

PROTEZIONE CATODICA DEL FONDO DI SERBATOI CON SISTEMI AD ANODI LINEARI DISTRIBUITI. DISTRIBUZIONE DEL POTENZIALE E DELLA CORRENTE

B. Bazzoni, S. Lorenzi, P. Marcassoli, T. Pastore

I serbatoi fuori terra di grandi dimensioni per lo stoccaggio di prodotti petroliferi sono sempre più frequentemente posati in opera con membrana di contenimento secondaria in materiale plastico per prevenire contaminazione del suolo in caso di perdite. Per attuare la protezione catodica in presenza di membrana si ricorre a sistemi ad anodi distribuiti, installati nello spazio tra il fondo e la membrana; tra questi, l'anodo del tipo a grid o a nastro in titanio attivato con ossidi di metalli nobili è uno dei più utilizzati. La particolare configurazione geometrica di questo sistema di protezione catodica pone specifici problemi di distribuzione del potenziale e della corrente di protezione. La memoria si sofferma su una serie di aspetti caratteristici di questa applicazione e riporta i risultati di alcune simulazioni numeriche effettuate per prevedere l'effettiva distribuzione di corrente e potenziale.

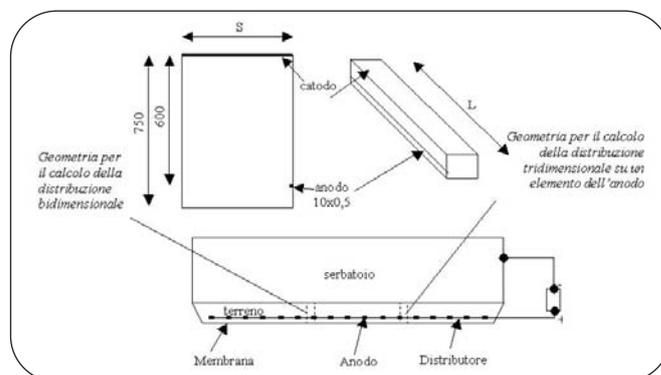
PAROLE CHIAVE: acciaio, corrosione, protezione catodica, simulazione numerica

INTRODUZIONE

I sistemi anodici per la protezione catodica di fondi di serbatoi provvisti di membrana di contenimento secondario utilizzano anodi lineari distribuiti. La progettazione di tali sistemi si differenzia dalla progettazione di quelli classici ad anodi discreti ed è caratterizzata da aspetti molto specifici (che in parte si ritrovano nelle applicazioni nel cemento armato) associati ai vincoli geometrici (ridotta distanza tra anodo e catodo per la presenza della membrana), alle cadute ohmiche nei conduttori anodici (anodi e distributori di corrente), alle reazioni elettrochimiche all'anodo e al catodo all'interno di un volume di elettrolita relativamente limitato. Errori nel dimensionamento dei sistemi anodici, in particolare delle spaziature degli anodi e dei distributori e del numero di punti di alimentazione, determina condizioni sia di mancata protezione, sia di protezione locale eccessiva. E questo avviene in un contesto critico dove, di fatto, è assolutamente impossibile intervenire a posteriori, se non dall'interno del serbatoio dopo rimozione del fondo. La complessità del sistema elettrochimico richiede l'ausilio di strumenti matematici idonei per il loro corretto dimensionamento sulla base della risoluzione del campo elettrico tra anodo e catodo, delle caratteristiche elettrochimiche degli elettrodi e della resistività dell'ambiente e degli elementi anodici.

DISTRIBUZIONE DELLA CORRENTE E DEL POTENZIALE

La distribuzione della corrente e del potenziale è stata studiata mediante modello di calcolo agli elementi finiti, utilizzando COMSOL MULTIPHYSICS®, al fine di valutare l'effetto della spaziatura tra gli anodi, della tensione di alimentazione, della resistività del terreno, e della caduta ohmica nei conduttori. Le simulazioni sono state effettuate su geometrie bidimensionali e tridimensionali, mantenendo costanti la distanza tra anodo e fondo del serbatoio e lo spessore del terreno (Fig. 1).



