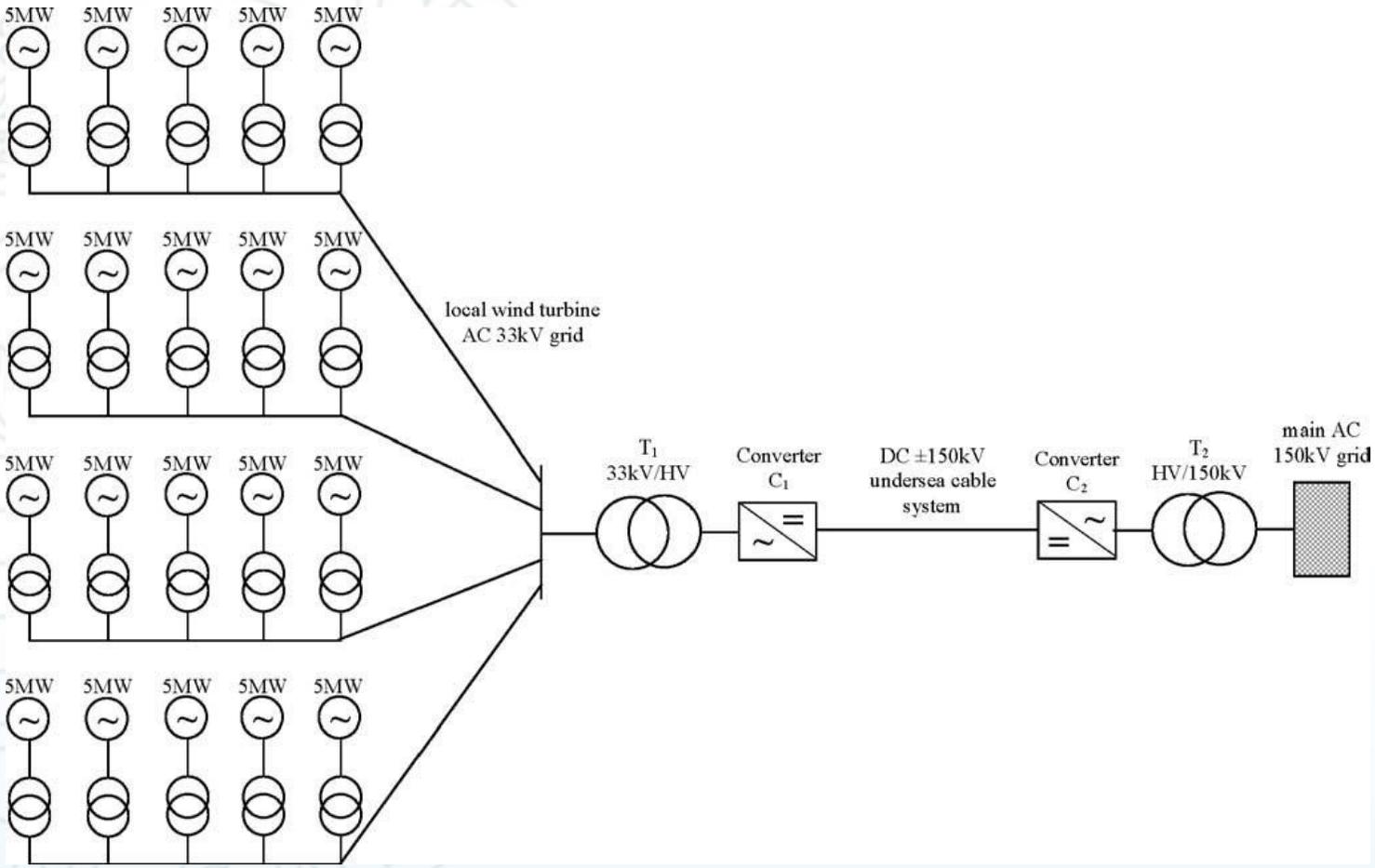
TN x l'energia elettrica

Scenario HVDC (B2)



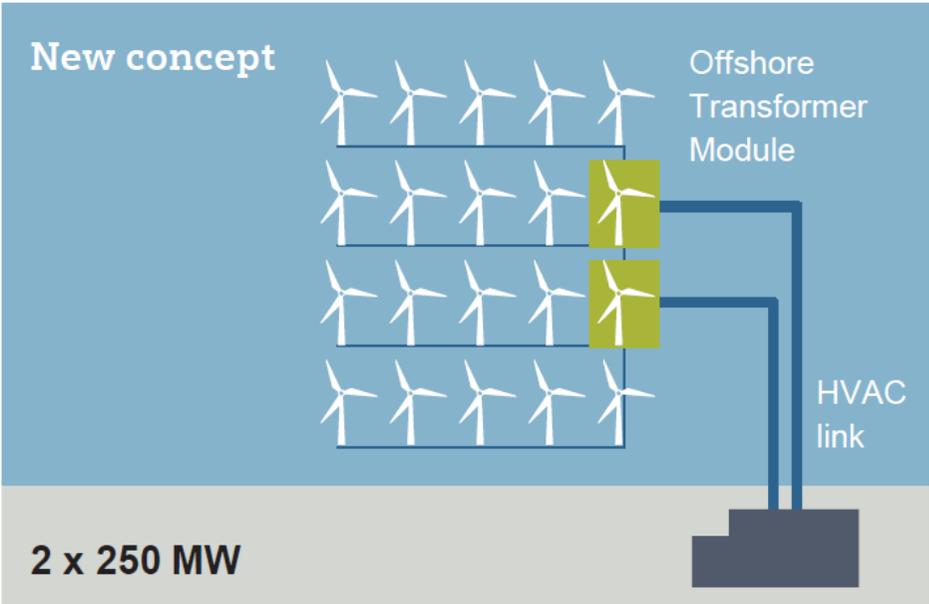
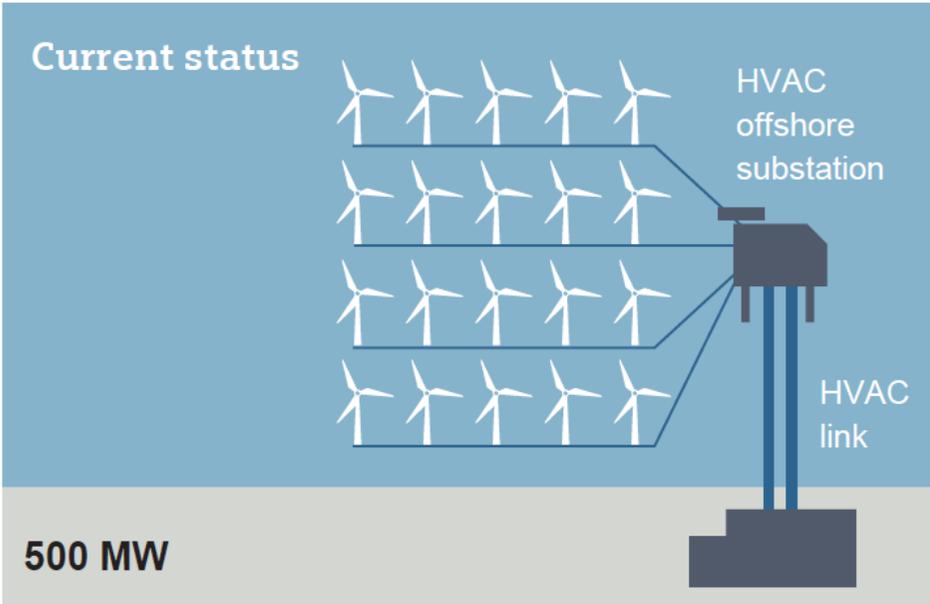
TN x l'energia elettrica

Scenario HVDC (B2)



