

Protezione catodica nell'eolico offshore: corrente impressa vs anodi galvanici

B. Refraschini, T. Caglioni, P. Marcassoli

L'esperienza maturata nel settore oil&gas in materia di ingegneria della corrosione e della protezione catodica vede le strutture offshore, ad esempio i jacket, protetti dalla corrosione soprattutto tramite anodi in lega di alluminio. Anche i sistemi di protezione catodica a corrente impressa sono talvolta utilizzati, sebbene siano più diffusi per scopi di retrofitting piuttosto che per applicazione su strutture nuove. Con lo sviluppo delle energie rinnovabili, e in particolare dei parchi eolici offshore, cresce anche l'attenzione verso l'impatto ambientale dei sistemi di protezione catodica: da un lato, gli anodi galvanici comportano il rilascio di ossidi metallici nell'acqua di mare che potrebbero impattare su flora e fauna marina, e dall'altro i sistemi a corrente impressa favoriscono l'evoluzione locale di cloro, che ha un effetto biocida. Viene qui presentato uno studio comparativo tra sistema di protezione catodica ad anodi galvanici e sistema di protezione catodica a corrente impressa, evidenziando vantaggi e svantaggi apportati alla protezione della struttura, e valutando il loro impatto sull'ambiente.

PAROLE CHIAVE: PROTEZIONE CATODICA, EOLICO OFFSHORE, AMBIENTE

INTRODUZIONE

La protezione catodica (PC) delle strutture offshore nell'oil&gas è ben conosciuta e consolidata. I jacket delle piattaforme vengono solitamente protetti con anodi galvanici (GACP) in lega di alluminio, così come condotte, navi, etc. La protezione catodica a corrente impressa (ICCP) viene applicata soprattutto in contesti di retrofitting, quindi di estensione della vita di servizio.

Negli ultimi anni, però, sta crescendo l'interesse verso fonti di energia "green", e con lo sviluppo di campi eolici in mare sempre più spesso i sistemi ICCP vengono installati, si dice, per motivi ecologici. Questo articolo si propone di analizzare le differenze tra i sistemi GACP e ICCP e il loro diverso impatto sull'ambiente.

Diversi sono gli aspetti da tenere in considerazione nella scelta del sistema di PC per i campi eolici offshore. I fattori chiave sono: tipologia di struttura (prevalentemente monopalo), luogo di installazione, semplicità di gestione/ disponibilità di corrente, fattori ambientali.

Per quanto riguarda la tipologia di struttura, le fondazioni possono essere di diverso tipo.

**B. Refraschini, T. Caglioni,
P. Marcassoli**
Cescor Srl, Italia

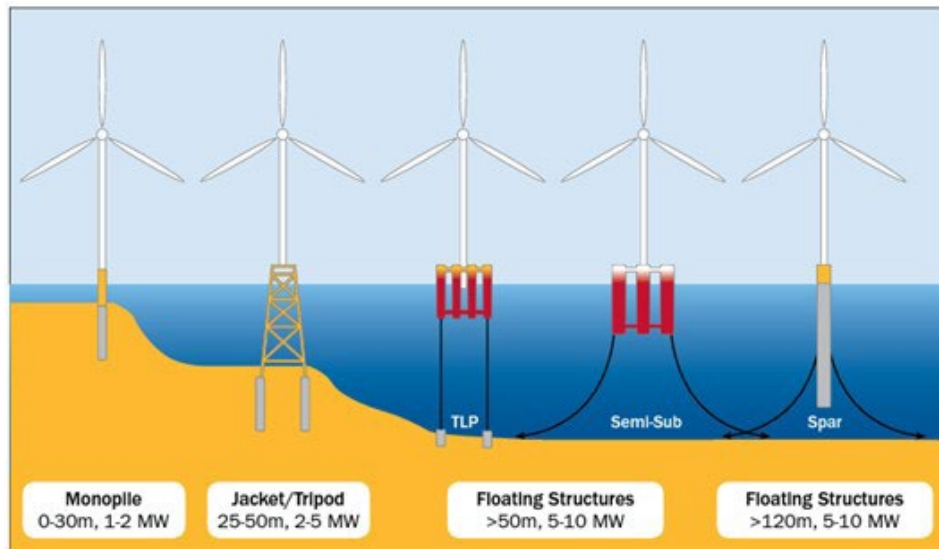


Fig.1 - Tipologie di strutture eoliche offshore (rif.[1]) / Offshore wind structure types.