▲
Fig. 1

Geometrie utilizzate per la simulazione.
Geometry considered for FEM analysis.

B. Bazzoni

CESCOR, Milano

S. Lorenzi, P. Marcassoli, T. Pastore

Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, Università di Bergamo

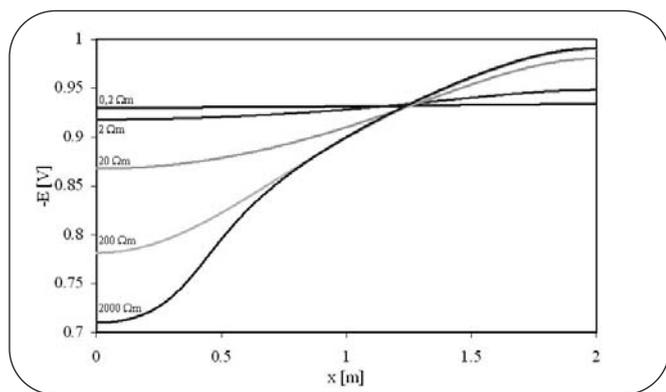


Fig. 2

Effetto della resistività elettrica sulla distribuzione del potenziale al catodo. Modello bidimensionale calcolato per corrente impressa di 20,5 mA/m (10,25 mA/m² densità di corrente media al catodo), 4 m di spaziatura tra gli anodi (2S), ξ pari a 0,1.
Effects of electric resistivity on potential distribution at cathode. 2D model considering 4 m anodes spacing (2S), x equal to 0.1 and mean current density value on cathode equal to 10.25 mA/m².

La distribuzione del potenziale (E) e della corrente nel terreno è stato ottenuto mediante risoluzione numerica dell'equazione di Laplace e della legge di Ohm [1-2], nell'ipotesi di terreno omogeneo.

Per le condizioni al contorno si è considerata nulla, sulle superfici isolanti, la densità di corrente in direzione normale. Al catodo, la densità di corrente scambiata è stata descritta mediante l'espressione della curva di polarizzazione dell'acciaio utilizzata in precedenti lavori per studiare la distribuzione su strutture offshore e a contatto con acque naturali [3-6] modificata con un coefficiente di difettosità ξ per tener conto della presenza del rivestimento sull'acciaio

$$(1) \quad i \left(\frac{A}{m^2} \right) = \xi \cdot \left[6,4 \cdot 10^9 \cdot e^{\left(\frac{E_{sc}}{25,25mV} \right)} - i_i - 8 \cdot 10^{-10} \cdot e^{\left(-\frac{E_{sc}}{50,5mV} \right)} \right]$$

in cui il potenziale dell'acciaio nel terreno (E_{Me}) è legato al potenziale in prossimità dell'elettrodo (E_e) tramite la relazione

$$(2) \quad E_{Me} = -E_e$$

Nella relazione (1), il potenziale E_{Me} è riferito all'elettrodo di riferimento al calomelano saturo (SCE) e il coefficiente ξ è definito come la frazione della superficie lasciata esposta dai difetti del rivestimento. La densità di corrente limite i_i è stata assunta pari a 20 mA/m², in modo da ottenere i tipici valori di densità di corrente di protezione riscontrati nei terreni ben aerati [7].

Le distribuzioni sono state ottenute per tre valori del coefficiente di difettosità corrispondenti a: superficie nuda ($\xi=1$), rivestimento danneggiato in modo significativo ($\xi=0,1$), rivestimento poco danneggiato ($\xi=0,01$).