TN x l'energia elettrica

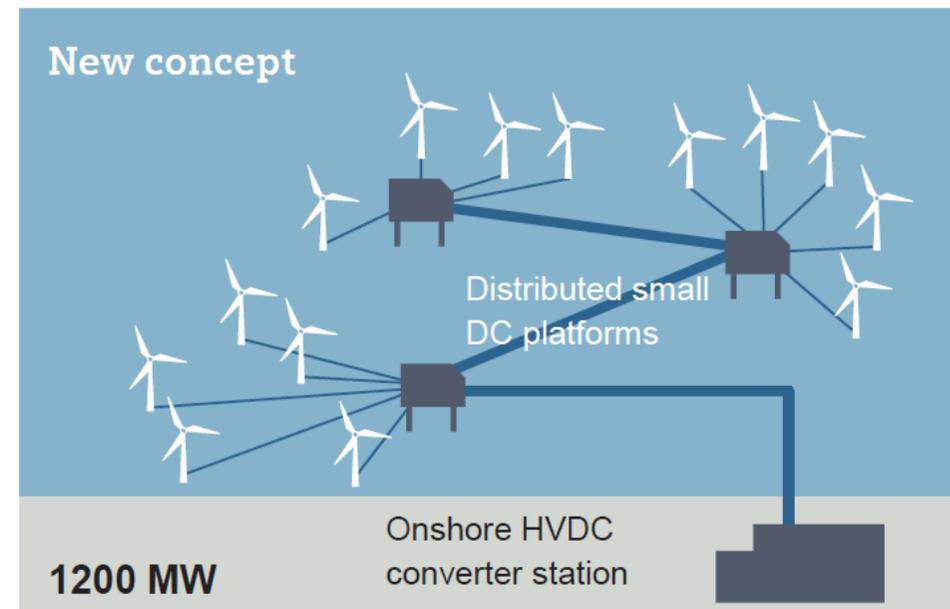
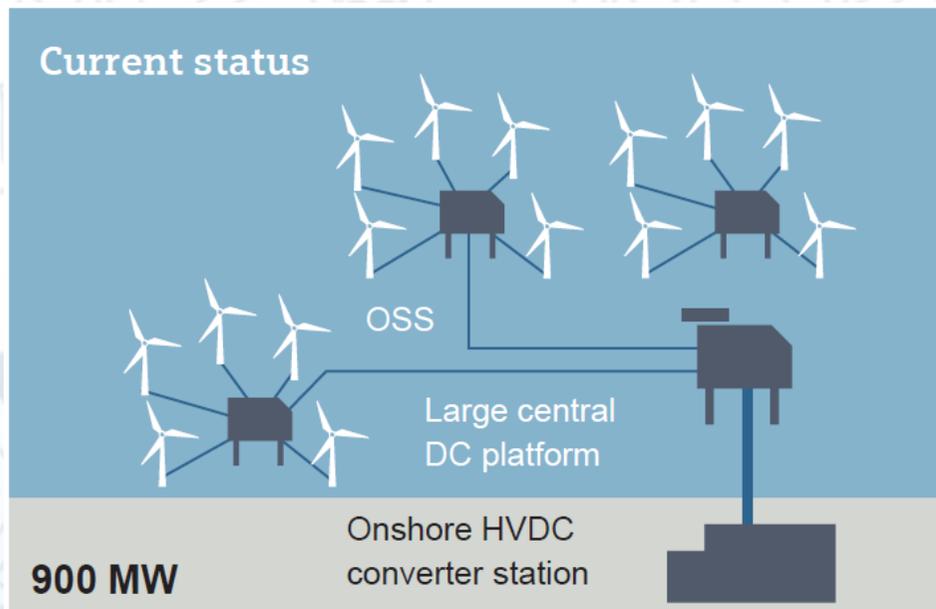
Nuova tipologia di accesso alla rete HVAC



Nuova tipologia di accesso alla rete HVAC (Source : Siemens)

TN x l'energia elettrica

Nuova tipologia di accesso alla rete HVDC



Nuova tipologia di accesso alla rete HVDC (Source : Siemens)

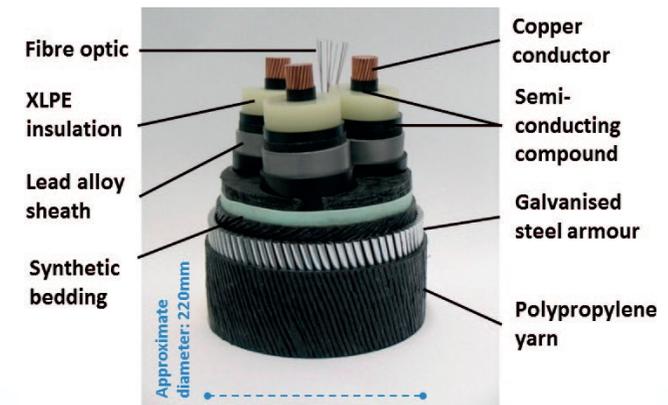
TN x l'energia elettrica

Componenti HVAC

Per trasmettere **potenze elettriche trifase** si ricorre a **cavo unico con tre conduttori**. Ognuno per una delle **tre fasi** con isolamento singolarmente realizzato, pur **assiemandoli per dar luogo ad un cavo solo**. Questa soluzione è la più diffusa per i trasferimenti di potenza via cavi sottomarini

Crescendo la potenza la soluzione di inserire i tre conduttori in un cavo unico (**single core**) viene sostituita da quella con tre corpi separati (**three core**), ognuno dei quali è predisposto per una delle tre fasi ed è dotato dell'isolamento necessario

Con questo arrangement ai conduttori singoli se ne aggiunge uno ulteriore, che è analogo agli altri e che funge da **riserva** per intervenire in caso di interruzione del servizio su uno

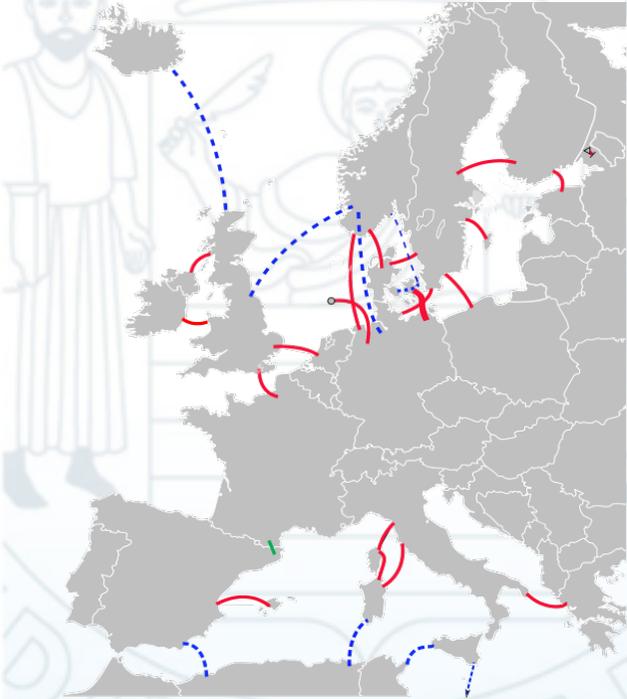


Cavo sottomarino AC (220 kV)
(Source : Prysmian Group)

TN x l'energia elettrica

Componenti HVDC

Per trasmettere potenze elettriche in DC

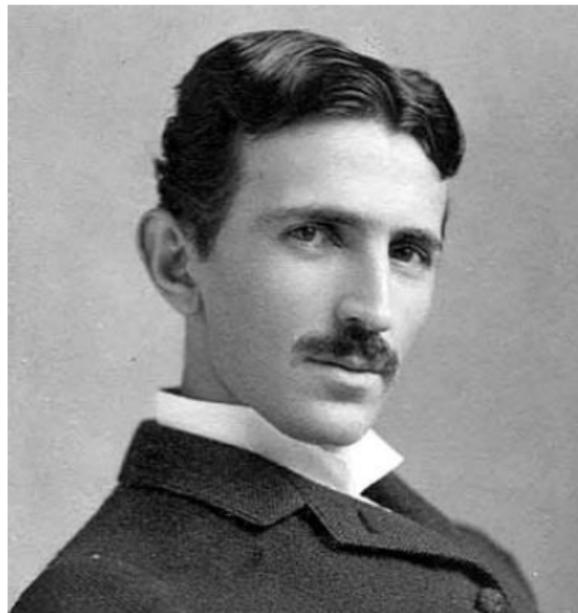


Cavo sottomarino DC (220 kV)
(Source : Prysmian Group)

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

HVAC o HVDC ?

*La **potenza efficace** che può essere trasmessa dalla linea, a parità di sezione di conduttore e di tipologia di isolamento, in un sistema **DC** è **1,4** volte la **potenza** di un analogo sistema in **AC**. Utilizza inoltre meno conduttori ma necessita di convertitori. Le perdite reattive solo solo in **AC***



Nikola Tesla sostenitore della corrente alternata, mentre Thomas Edison sostenitore della corrente continua, in una rivalità storica

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

HVAC o HVDC ?

Dunque, fissata la potenza, il **sistema AC** richiede più **conduttori**, più **isolamento** e di conseguenza un **maggior costo**, ma **trasformatori ed interruttori costano molto di meno**.

Per **brevi distanze** il costo degli equipaggiamenti supera il risparmio sui costi di linea, rendendo i **sistemi AC** più vantaggiosi

Su **lunghe distanze** il costo differenziale sulla linea incomincia a diventare significativo, rendendo i **sistemi DC** economicamente vantaggiosi

→ HVAC 😊 HVDC 😞

→ HVAC 😞 HVDC 😊

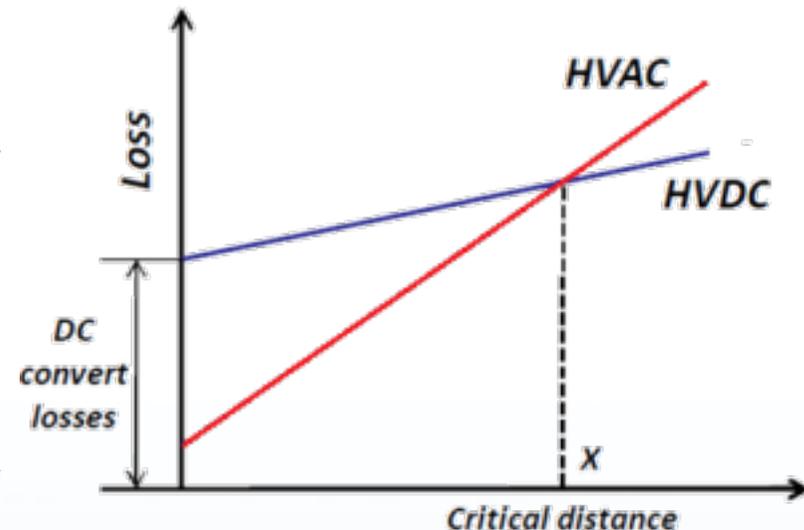
Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

HVAC o HVDC ?

*La **distanza critica** a cui il sistema **HVDC** risulta più conveniente rispetto a quello **HVAC** è compresa tra i **50 – 80 km***

La maggioranza delle wind farm offshore, attualmente installate, sono posizionate nei pressi dei profili costieri, cosicché la scelta del cavo è soltanto legata alla tensione

*Progetti che spostano i siti delle wind farm offshore lontano dalle coste o punti di connessione alla rete molto distanti dal punto di approdo, rendono la soluzione **HVDC** più vantaggiosa*



Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

HVAC o HVDC ?