La tipologia più diffusa al momento in Europa è quella della turbina monopalo (rif. [4]), grazie alla semplicità di produzione, la scalabilità e il basso costo rispetto ad altre strutture.

Inoltre, i campi eolici hanno la particolarità di avere molte turbine (decine), e sono senza personale di bordo. La scelta del sistema di PC deve tenere conto delle difficoltà nel caso sia necessaria manutenzione in loco, e deve essere facilmente replicabile tra una turbina e l'altra, considerando sia fattori economici sia logistici (trasporto delle strutture eoliche e installazione non devono essere intralciate/complicate dal sistema di PC).

I trend sembrano indicare un interesse ancora preponderante nell'installazione di pale eoliche in acque non troppo profonde (<60m circa). In alcuni casi i campi eolici vengono installati al largo degli estuari dei grandi fiumi, per l'elevata disponibilità di vento in quelle zone. In altri casi vengono installate molto al largo dalla costa (anche per evitare impatto visivo) e quindi in acque profonde, dove strutture galleggianti vengono preferite rispetto a jacket o monopalo.

L'attenzione verso l'impatto ambientale della produzione di energia è sempre più crescente, e ogni piccola riduzione dell'inquinamento può essere importante. Per la protezione catodica, da un lato gli anodi galvanici consumandosi rilasciano ioni metallici nell'ambiente, e dall'altro la corrente impressa genera cloro che idrolizza e ha effetto biocida.

Questi ed altri fattori vengono analizzati nei paragrafi suc-

cessivi.

PROTEZIONE CATTODICA: CORRENTE IMPRESSA E ANODI GALVANICI

La protezione catodica può essere applicata tramite due metodi: corrente impressa o anodi galvanici.

Nel caso degli anodi galvanici la protezione catodica viene ottenuta accoppiando la struttura da proteggere ad anodi in lega di alluminio, più raramente zinco. GACP è un metodo noto e molto affidabile in ambienti offshore, è molto semplice in termini tecnologici (non richiede sorgenti di energia esterne né monitoraggio), si auto-regola a seconda delle attuali richieste di corrente della struttura. Di contro, però, una struttura offshore, soprattutto se non rivestita, può richiedere un numero particolarmente elevato di anodi, con conseguente aumento di peso sulla struttura.

Dall'altro lato, la protezione catodica a corrente impressa è ottenuta mediante la circolazione di corrente forzata da un alimentatore, con il cavo positivo collegato ad un anodo insolubile (tipicamente titanio attivato) e il negativo collegato alla struttura. I sistemi ICCP possono fornire condizioni di protezione della struttura con molti meno anodi, con conseguenti benefici anche in termini di stoccaggio, trasporto e installazione. Dall'altro lato, ICCP per funzionare ha bisogno di un alimentatore, di cavi elettrici, e di un sistema di controllo e monitoraggio che possa funzionare da remoto.

È possibile fare un confronto tra le due tecniche in rela-

zione ai campi eolici offshore (in particolare strutture monopalo) considerando: design life, richiesta di corrente, peso e drag force, uniformità di protezione, manutenzione e ispezioni, salute e sicurezza, impatto ambientale.

Design life

Sia anodi galvanici che corrente impressa sono in genere in grado di soddisfare vite di servizio di 25-30 anni.

Gli anodi galvanici, progettati con un certo livello di conservatività, solitamente arrivano a proteggere la struttura anche oltre il termine della vita di progetto.

La corrente impressa a livello teorico può avere una vita di progetto molto lunga, anche oltre 30 anni, ma bisogna tenere conto dell'erogazione degli anodi, che diminuisce nel tempo. Inoltre i sistemi ICCP devono fare affidamento su diversi componenti (anodi, cavi, alimentatore) che sono soggetti a deterioramento (a volte rottura) nel tempo. In pratica, la design life dei sistemi ICCP è garantita solamente dalla generale affidabilità dei componenti del sistema, soprattutto considerando che la sostituzione dei componenti è complessa.

Necessità di corrente esterna

Gli anodi galvanici non dipendono dalla disponibilità di una fonte di energia esterna. La corrente di protezione si esaurisce solo nel momento in cui l'anodo è completamente consumato.

La corrente impressa, al contrario, si basa esclusivamente sulla disponibilità di corrente esterna. La corrente di protezione è fornita da un alimentatore (trasformatore/raddrizzatore, o "TR"). La sorgente di corrente può essere la sottostazione del campo eolico, ma in caso di temporanea interruzione, anche il sistema di protezione catodica sarebbe fuori uso.