Per l'anodo di titanio attivato (tabella 1) si è assunta una condizione al contorno semplificata di anodo non polarizzabile, con un potenziale (E_{Ti}) costante sotto erogazione di corrente. Il potenziale E_e' nel terreno in un punto immediatamente vicino all'anodo è legato alla tensione di alimentazione V' , al netto della caduta ohmica nei cavi di connessione con l'alimentatore, tramite le relazioni

$$(3) \quad V = V' - E_{Ti} = E_e'$$

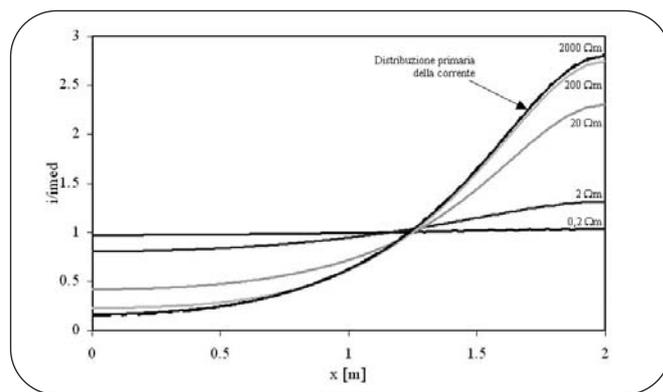


Fig. 3

Effetto della resistività elettrica sulla distribuzione della corrente al catodo. Modello bidimensionale calcolato per corrente impressa di 20,5 mA/m (10,25 mA/m² densità di corrente media al catodo), 4 m di spaziatura tra gli anodi (2S), ξ pari a 0,1.
Effects of electric resistivity on current distribution at cathode. 2D model considering 4 m anodes spacing (2S), x equal to 0.1 and mean current density value on cathode equal to 10.25 mA/m².

in cui si è introdotto la tensione di alimentazione V al netto del potenziale dell'anodo.

DISTRIBUZIONE BIDIMENSIONALE

Le Fig. 2 e 3 mostrano l'effetto della resistività del terreno sulla distribuzione del potenziale e della corrente ottenuta con il modello bidimensionale.

La distribuzione del potenziale e della corrente diventa più omogenea al diminuire della resistività, man mano che i contributi di polarizzazione all'elettrodo prevalgono. Viceversa, all'aumentare della resistività elettrica del terreno, sono sempre più importanti le cadute ohmiche e i termini di polarizzazione trascurabili. Ai valori di resistività elettrica dei terreni di solito utilizzati per la realizzazione della protezione catodica dei fondi di serbatoi (200-2000 Ωm), la distribuzione della corrente coincide, in pratica, con la distribuzione primaria che ne descrive l'andamento in sistemi puramente ohmici, senza alcun contributo elettrochimico di polarizzazione all'anodo e al catodo ($E_{Me}=E_{Ti}=0$).

DISTRIBUZIONE PRIMARIA E PROGETTAZIONE

La Fig. 4 mostra l'effetto della spaziatura tra gli anodi sulla distribuzione primaria. La corrente passa soprattutto nelle zone più vicine all'anodo. La distribuzione è omogenea solo per spaziature tra gli anodi non superiori a due volte la distanza tra l'anodo ed il fondo del serbatoio. Per spaziature maggiori di 10 volte tale distanza, la densità di corrente che raggiunge le zone più distanti del catodo è oltre 100 volte più piccola di quella che passa nelle zone più vicine. In queste condizioni, la maggior parte delle cadute ohmiche è circoscritta intorno all'anodo cosicché non si modificano in modo significativo all'ulteriore crescere della spaziatura.

Mediante interpolazione con il metodo dei minimi quadrati dei risultati delle simulazioni è stato possibile derivare alcune relazioni empiriche per la resistenza R tra anodo e catodo, la densità di corrente che raggiunge le zone del catodo più distanti dal-

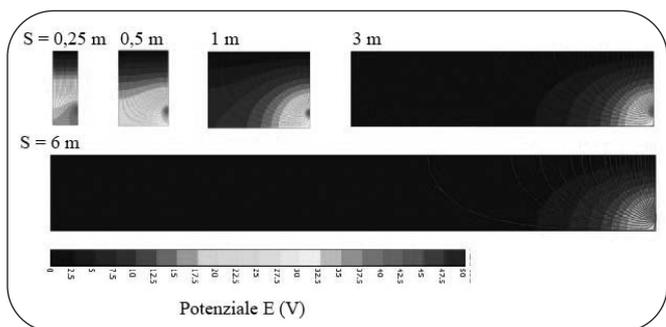


Fig. 4

Distribuzione primaria della corrente e del potenziale al variare della spaziatura (2S) tra gli anodi. Modello bidimensionale, tensione di alimentazione 50 V, resistività 2000 Ωm.