Dunque la scelta deve essere valutata caso per caso. Il tipo di cavo per l'interconnessione tra la wind farm e punto di atterraggio (export cable) dipende da diversi fattori, come:

- ***Configurazione / dimensione del parco a mare***
- ***Distribuzione elettrica all'interno del sito***
- ***Presenza di nodi di raccolta e sottostazioni a mare***
- ***Caratteristiche della rete elettrica a cui collegarsi***

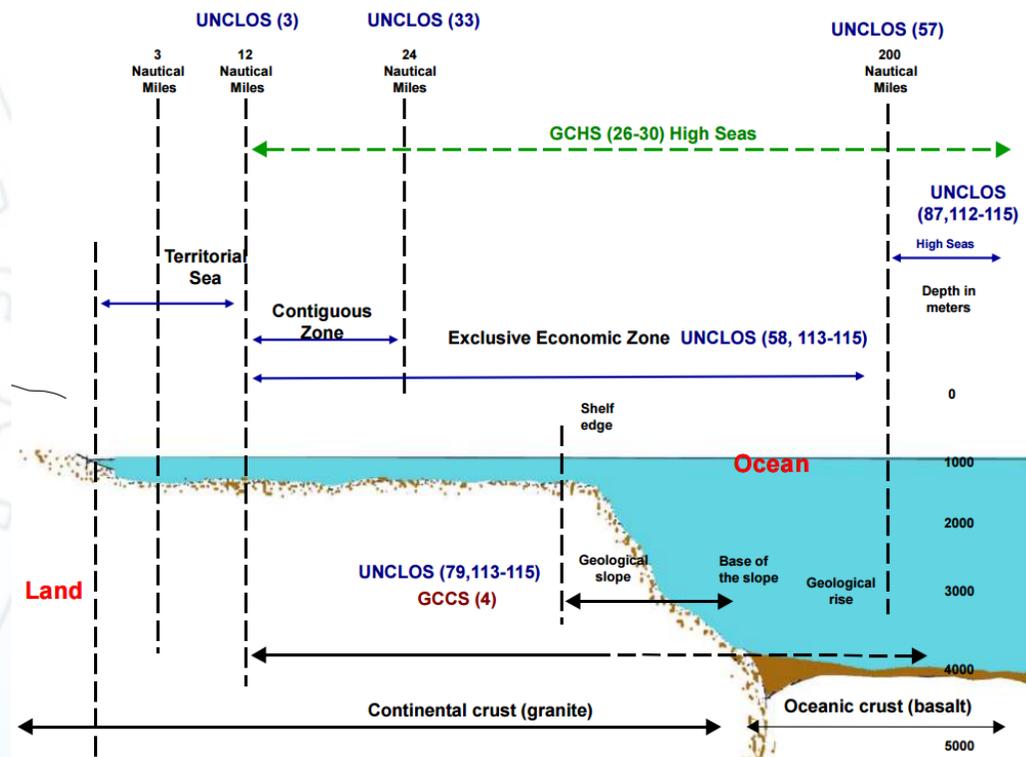
*Avere un solo cavo ad **AT** può essere preferibile se è stata realizzata una Sottostazione nel campo; avere più cavi a **MT** (30/33 kV) è utile quando, ad es., la distanza da coprire per raggiungere la costa sia bassa e la quantità di energia elettrica da trasferire non è elevatissima*

A mano a mano che la tecnologia HVDC migliora, questa offerta tecnica potrebbe diventare consigliabile per molti progetti ad eccezione di quelli di piccole/medie dimensioni e/o vicini alla costa

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Posa dei cavi sottomarini – Trattati e convenzioni

- *International Convention for Protection of Submarine Cables – 1884*
- *Geneva Conventions of the Continental Shelf and High Seas – 1958*
- *United Nations Convention on Law of the Sea (UNCLOS) – testo ONU del 1982*



Confini legali delle aree estendenti dal Mare Territoriale alla Zona Economica Esclusiva (EEZ) ed all'Alto Mare. I numeri tra parentesi si riferiscono agli articoli del trattato UNCLOS (Source: Doug Burnett)

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Posa dei cavi sottomarini – Regole di comportamento

- *Libertà di posare, interrare, mantenere e riparare cavi al di fuori della fascia di 12 mil, corrispondente alle acque territoriali*
- *obblighi ai vari Stati di definire l'utilità di siffatte realizzazioni e di determinare **sanzioni** (civili e penali) contro danni provocati intenzionalmente o preterintenzionalmente ai cavi posti in opera*
- *uno **speciale statuto** per i mezzi navali, che devono essere impiegati, sia per la posa, sia per la difesa o la manutenzione dei cavi*
- ***indennizzi** per le azioni provocate (proditoriamente od accidentalmente) da mezzi navali con ancoraggi, pesca od altro contro cavi posati o interrati*
- *rispetto e interventi atti a predisporre ogni azione tecnologicamente adeguata nell'attraversamento di cavi/tubazioni preesistenti ed a procedere ad azioni correttive/riparazioni (anche in denaro) per danni prodottisi*
- *possibilità di adire a tribunali nazionali/internazionali in forza di trattati e convenzioni riconosciute*

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Posa dei cavi sottomarini – Giurisdizione ed autorizzazioni

Per i cavi al servizio di campi eolici a mare o di altre applicazioni di energie alternative sono sottoposti alla giurisdizione esclusiva della nazione costiera.

*Sebbene non siano obbligatori i permessi da parte dello Stato costiero verso chi provvede a installare ed a mantenere un cavo sottomarino, che serve per la trasmissione dell'energia elettrica e che sia impostato su fondali all'esterno delle acque territoriali, tali **autorizzazioni** diventano, invece, **necessarie** se il cavo sottomarino serve per **trasportare energia elettrica generata da moto ondoso, da correnti marine e da vento.***

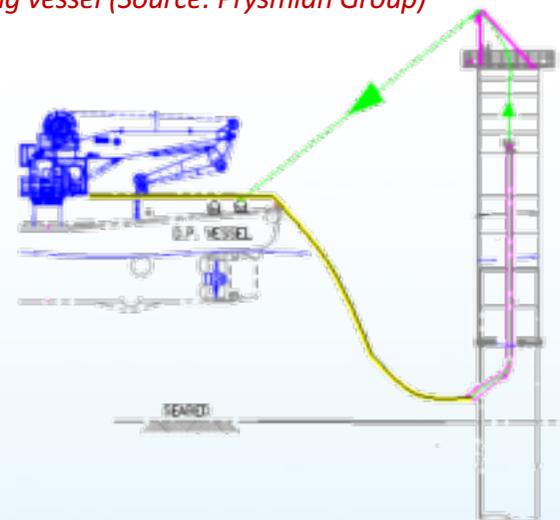
Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Posa dei cavi sottomarini – Criteri per l'interramento

I cavi sottomarini di collegamento delle turbine vengono posati ed interrati per circa 1 m sul fondale in modo da evitare eventuali danneggiamenti dovuti ad ancore o reti da pesca. Nell'area portuale, il cavo, viene caricato su di un pontone di servizio o su di un'apposita imbarcazione posacavi. Giunti in prossimità della turbina, il cavo viene srotolato verso il fondo e la sua estremità viene guidata all'interno del tubo a J, con l'ausilio di un sommozzatore e quindi inserita nella cassetta di terminazione.



Cable-laying vessel (Source: Prysmian Group)



Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Posa dei cavi sottomarini – Criteri per l'interramento

Terminata l'operazione, il cavo viene guidato nel tracciato stabilito ed interrato allo stesso tempo mediante l'utilizzo di potenti getti d'acqua.

*A questo scopo si può utilizzare un veicolo robotizzato comandato a distanza (**Remotely Operated Vehicle**) che entra in azione dopo che il cavo è stato posato sul fondo del mare (**ROV System**); il veicolo, che si muove sul fondale marino su ruote oppure su cingoli speciali, è dotato di particolari bracci muniti di ugelli che possono essere opportunamente orientati al fine di smuovere il fondale marino sottostante il cavo in maniera da creare una trincea, della profondità desiderata, nella quale il cavo medesimo viene ad adagiarsi.*



*Cable trenching ROV prior to deployment
(Source: Soil Machine Dynamics Ltd.)*



*ROV Hydroplow adatto a compiti installativi del cavo
(Source: Center Marine)*

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Sottostazioni AC offshore

Piattaforme off-shore che contengono componenti elettrici per collegare un impianto di produzione di energia offshore (ad esempio, più turbine eoliche) alla rete elettrica sulla terraferma o ad una stazione di conversione AC / DC

*Strutturalmente sono simili alle piattaforme petrolifere offshore. Essenzialmente sono costituite da 2 parti principali, la piattaforma (topside), in cui si trova l'attrezzatura principale, e una struttura di fondazione, che è o una struttura **jacket** (reticolare in acciaio) o una struttura **monopile** o una struttura **gravity base***