Peso e drag force

In termini di peso i sistemi GACP e ICCP hanno una netta differenza e impatto sulle operazioni di installazione e sulle caratteristiche strutturali del monopalo. In particolare, gli anodi a corrente impressa sono molto più compatti e leggeri rispetto alla massa di anodi galvanici necessari a parità di corrente.

Inoltre, spesso gli anodi galvanici possono essere installati solo in alcuni punti della struttura, e vengono installati in "gruppi" su supporti ad anello, quindi è da considerare,

oltre al peso degli anodi stessi, anche il peso aggiuntivo della struttura di supporto. Tale posizionamento risulta essere un carico concentrato, che ha un impatto sia sui carichi a fatica della struttura che sulla drag-force dovuta alle correnti marine.

Uniformità di protezione

Per quanto riguarda GACP, non è possibile avere situazioni di sovraprotezione, dato che il potenziale inferiore è intrinsecamente limitato dal potenziale a circuito chiuso degli anodi. Il potere penetrante degli anodi è limitato dal lavoro motore, e dipende dalla resistività dell'acqua di mare. È possibile che in alcuni casi, se la distribuzione non è adeguata, avere alcune zone della struttura in sottoprotezione.

Nei sistemi a corrente impressa, invece, entrambi i limiti superiore e inferiore di potenziale dipendono dalla corrente erogata, e quindi in principio sono possibili entrambi sovraprotezione e sottoprotezione. Se la struttura è rivestita, la distribuzione delle condizioni di protezione è generalmente migliore. Se la struttura è nuda, al contrario, è più probabile che le zone immediatamente vicine all'anodo siano sovraprotette, mentre quelle più lontane siano in condizione di sottoprotezione. Per mitigare il problema, è necessario aumentare la ridondanza degli anodi riducendo l'erogazione di corrente di ciascuno.

La sovraprotezione causata dai sistemi a corrente impressa può inoltre portare a conseguenti problemi, come "cathodic disbondment" nel caso di struttura rivestita, e in fragilimento da idrogeno, nei metalli suscettibili.

Manutenzione e ispezioni

Per i sistemi a corrente impressa è necessario monitorare continuamente lo stato di protezione della struttura, oltre che effettuare ispezione periodiche ai componenti fuori acqua (es. alimentatori e cassette di derivazione) e immersi (anodi, cavi). I sistemi moderni sono ormai quasi sempre dotati di monitoraggio remoto, per cui è possibile verificare lo stato di protezione della struttura e regolare i parametri di output al TR da remoto, sulla terraferma. Le ispezioni alle varie componenti fuori acqua richiede però la presenza di personale sul posto.

Gli anodi galvanici, al contrario, non necessitano di manutenzione e richiedono un minor numero di ispezioni rispetto a ICCP, e il monitoraggio del potenziale della strut-

tura può essere effettuato da remoto o in situ.

Salute e sicurezza

Gli anodi galvanici non presentano praticamente alcun problema di sicurezza, se non durante le fasi di saldatura e di installazione. I sistemi a corrente impressa presentano qualche rischio, come i danni da fulmini alle apparecchiature fuori acqua; questo rischio è minimo considerando che nella maggior parte del tempo non è presente personale a bordo. Inoltre sussiste un rischio elettrico per sommozzatori vicino agli anodi. In caso di ispezioni subacquee, è necessario spegnere i sistemi di PC.

IMPATTO AMBIENTALE DELLA PROTEZIONE CATODICA

L'impatto ambientale delle due tecniche è legato essen-

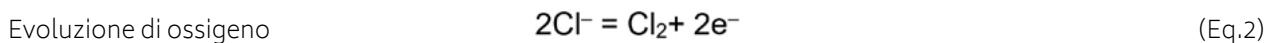
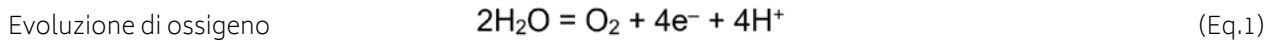
zialmente a: rilascio di metalli (GACP), evoluzione di cloro (ICCP), decommissioning e smaltimento del sistema.

In questo paragrafo viene preso in esame un monopalo di circa 7 m di diametro e 35 m di profondità.

Impatto ambientale della protezione catodica a corrente impressa

I sistemi ICCP installati su strutture offshore producono principalmente cloro agli anodi.