Effect of anodes spacing (2S) on primary current and potential distribution. 2D model with 50 V feeding voltage and 2000 Ω.m as soil resistivity.

l'anodo (i_{min}) e la densità che passa nelle zone più vicine (imax)

$$(4) \quad R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{L} \cdot \left(\frac{0,04}{S^2} + 1 \right) \Leftrightarrow \frac{i_{media} \cdot \rho}{V} = \frac{0,5 \cdot S}{(S^2 + 0,04)}$$

$$(5) \quad \frac{i_{min}}{i_{max}} = \frac{1}{(1,38 \cdot S^{3,52} + 1)}$$

$$(6) \quad \frac{i_{min} \cdot \rho}{V} = \frac{3}{1,1 \cdot e^{2,1 \cdot S} + 0,7}$$

valide per V compresa tra 1 e 50 V, resistività del terreno (ρ) tra 200 e 2000 Ωm, spaziatura tra gli anodi (2S) tra 0,5 e 12 m. I è la corrente erogata dall'anodo, i_{media} la densità di corrente media al catodo ed L è la lunghezza dell'anodo.

Queste relazioni sono utili per la progettazione del sistema di protezione catodica. Infatti, la densità di corrente di protezione iprot rappresenta il minimo valore consentito di densità di corrente al catodo. Tramite la relazione (6) si può quindi ottenere, fissate la tensione di alimentazione e la resistività, la massima spaziatura da non superare per raggiungere la protezione nelle zone più lontane.

Per evitare condizioni di sovraprotezione, a potenziali più negativi di -1100 mV vs SCE, la densità di corrente nelle zone più vicine all'anodo non deve eccedere 100 volte la densità di corrente di protezione, in accordo alla curva di polarizzazione (1). È opportuno, però, limitare tale rapporto ad un valore più ragionevole, pari a 10, per ottenere una distribuzione più omogenea. Ne deriva, tramite la relazione (5), un valore massimo della spaziatura tra gli anodi pari a circa 3,4 m per la distanza anodo/catodo considerata in questo lavoro (0,6 m).

Infine, tramite le (4) si può stimare la densità di corrente catodica media (i_{media}) da erogare e la

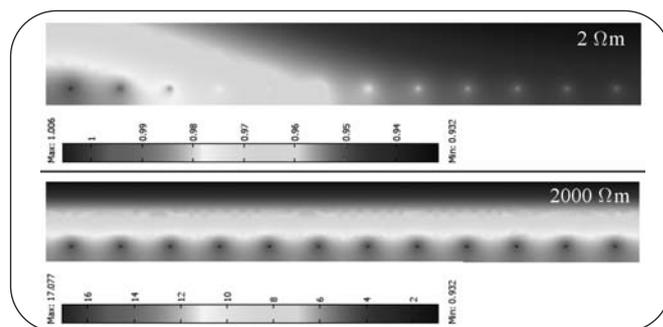


Fig. 5

Distribuzione del potenziale nel terreno per un sistema anodico composto da 12 "strip" di 6 m di lunghezza, intervallate di 0,45 m, calcolata per 2 e 2000 Ω.m di resistività del terreno, densità di corrente di protezione 20 mA/m², ξ pari a 0,1, resistenza elettrica nel distributore e nell'anodo pari rispettivamente a 0,04 e 0,48 Ω/m.

Potential distribution in soil for a 12 strips (N) CP zone. 6 m anode length (L), 0.45 m spacing, soil resistivity 2 and 2000 Ω.m, protection current density 20.5 mA/m², ξ equal to 0.1, electric resistivity into distributors and anodes 0.04 and 0.048 Ω/m respectively.

capacità di corrente dell'alimentatore, nota l'estensione della superficie da proteggere.