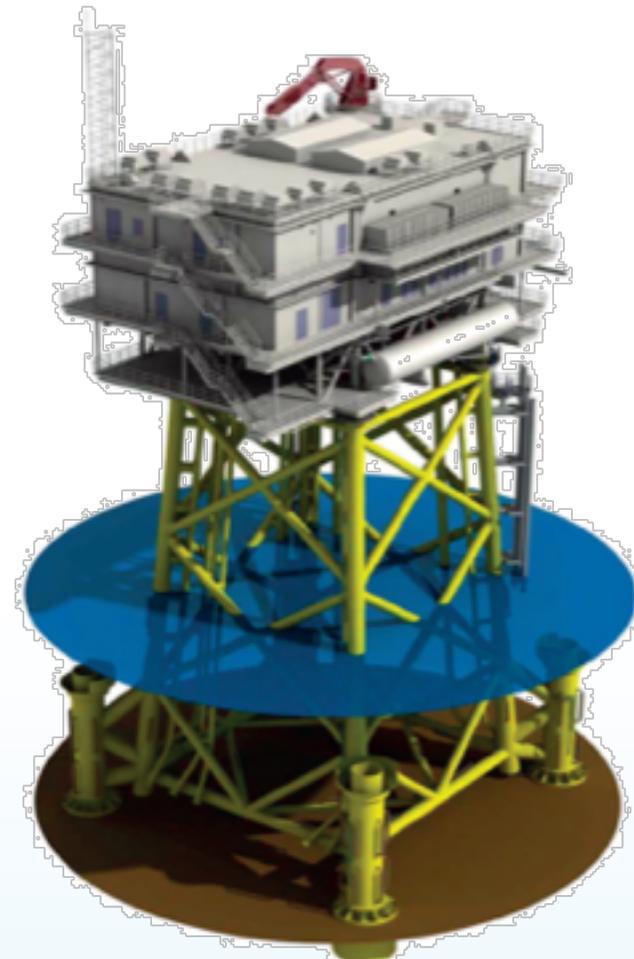


Esempio di Sottostazione AC offshore (170 MW) - Gunfleet Sands Offshore Wind Farm (Source : Royal HaskoningDHV)

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Sottostazioni AC offshore

A seconda del progetto (capacità di generazione, l'area su cui si trova, e la distanza da terra), ci possono essere più di una sottostazione offshore.



*Esempio di Sottostazione AC offshore
(Source : DONG Energy)*

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Sottostazioni AC offshore

Le dimensioni variano a seconda della capacità del parco eolico offshore da collegare. Un esempio di sottostazione AC offshore (300 MW):

- Dimensioni: circa 30m x 30m x 15m (LxWxH)
- Peso totale : 1.250 tonnellate

In generale, le dimensioni delle sottostazioni AC offshore variano nel range - 25% ÷ + 50% di queste dimensioni



Sottostazione AC offshore (300MW) con struttura di fondazione tipo jacket - Thanet Offshore Wind Farm (Source: Royal HaskoningDHV)

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Sottostazioni di conversione AC/DC offshore

Le stazioni di conversione Offshore AC / DC sono piattaforme off-shore simili a sottostazioni AC offshore, con dimensioni anche 3 volte maggiori

Contengono i convertitori di potenza per convertire la potenza generata dalle turbine eoliche da AC in DC, per la trasmissione a riva



Esempio di Sottostazione di conversione offshore (a destra) (Source: TenneT)

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Sottostazioni di conversione AC/DC offshore

Strutturalmente sono simili alle piattaforme petrolifere offshore e delle sottostazioni AC

*Essenzialmente sono costituite da 2 parti principali, la piattaforma (topside), in cui si trova l'attrezzatura principale, e una struttura di fondazione, che è solitamente una struttura reticolare in acciaio, il **jacket**. Le strutture di fondazione **monopile** o **gravity base** sono anche possibili, ma meno probabili, a causa della maggiore dimensione delle stazioni di conversione*

A seconda della capacità di generazione del progetto, ci può essere una stazione di conversione, alimentata da uno o più sottostazioni AC nelle vicinanze



Esempio di Sottostazione di conversione offshore - Borwin Alpha Platform (400MW) (Source: TenneT)

Sistema di trasmissione dell'energia elettrica

Sottostazioni di conversione AC/DC offshore

*Le dimensioni variano a seconda della capacità del parco eolico offshore da collegare. Un esempio, la sottostazione di conversione Offshore **HelWin2 HVDC** da 690 MW:*

- *Dimensioni (topside): 98 m x 42 m x 28 m (LxWxH)*
- *Peso totale : 10.000 ~ 10.500 tonnellate*

[Fonte: Heerema Fabrication Group Website]

Ci sono poche stazioni di conversione offshore in servizio

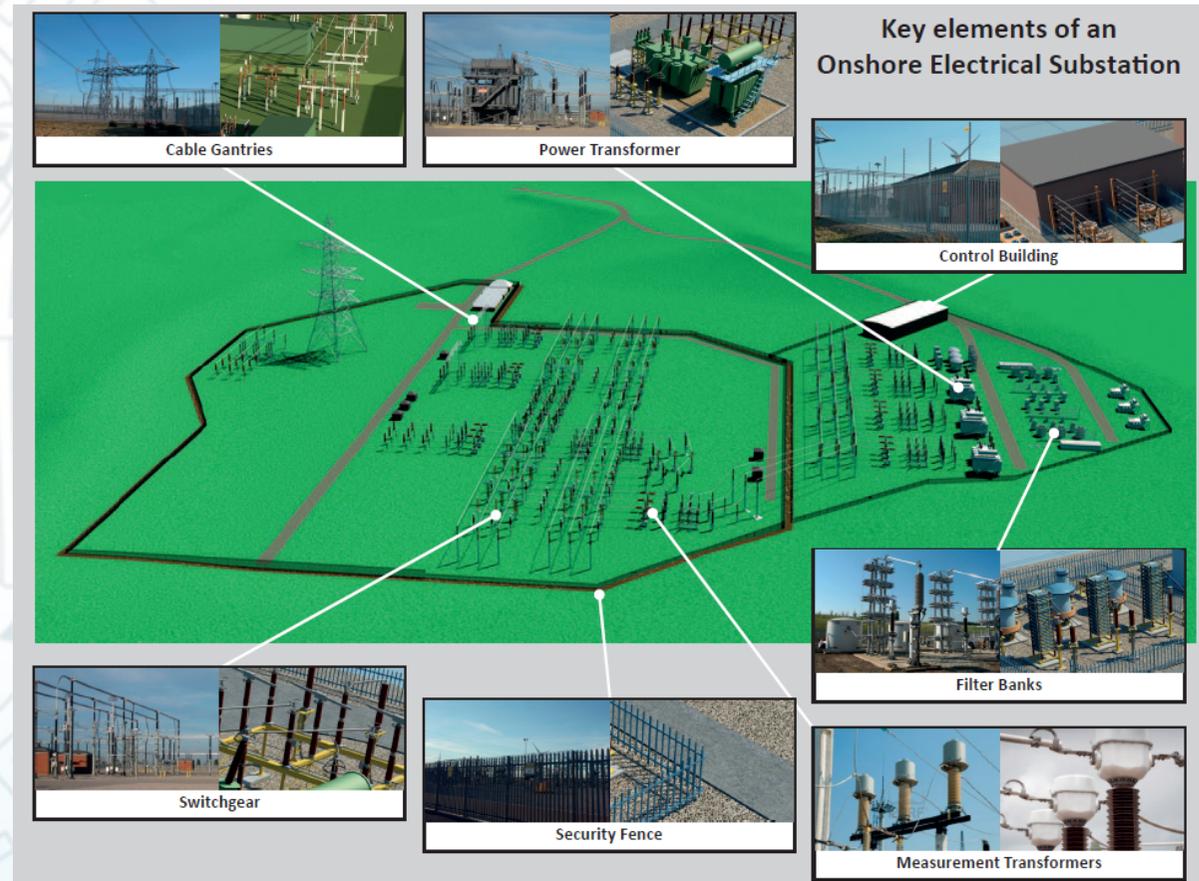


Esempio di Sottostazione di conversione offshore - HelWin2 (690MW) (Source: TenneT)