In corrispondenza dell'anodo in titanio attivato sono due le reazioni principali che avvengono:



Negli anodi commerciali di titanio attivato, l'evoluzione di ossigeno è predominante solo per densità di corrente fino a 10 A/m². Per valori di densità di corrente maggiori, l'evoluzione di cloro diventa la reazione anodica principale. Questi limiti potrebbero variare negli anodi di nuova generazione, con migliorata composizione dei MMO. Per semplicità e conservatività, la produzione di cloro all'anodo viene qui calcolata considerando che l'evoluzione di cloro

all'anodo costituisce il 100% della reazione elettrochimica all'anodo.

Velocità di rilascio di cloro

Dati di corrente indicativi (sulla base di valori di densità di corrente come da rif.[1]) per i sistemi ICCP per fondazioni a monopalo sono riassunte in tabella 1:

Tab.1 - Valori di corrente tipo per monopalo / example of current values for monopile.

	$I_{P,INIZIALE}$ (A)	$I_{P,MEDIA}$ (A)
Nudo	200	100
Rivestito	10	30

Assumendo che tutta la corrente viene supportata dall'evoluzione di cloro, la velocità di rilascio di cloro, R_{Cl_2} (g/h),

viene calcolata come:

$$R_{Cl_2} = 3'600 \cdot \frac{I \cdot pm_{Cl_2}}{F \cdot n} \quad (\text{Eq.3})$$

Dove: pm_{Cl_2} è la massa molecolare del cloro (70.90 g/mol), F è la costante di Faraday: 96'485 C/eq e n è il numero di elettroni coinvolti nella reazione elettrochimica (2 eq/mol)

e 3'600 sono i secondi per ogni ora.

I risultati dei calcoli sono riportati in tabella 2.

Tab.2 - Velocità di rilascio di cloro / Chlorine discharge rate.

	$R_{Cl_2-INITIAL}$ (kg/giorno)	R_{Cl_2-MEAN} (kg/giorno)
Nudo	6.3	3.3
Rivestito	0.3	0.9

Effetti del cloro

Per tradurre le velocità di rilascio sopra calcolate in concentrazione in acqua viene seguito un approccio semplicistico come suggerito anche nel rif.[5]: prendiamo un volume di acqua intorno al palo ad una distanza di 5 m dal

palo stesso; il ricambio di acqua avviene tramite flusso orizzontale di acqua che occupa il volume in un tempo t . Nell'ipotesi di correnti marine basse (intorno a 0,01 m/s, quindi velocità molto basse), è possibile stimare la concentrazione residua come:

$$[Cl_2] = \frac{R_{Cl_2} \cdot t}{Volume}$$

Nel caso in esame, il tempo t necessario a sostituire il volume d'acqua (5'655 m³) è di 0,14 ore (calcolato considerando una distanza di 5 m dal palo, con una velocità di 0,01 m/s), quindi la concentrazione residua varia da 0.0010 ppm (caso rivestito) a 0.0065 ppm (caso nudo).

nel caso di campi eolici offshore composti da numerose pale e site in acque poco profonde. Il cloro prodotto in principio può avere effetti ambientali negativi, come accade a volte nei porti dove sono armeggiate navi con sistemi a corrente impressa permanentemente operativa. In quei casi è possibile che il cloro si accumuli fino a portare a sterilizzazione di tutta l'area.

In molte industrie, il cloro viene intenzionalmente aggiunto all'acqua di mare per sterilizzarla. Il valore minimo di cloro aggiunto come biocida è intorno ai 0.5 ppm (rif.[6] e [7]). La quantità di cloro rilasciata dal sistema di protezione catodica a corrente impressa di un singolo monopalo è bassa, anche se dipende dalle dimensioni della struttura e dalla presenza o meno di rivestimento. La dispersione del cloro prodotto fa in modo che le concentrazioni prodotte siano minime. Possibili effetti negativi sono da valutare

Impatto ambientale della protezione catodica ad anodi galvanici

Reazioni degli anodi galvanici in acqua di mare

Le principali reazioni di ossidazione per quanto riguarda gli anodi Al-Zn-In sono la dissoluzione di Al e Zn:



In normali condizioni di dissoluzione uniforme, il relativo contributo al processo anodico complessivo di ogni individuale reazione elettrochimica è proporzionale alla percentuale di quell'elemento nella lega (formalmente la frazione molare della lega, che può essere approssimata alla percentuale in peso).