EFFETTO DELLA CADUTA OHMICA NEL DISTRIBUTORE E ANODO

L'effetto della caduta ohmica nel distributore e nell'anodo è stato studiato mediante un modello tridimensionale, in cui l'equazione di Laplace è stata risolta anche nell'anodo e nel distributore, considerando, per questi, la resistenza elettrica specifica riportata in Tab. 1.

La caduta ohmica nel distributore e nell'anodo rende meno omogenea la distribuzione al catodo. La densità di corrente aumenta nelle zone più vicine al punto di collegamento con l'alimentatore, che tendono così ad essere maggiormente protette, mentre le zone più lontane tendono ad essere meno polarizzate. La maggiore disomogeneità di distribuzione della corrente determina l'aumento della tensione di alimentazione richiesta, a parità di corrente.

L'effetto dipende dalla resistività del terreno. Per terreni di bassa resistività elettrica, sono le cadute nell'anodo e nel distributore che regolano la distribuzione del potenziale (Fig. 5). Viceversa, il loro effetto è secondario per resistività tra 200 e 2000 Ω.m, per le quali

	anodo	distributore)
Materiale	Titanio attivato (grid)	Titanio
Massima densità di corrente di erogazione [A/m ²]	1	-
Superficie reale dell'anodo (m ² /m)	0,048	-
Sezione (dimensioni in mm)	20x0,5 *	15x1
Sezione reale (mm ²)	1,25	15
Resistenza elettrica [Ω/m]	0,48	0,04

Tab. 1

Proprietà del sistema anodico (* valori riferiti alle dimensioni apparenti).
Properties of titanium grid anode and distributor.

la distribuzione è in primo luogo determinata dalle cadute ohmiche nel terreno.

Per questi terreni, la distribuzione della corrente è in ogni caso prossima alla distribuzione primaria stimata con il modello bidimensionale. Cioè, se le cadute ohmiche nell'anodo e nel distributore, ancorché rilevanti in termini di valore assoluto, sono relativamente modeste nei confronti della tensione di alimentazione, non alterano in modo significativo la distribuzione lungo anodo.

In effetti, la caduta ohmica nell'anodo e nel distributore riduce la tensione di alimentazione nelle zone più lontane dal punto di collegamento con l'alimentatore e, proporzionalmente, riduce anche la densità di corrente minima, in accordo alla relazione (6). Tuttavia, per la forma della curva di polarizzazione (1), è necessario che la caduta ohmica raggiunga almeno il 5% della tensione di alimentazione perché il potenziale al catodo si modifichi di 10 mV, nelle condizioni peggiori di catodo senza alcun rivestimento superficiale (che richiede elevate densità di corrente di protezione).

Individuata la massima caduta ohmica accettata (ad esempio il 5% della tensione di alimentazione), si può risalire alla massima distanza ($2L_a$) tra i distributori e al numero di anodi (N_a). Le cadute ohmiche nell'anodo e nel distributore tra il punto di ingresso della corrente (punto di collegamento con l'alimentatore) e il punto più remoto possono essere stimate in modo approssimato mediante la relazione

$$(7) \quad E_{\infty} = \frac{L_a \cdot r_a \cdot I}{4 \cdot N_a} + \frac{S \cdot r_D \cdot I \cdot N_a}{4}$$

valida per un sistema anodico collegato all'alimentatore nel punto centrale e N_a maggiore di 3.

Infine, la tensione di alimentazione al punto di collegamento (V_{in}) può essere stimata dalla tensione di alimentazione (V) nel punto più remoto (dove la densità di corrente al catodo non dovrà essere inferiore alla densità di corrente di protezione), aggiungendo a questa le cadute ohmiche nell'anodo e nel distributore valutate con la relazione (7).

CONCLUSIONI

La simulazione mediante un modello agli elementi finiti ha permesso di evidenziare gli aspetti principali della distribuzione della corrente e del potenziale in geometrie significative per la protezione catodica dei serbatoi fuori terra di grandi dimensioni. Per i terreni normalmente adottati, la distribuzione della corrente segue quella primaria, definita unicamente dalla caduta ohmica nel terreno stesso. Lo studio di questa distribuzione ha permesso di individuare relazioni empiriche utili per il calcolo della lunghezza e spaziatura degli anodi e della distanza tra i distributori.