Sistema di connessione alla rete elettrica

Sottostazioni AC onshore – Elementi chiave

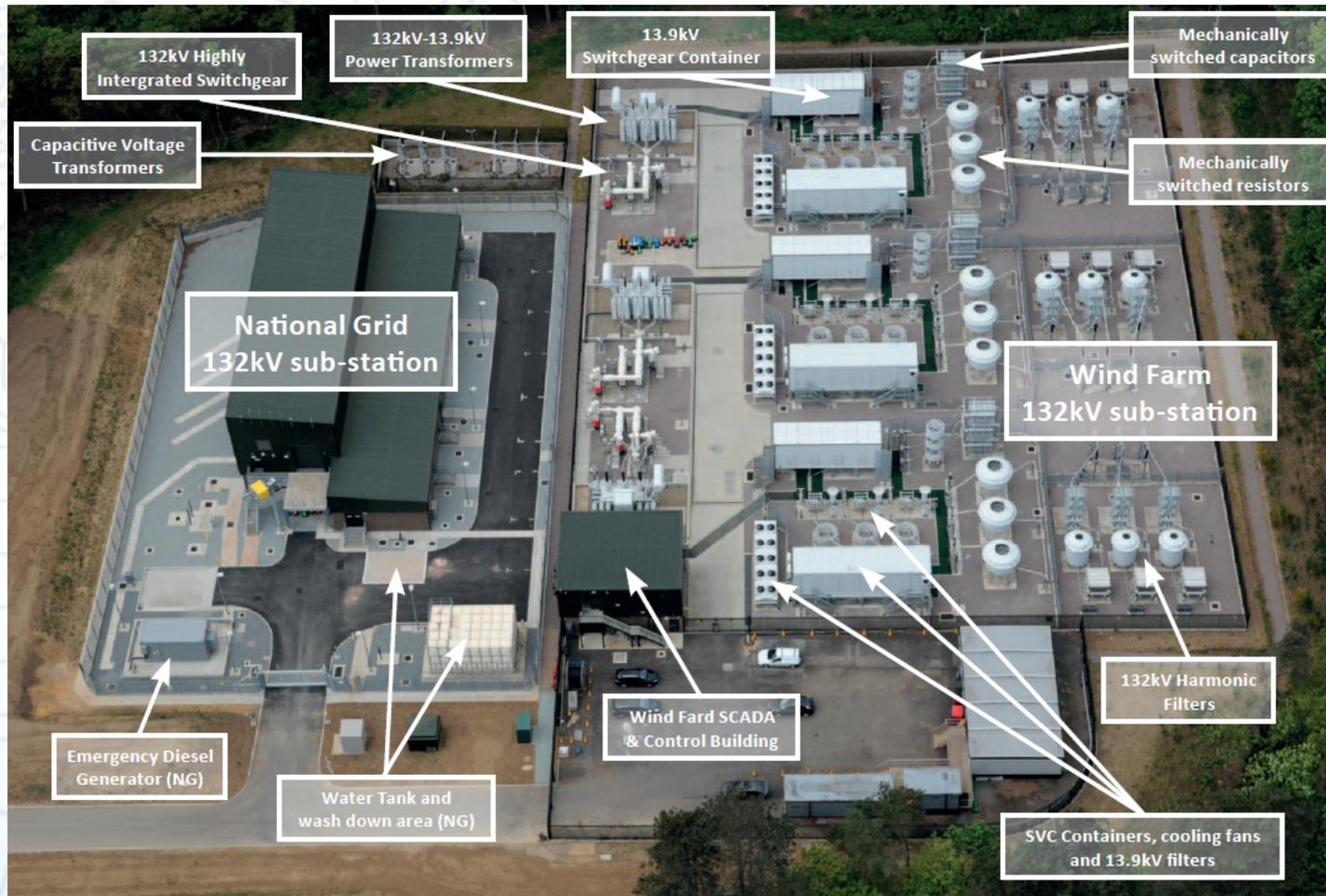
- Cable Gantries
- Switchgear
- Measurement Transformers
- Filter Banks
- Power Trasformers
- Control Building



Source: LDA Design on behalf of Dudgeon Offshore Wind Ltd

Sistema di connessione alla rete elettrica

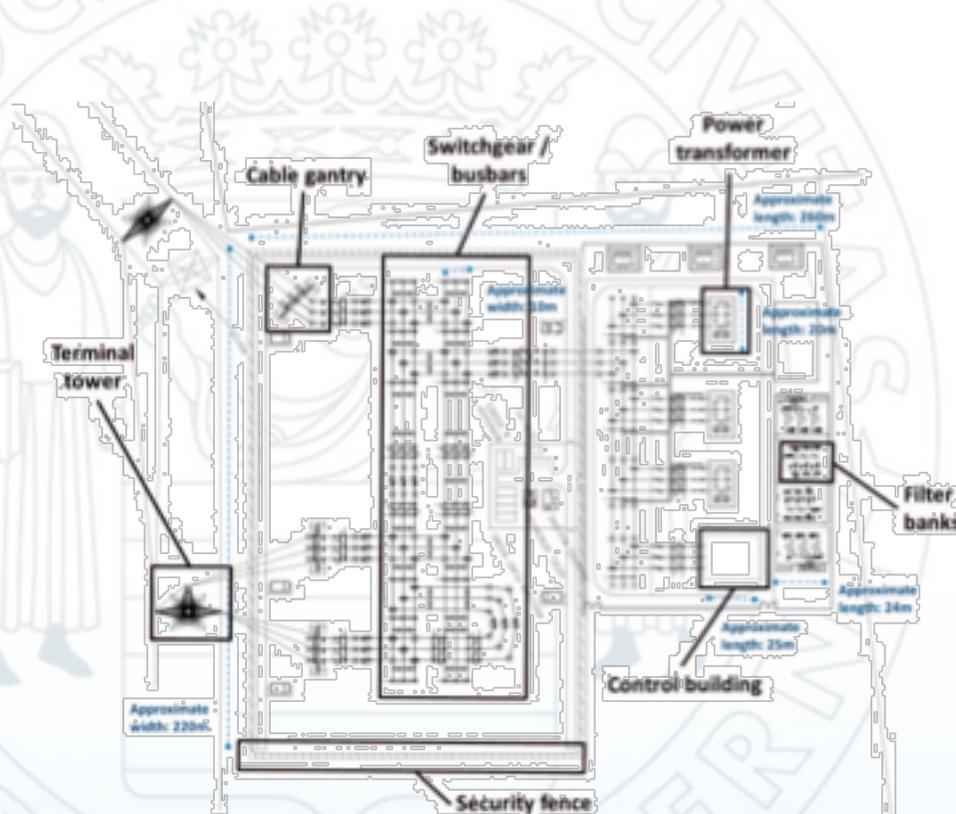
Sottostazioni AC onshore – Esempio



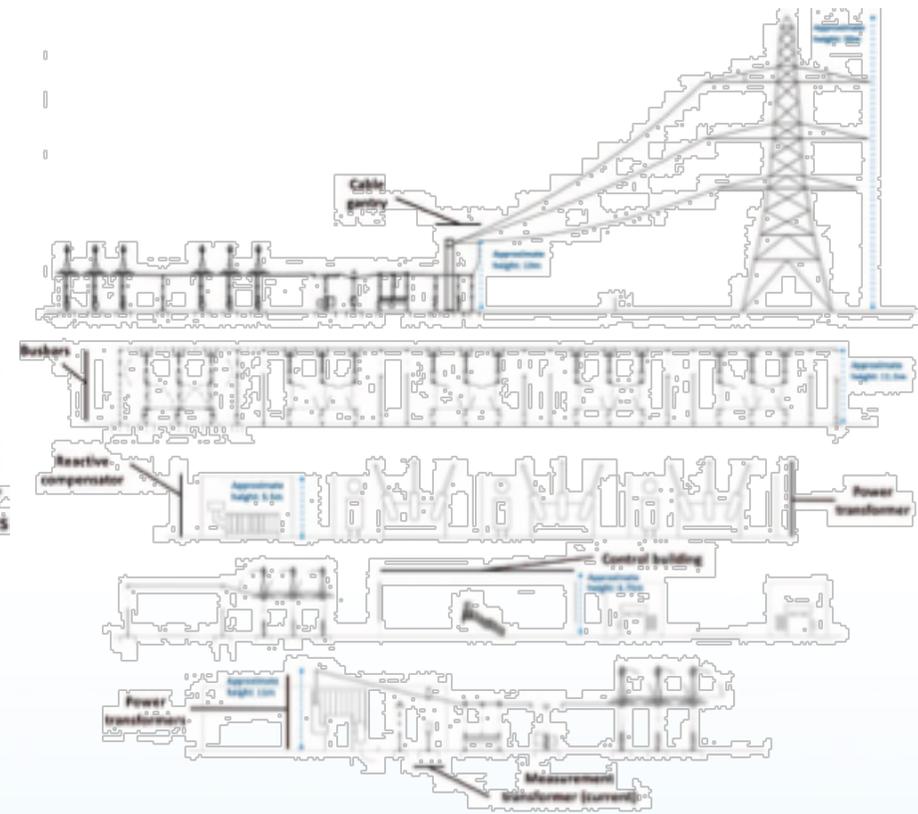
Esempio di Sottostazione AC onshore (132kV) (Source : SEE)

Sistema di connessione alla rete elettrica

Sottostazioni AC onshore – Esempio



Esempio di Sottostazione AC onshore (Source: Royal HaskoningDHV adapted from National Grid/ ABB Limited image)



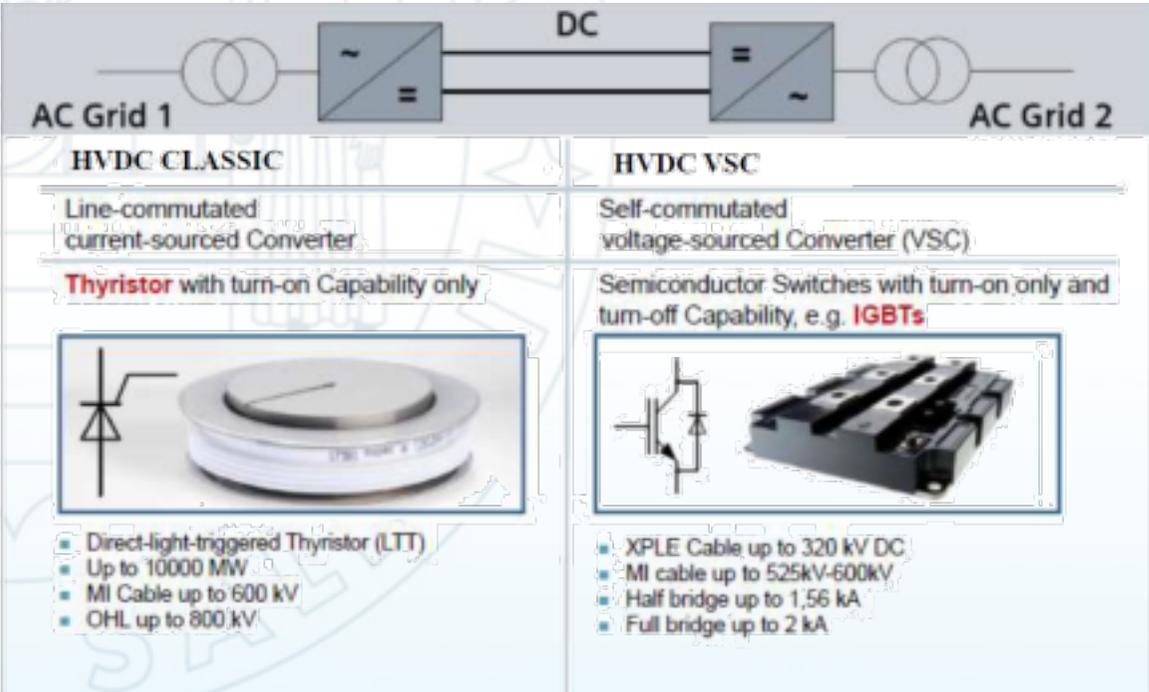
Sezione trasversali di una Sottostazione AC onshore (Source: Royal HaskoningDHV adapted from National Grid image)