Velocità di rilascio di ioni metallici

La velocità di ioni metallici prodotti, $R_{M^{n+}}$ (g/h), come risultato della dissoluzione dell'anodo galvanico è direttamente proporzionale alla corrente di protezione, in accordo alla legge di Faraday:

$$R_{M^{n+}} = 3'600 \cdot \frac{I \cdot a_{wM}}{F \cdot n} \quad (Eq.5)$$

Dove I è la corrente proporzionale alla frazione molare dell'elemento $x_{eq,M}$, aw_M è la massa atomica del metallo (g/mol), F è la costante di Faraday (96'485 C/eq), n è il numero di elettroni che partecipano nella reazione elettrochimica (eq/mol) e 3'600 sono i secondi per ogni ora.

La velocità di produzione dei principali ioni metallici dagli anodi galvanici installati su una generica struttura a monopolo di una corrente di 100 A sono riportati in tabella 3.

Tab.3 - Velocità di dissoluzione degli ioni metallici dell'anodo galvanico /
Dissolution rate of galvanic anode metal ions

Elemento, M	peso atomico, M	Concentrazione in lega	n	eq.M/100 g	$x_{eq,M}$	I	R
-	-	%	eq/mol	-	-	A	g/giorno
Al	26.98	95.6325	3	10.6331	0.9864	98.635	794.4
Zn	65.38	4.1250	2	0.1262	0.0117	1.171	34.265
In	114.82	0.0275	2	0.0005	0.0000	0.004	0.228
Fe	55.65	0.0900	2	0.0032	0.0003	0.030	0.748
Cd	112.41	0.0020	2	0.0000	0.0000	0.000	0.017
Si	28.09	0.1200	4	0.0171	0.0016	0.159	0.997
Cu	63.55	0.0030	2	0.0001	0.0000	0.001	0.025
				10.7802	1.0000	100.000	

Per valutare la concentrazione residua in acqua viene seguito lo stesso approccio presentato per il caso ICCP. Considerando una corrente di protezione di 100 A e una corrente marina a 0,01 m/s, la concentrazione di Al attesa è di 0.00081 ppm e quella di Zn è di 0.00004 ppm.

Dal punto di vista della salute umana, l'alluminio è considerato non-tossico; in acqua potabile viene dato un limite alla concentrazione di alluminio di 0.1-0.2 ppm, ma solo perché a concentrazioni maggiori è possibile la deposizione di "fiocchi" di idrossido di alluminio. Simili considerazioni si applicano anche agli ioni di zinco, che è il secondo materiale per peso presente nelle leghe di alluminio per anodi galvanici.

Inoltre, la ISO 24656 (rif. [3]) riporta che non esistono studi conclusivi sull'impatto degli anodi di alluminio in acque aperte, mentre in zone relativamente riparate, come le zone portuali, anche in caso di evidenza di maggiori concentrazioni di alluminio in acqua non sono state riportate conseguenze significative.

Decommissioning

Nel caso degli anodi galvanici, solo gli anodi sono da smaltire al decommissioning.

Nel caso della corrente impressa, i componenti da smaltire sono più numerosi: anodi, cavi, elettrodi di riferimento, cassette, alimentatore. Conseguentemente, lo smaltimento è più delicato perché riguarda materiali diversi (e potenzialmente inquinanti, come l'olio di raffreddamento dell'alimentatore, se di questa tipologia).

tire sono più numerosi: anodi, cavi, elettrodi di riferimento, cassette, alimentatore. Conseguentemente, lo smaltimento è più delicato perché riguarda materiali diversi (e potenzialmente inquinanti, come l'olio di raffreddamento dell'alimentatore, se di questa tipologia).

DISCUSSIONE

Date le considerazioni fatte nei paragrafi precedenti, entrambi i sistemi di protezione catodica sono validi tecnicamente e applicabili, con alcuni vantaggi e svantaggi per ognuna delle due tipologie.

Gli anodi galvanici sono in generale di pratico utilizzo, dal momento che non richiedono nessuna manutenzione, e garantiscono un'ottimale distribuzione di corrente per tutta la durata di servizio della struttura.

I sistemi a corrente impressa, dall'altro lato, sono in grado di fornire un'elevata quantità di corrente a fronte di un peso estremamente ridotto rispetto agli anodi galvanici, ma con maggiori problematiche di affidabilità.