BIBLIOGRAFIA

- [1] N.Ibl, "Fundamentals of transport phenomena in electrolytic system", "Comprehensive treatise of electrochemistry", vol.6, Plenum Press, New York, 1983: 1-64; 239-316.
- [2] F.Coeuret, A.Storck - "Éléments de Génie Electrochimique", Lavoisier Tec. Doc., Paris, 1984.
- [3] B.Mazza, T.Pastore, P.Pedefferri, G.Rondelli - "Electrochemical polarization studies of API 5L grade X65 steel in chloride solution", Proc. Int. Cong. on Metallic Corrosion, vol.I, Oxford & IBH Publishing Co. PVT.LTD., New Delhi 1987, p.501-509.
- [4] B.Mazza, T.Pastore, P.Pedefferri, G.Taccani, E.Ferrari, F.Gasparoni - "Experimental confirmation of mathematical model for the design of cathodic protection systems", Proc. Int. Cong. on Metallic Corrosion, vol.I, Oxford & IBH Publishing Co. PVT.LTD., New Delhi 1987, p.945-954.
- [5] P.Cicognani, F.Gasparoni, B.Mazza, T.Pastore, "Application of the boundary-element method to offshore cathodic protection modelling", J. of El. Soc., 137 (6) 1990: p.1689-1695.
- [6] M.Cabrini, T.Pastore, "Interferenza elettrica in prossimità di giunti isolanti di condotte per il trasporto di acqua sottoposte a protezione catodica", Proc. Giornate Nazionali sulla Corrosione e Protezione, AIM, Senigallia, 2005
- [7] L.Lazzari, P.Pedefferri, "Cathodic Protection", Polipress, Milano, 2006.

ABSTRACT

CATHODIC PROTECTION OF TANKS BOTTOM BY MEANS OF LINEAR GRID ANODES. CURRENT AND POTENTIAL DISTRIBUTION

Keywords: steel, corrosion, numeric simulation

Above ground tanks for storage of liquid hydrocarbon are often erected with secondary containment membrane installed below the tank bottom to prevent soil contamination in case of leakage.

The cathodic protection is mainly based on impressed current systems with distributed anodes installed in the space between the tank bottom and the membrane. Among available anodes, the most commonly used are the titanium grid or ribbon activated with noble metal oxides.

The configuration of the grid or ribbon anode system confined in the closed space between bottom and membrane creates specific issues concerning the electrochemical reactions occurring at anode and cathode, the ohmic drops in the anode system and the potential and current distribution at the cathode.

The paper reviews the specific aspects of this application of cathodic protection and provides results of a number of numeric simulations performed to predict the distribution of current and potential.

Distributions were modelled through 2D and 3D FEM analysis in order to evaluate effects of anodes spacing, power supply voltage, soil resistivity and ohmic drop in anodes and distributor, being fixed anode to secondary con-

tainment membrane distance (figure 1). Non linear boundary condition were applied at cathode side and a coefficient ξ was introduced to take into account about coating defects. Constant anode potential was considered.

The effect of soil resistivity on potential and current distribution over transversal direction to anode is shown in figures 2 and 3. Increasing soil resistivity makes polarization terms negligible and ohmic drop becomes more important. Current distribution approach primary distribution as soil resistivity reaches 200-2000 Ohm.m.

Even distributions are achieved for anodes spacing less than 2 times distance of anode to tank bottom (figure 4).

The results were interpolated for obtaining relationships linking feeding voltage, protection current density, maximum current density, anode spacing, soil electrical resistivity, current output, useful for cathodic protection design.

The effect of ohmic drop into distributor and anode strip was evaluated by means of 3D fem model (Table 1). Ohmic drop mainly affect potential distribution at the cathode in low resistive soils. In soil with resistivity exceeding 200-2000 Ohm.m only produces very low variation on cathode potential if ohmic drop remains less than 5% of feeding voltage.

An empirical relationship for dimensioning spacing for both distributor and anode was proposed for estimating ohmic drop into distributor and anode strip.