Sistema di connessione alla rete elettrica

Conversione AC/DC

Ci sono due tecnologie utilizzate nella trasmissione HVDC:

- **CSC** – Current Source Converter o **LCC** – Line Commuted Converter
- **VSC** – Voltage Source Converter

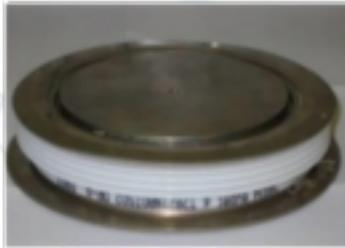


Confronto tra LCC e VSC (Source: Siemens)

Sistema di connessione alla rete elettrica

Conversione AC/DC

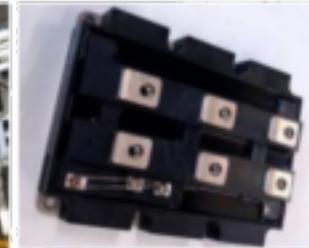
Line Commutated Converters LCC – HVDC/UHVDC



Uses **Thyristors**



Voltage Source Converters VSC – HVDC



Uses **Transistors**



- Higher Power Ratings : up to 10GW
- Longer History : In service since 1980's
- Best for Overhead Line Transmission
- Asynchronous Interconnections
- Need AC Filters => Bigger Switchyard
- Lower losses < 0.8%

- Rating limited today : ~1GW
- More Versatile Control of MW / MVar
- Linear Bi-directional control
- Functionality suitable for "DC grid"
- Good for weak AC systems
- Higher Losses 1.0-1.2%

Confronto tra LCC e VSC (Source: General Electric)

Sistema di connessione alla rete elettrica

Conversione AC/DC – VSC

Commercialmente vengono realizzati sistemi VSC-HVDC dai maggiori produttori europei e mondiali

- **ABB** – HVDC-Light
- **Siemens** – HVDC PLUS (Power Link Universal System)
- **Alstom** – HVDC MaxSine.

*I sistemi Siemens e Alstom, in particolare, sono interessanti perchè utilizzano sistemi di conversione Multilevel (MMC) che riescono a ridurre se non a eliminare del tutto le armoniche e tenendo conto che i sistemi di filtraggio per le armoniche occupano quasi la metà del volume occupato dalle stazioni, questo risulta essere un vantaggio enorme per la realizzazione dei sistemi di conversione. La tecnologia Siemens è quella utilizzata per il collegamento **INELFE** Francia-Spagna, mentre il sistema Alstom è quello utilizzato per il collegamento Italia-Francia.*

Soluzioni per accumulo energia

StEnSea : Joint Venture



- Project Leader -



in cooperation with Voith Hydro

- Pump-turbine Technology -



Prof. Dr. Horst
Schmidt-Böcking

- Idea and Patent Application -



Dr. rer. nat.
Gerhard Luther



- Project Development -

Soluzioni per accumulo energia

StEnSea – Storing Energy at Sea

Dieci ingegneri guidati dal fisico Jochen Bard stanno lavorando a Kassel per scoprire come accumulare l'elettricità generata in mare aperto o in prossimità della costa con l'ausilio di sfere cave di cemento. Hanno un diametro di circa 30 con pareti di spessore di circa tre metri. L'idea è quella di ancorare le sfere di 700 metri di profondità sul fondo del mare ed utilizzarle come serbatoi di stoccaggio dell'acqua.

La sfera viene riempita ogni volta che c'è necessità di energia elettrica. Poiché i flussi di acqua in esso azionano una turbina che produce energia elettrica che viene immessa nella rete. Se vi è un surplus di energia in rete, l'acqua viene pompata fuori dalla sfera e l'energia viene immagazzinata fino a rilasciarla quando la sfera viene ririempita.

*Il modello comprende 200 sfere, la singola sfera ha una capacità di stoccaggio di **20 MWh**. Ciò significa che un parco con 200 sfere sul fondo del mare renderebbe **4 GWh**, disponibile entro poche ore per la conservazione o l'equalizzazione.*

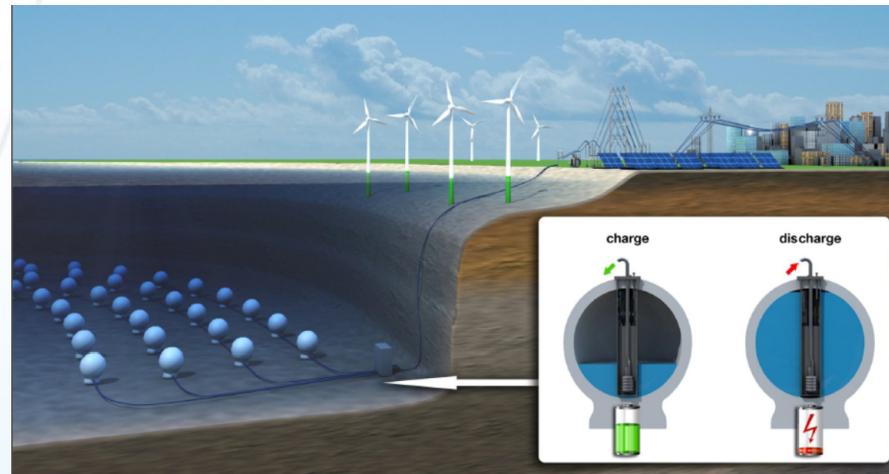
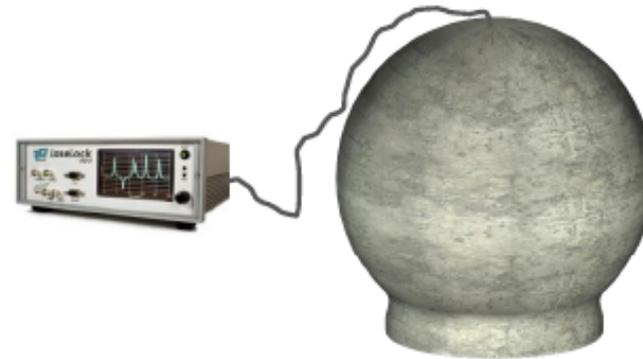
Il progetto è finanziato dal Ministero Federale per l'Ambiente, Conservazione della Natura e la Sicurezza Nucleare.

Soluzioni per accumulo energia

StEnSea – Storing Energy at Sea

Modello:

- Sfera cava con un diametro interno di circa **2,68 m**
- Spessore parete **30 cm**
- Volume **12 m³**
- Profondità di **20 m**, lago di Costanza



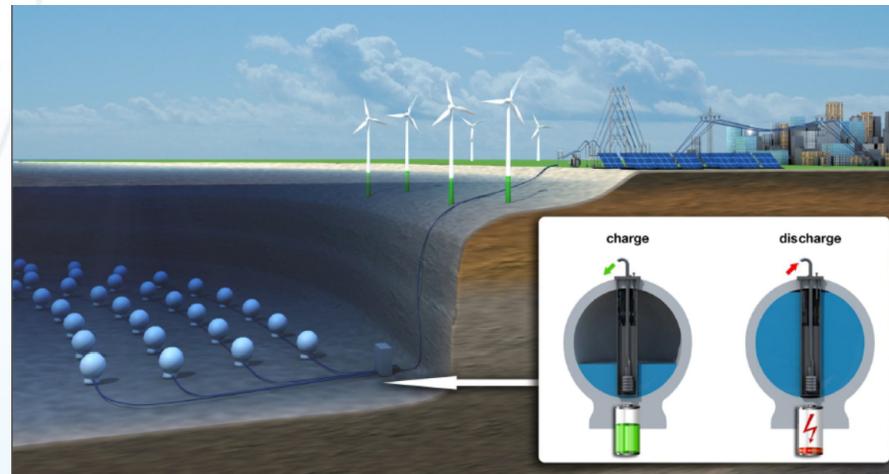
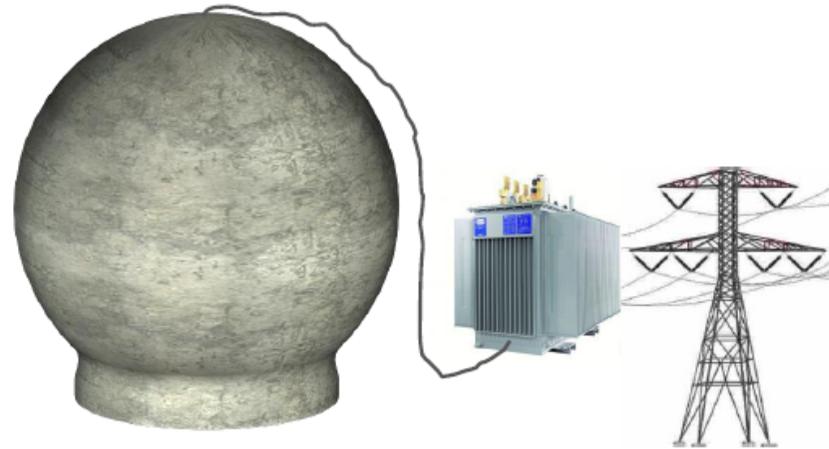
StEnSea (Source : HOCHTIEF)