Il nodo dell'impatto ambientale, su cui spesso viene fatta leva per spingere verso sistemi a corrente impressa, sembra non essere così rilevante: se da un lato è vero che gli anodi galvanici rilasciano una elevata quantità di ioni metallici, è anche vero che le correnti marine disperdo-

no i metalli e le concentrazioni locali risultano contenute. Inoltre i sistemi a corrente impressa rischiano anch'essi

di creare effetti, data l'azione biocida, e generano diversi materiali da smaltire in fase di decommissioning.

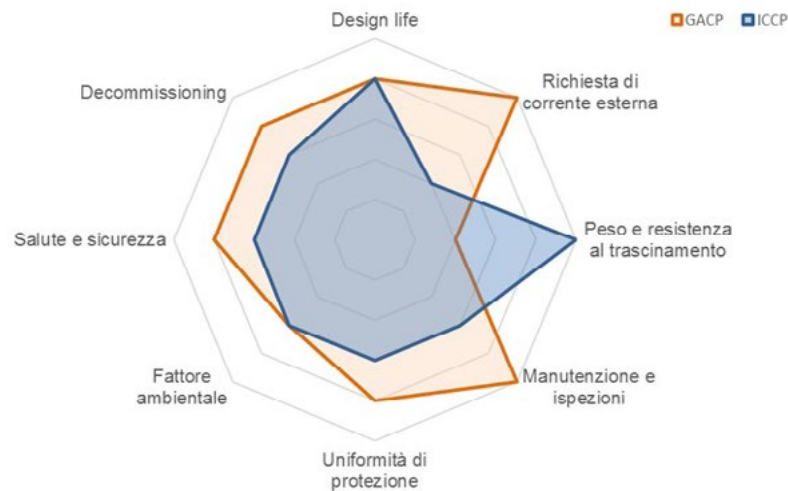


Fig.2 - Diagramma a radar con confronto GACP vs ICCP / Radar diagram with GACP vs ICCP comparison.

CONCLUSIONI

Le considerazioni fatte indicano che entrambi GACP e ICCP hanno un certo livello di impatto ambientale, che deve essere valutato volta per volta. Da un punto di vista tecnico, a seconda delle condizioni di applicazione è possibile preferire l'una o l'altra tecnica. Calcoli ingegneristici e valutazioni possono in ogni caso essere svolti per entrambe le condizioni, anche tenuto conto del contesto

specifico, in termini di profondità del mare, correnti, ricambio di acqua, concentrazioni attese.

In sintesi, la scelta del sistema di protezione catodica per strutture offshore dovrebbe essere fatta sulla base di considerazioni di natura tecnica ed economica, sulla base del caso specifico e delle sue condizioni, senza precludere l'una o l'altra opzione sulla base di pregiudizievole argomentazioni relative all'impatto ambientale.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Deep water. The next step for offshore wind energy – A report by the European Wind Energy Association (2013)
- [2] DNV-RP-B401:2021 General Principles of Cathodic Protection
- [3] ISO 24656:2022 Cathodic Protection of Offshore Wind Structures
- [4] Wind energy in Europe: 2022 Statistics and the outlook for 2023-2027
- [5] US Environmental Protection Agency. "Phase I Final Rule and Technical Development Document of Uniform National Discharge Standards (UNDS). Appendix A, Cathodic Protection: Nature of Discharge", published in April 1999. Reference number: EPA-842-R-99-001
- [6] World Health Organization. Guidelines for Drinking-water Quality. Fourth Edition. 2022 – pag.361
- [7] Council Directive 98/83/EC on the quality of water intended for human consumption

Cathodic Protection in Offshore Wind: Impressed Current vs Galvanic Anodes

The experience matured in the oil&gas industry concerning corrosion engineering has seen offshore structures, as for example jackets, protected from corrosion by aluminium alloy anodes. Impressed current cathodic protection systems are also frequently used, although they are more popular for retrofitting purposes rather than for application on new structures. The development of renewable energy, and in particular of offshore windfarms, is leading to new questions concerning the potential environment effects of cathodic protection: on one side, galvanic anodes imply the release of metallic oxides in seawater which affect both marine flora and fauna, and on the other hand impressed current implies evolution of chlorine, which can have a biocide effect. A comparative study between galvanic anodes and impressed current cathodic protection system is here presented, both in terms of advantages/disadvantages brought to the protection of the structure and in terms of impact on the environment.

KEYWORDS: CATHODIC PROTECTION, OFFSHORE WIND, ENVIRONMENT

[TORNA ALL'INDICE >](#)