Soluzioni per accumulo energia

StEnSea – Storing Energy at Sea

Progetto pilota:

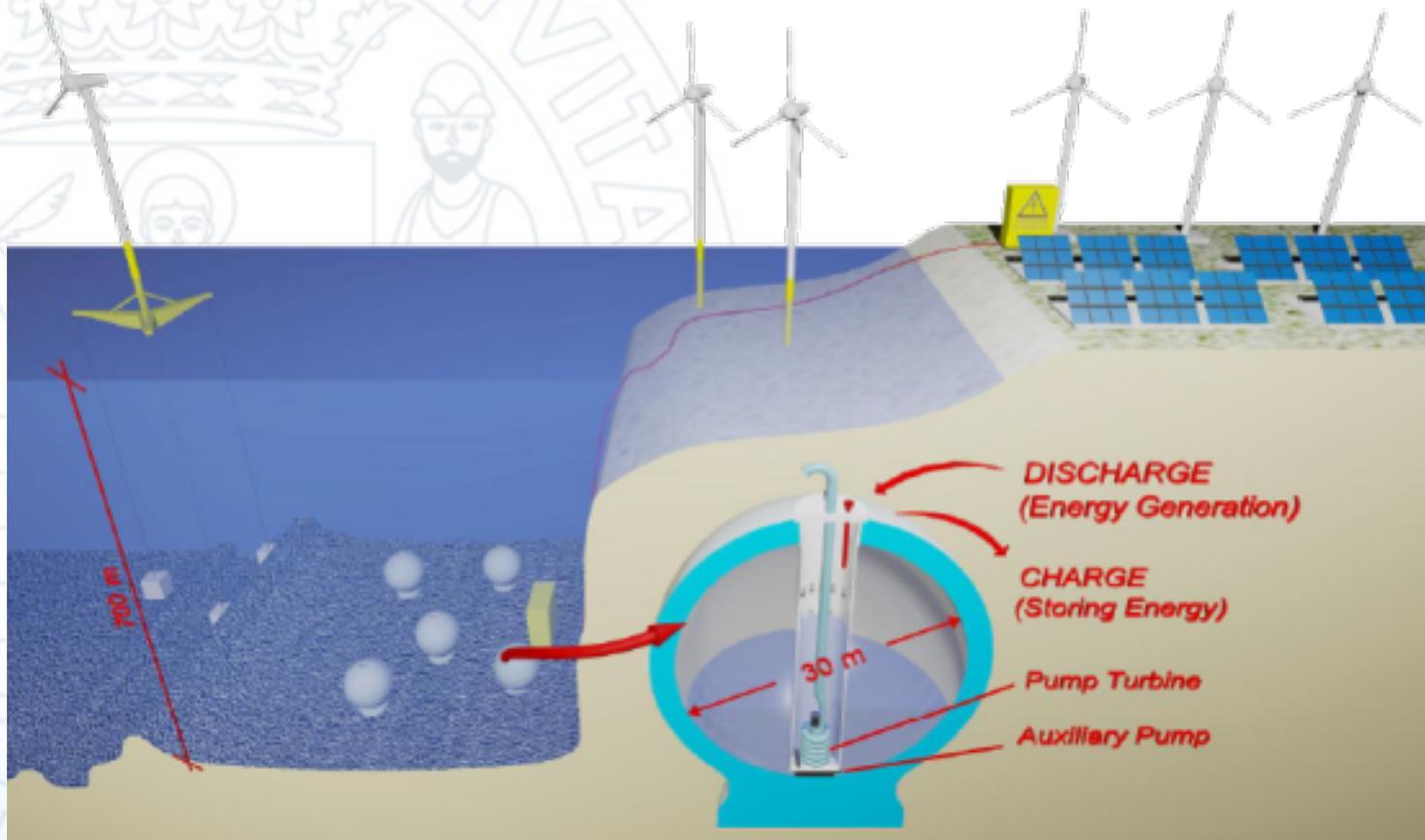
- Sfera cava con un diametro interno di circa **30 m**
- Spessore parete **3 m**
- Volume **12000 m³**
- Pompa/turbina multi-stadio da **5MW**
- Capacità di stoccaggio **20MWh** ad una profondità di **700 m**



StEnSea (Source : HOCHTIEF)

Soluzioni per accumulo energia

StEnSea – Storing Energy at Sea



StEnSea (Source : HOCHTIEF)

Soluzioni per accumulo energia

StEnSea – Storing Energy at Sea

Construction Target Costs			
Concreting costs including formwork and reinforcement	225 €/m ³	2,065 T€/piece	413 €/kW
Installation of each unit		1,500 T€/piece	300 €/kW
Pump-turbine with electro-mechanical equipment		2,625 T€/piece	525 €/kW
STENSEA Target costs per kW installed power			1,238 €/kW

Note: Associated cabling costs are not considered at this point.

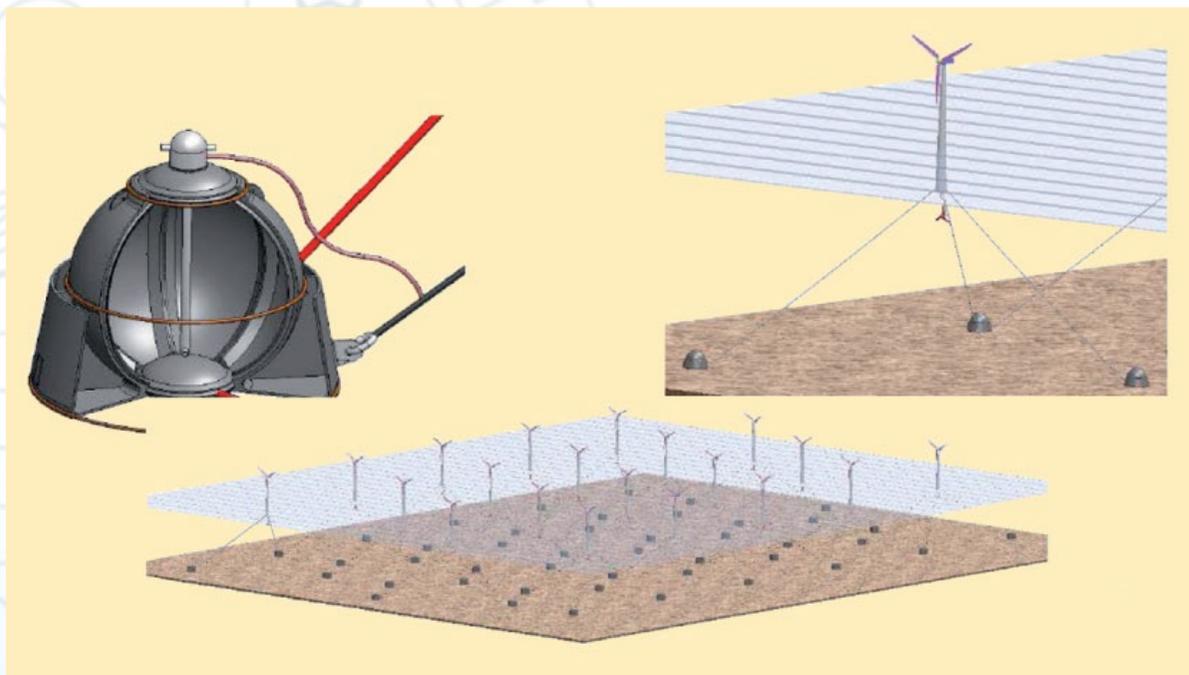
Comparison with conventional pumped-storage power plants:

→ Current total costs of approx. 1,300 €/kW installed power
(location dependent)

StEnSea (Source : HOCHTIEF)

Soluzioni per accumulo energia

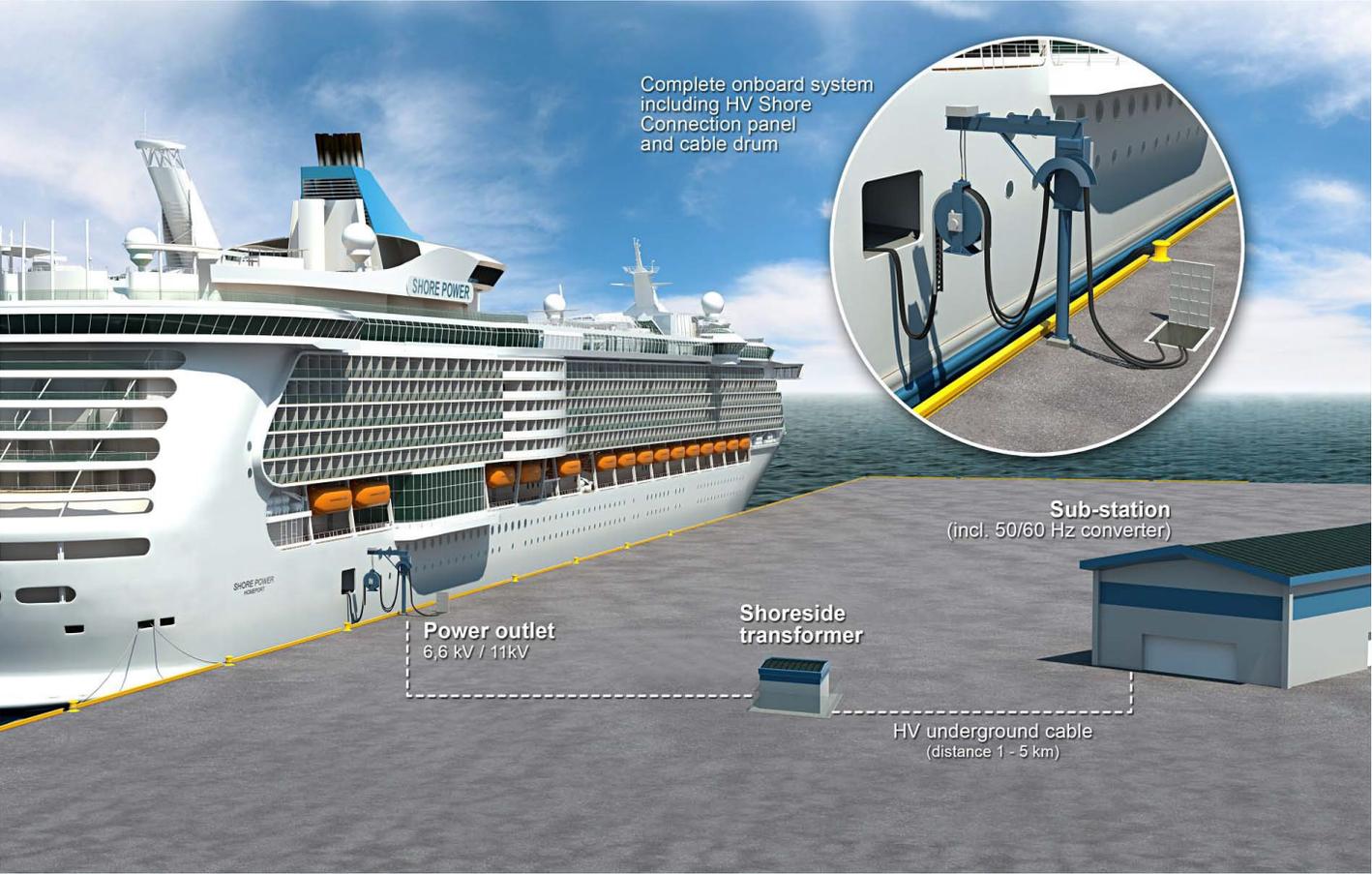
StEnSea: Ulteriore applicazione



Wind Farm offshore con turbine galleggianti, i sistemi di accumulo vengono impiegati anche come sistemi di ancoraggio (Source : Speicherung elektrischer Energie am Meeresboden)

Opportunità

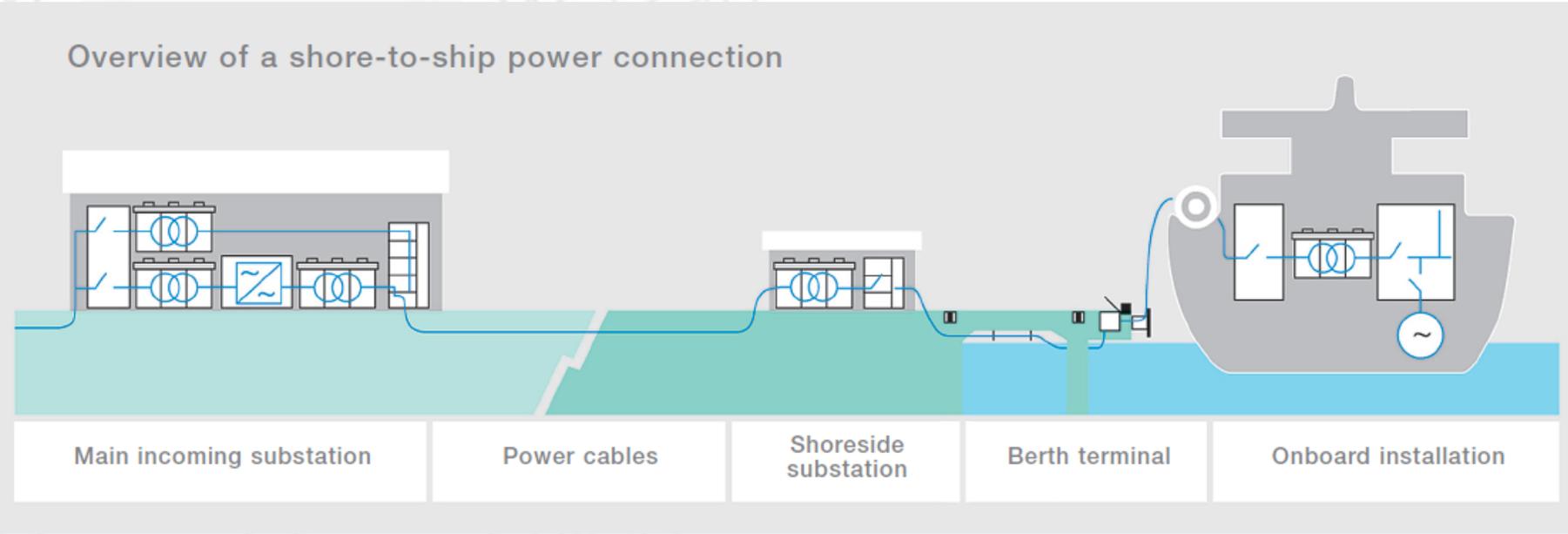
Shore Connection



Shore connection (Source : ABB)

Opportunità

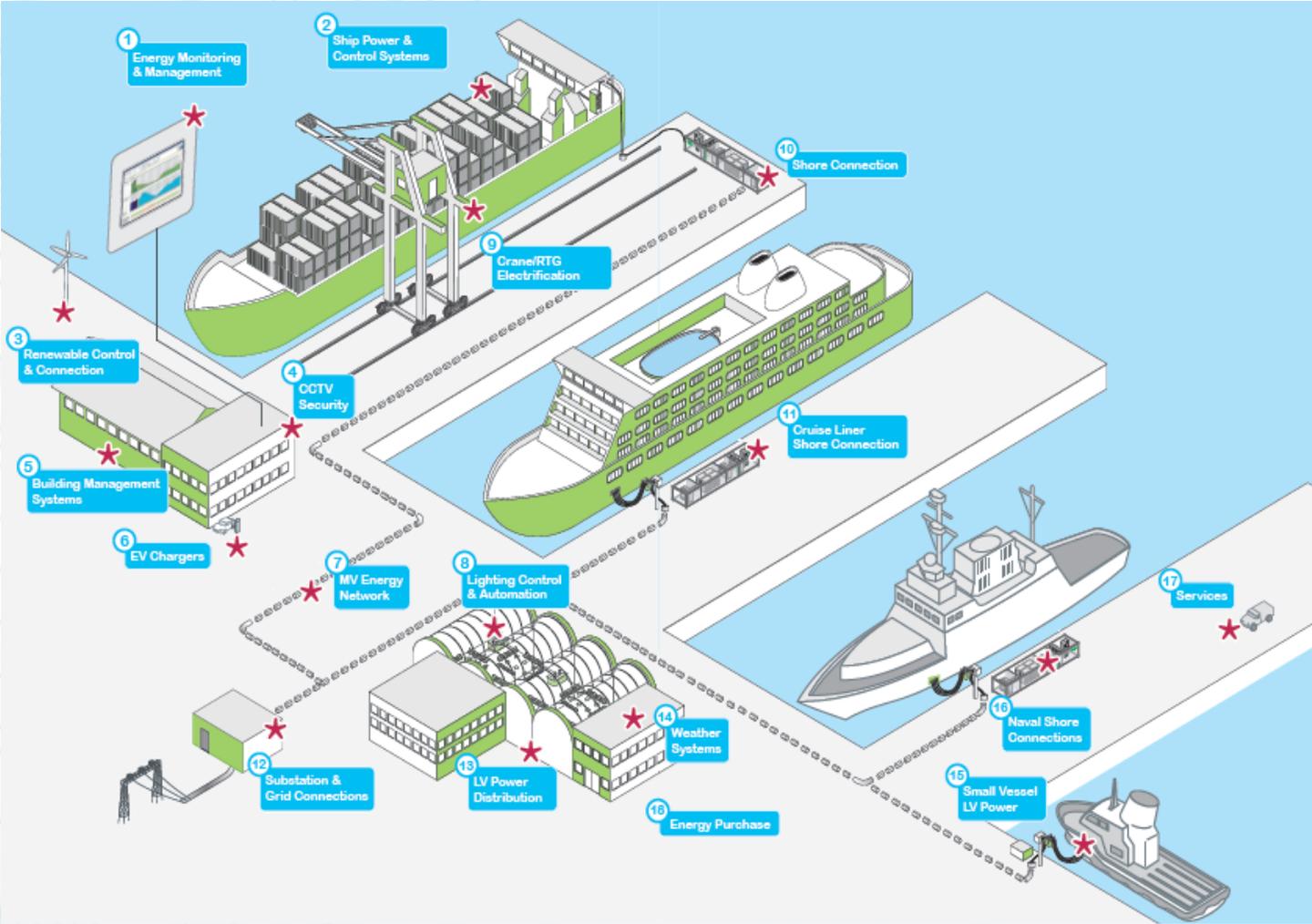
Shore Connection



Shore connection (Source : ABB)

Opportunità

Port Energy Solutions



Port Energy Solutions (Source :Schneider Electric)

GRAZIE!

***ENERGIA DAL MARE:* TRASPORTO E GESTIONE
DELL'ENERGIA ELETTRICA IN AMBITO
OFFSHORE E COSTIERO**

Vincenzo Galdi
Dipartimento di Ingegneria Industriale
Università degli Studi di Salerno
vgaldi@unisa.it