

Sonda di potenziale per il monitoraggio della protezione catodica nel terreno

P. Marcassoli, D. Murgia, S. Tagini

I gasdotti e le altre strutture interrate protette catodicamente sono oggetto di misure e verifiche periodiche volte a stabilire il livello di polarizzazione rispetto a intervalli normati, che stabiliscono il raggiungimento di condizioni di piena protezione, di sottoprotezione o sovraprotezione. Nel terreno, ove la resistività è elevata, è ben noto che ogni misura di potenziale include anche un contributo spurio di caduta ohmica, dovuto alle correnti circolanti nel terreno, siano esse quelle generate dal sistema di protezione catodica stesso, oppure interferenze, come quelle dovute alla trazione ferroviaria.

Nelle ispezioni, la tecnica dell'instant-off è mirata a escludere questo effetto; tuttavia, il metodo trova dei limiti nelle cosiddette aree concentrate ove non è applicabile, oppure in contesti interferiti. Nel monitoraggio con dispositivi permanenti, la distanza degli elettrodi di riferimento dalle strutture rende la caduta ohmica non trascurabile in condizioni "On". L'impiego dei coupon, simulanti falle del rivestimento, se prossimi agli elettrodi di riferimento, migliora la misura, ma non consente di mitigare a sufficienza le cadute ohmiche. Le sonde di potenziale, che incorporano elettrodo di riferimento e coupon, seppur note e utilizzate da decenni, solo negli ultimi anni, anche grazie alla spinta della normativa internazionale e italiana, hanno trovato un maggior impiego.

Recenti pubblicazioni e interventi a convegni hanno dimostrato come sia cruciale la distanza tra coupon e setto poroso dell'elettrodo di riferimento nella sonda. In questo lavoro, si approfondirà questo aspetto anche in relazione alle dimensioni del setto e all'interpretazione delle misure ottenute. Saranno illustrate misure di laboratorio, con un cenno ai primi riscontri ottenuti in campo con una sonda rame-rame solfato di nuova generazione e di diversa concezione.

PAROLE CHIAVE: ELETTRODO RAME/SOLFATO DI RAME, COUPON, CADUTA OHMICA, POTENZIALE, PROTEZIONE CATODICA;

INTRODUZIONE

La protezione catodica (PC) è una tecnica elettrochimica finalizzata a rendere ingegneristicamente trascurabili i fenomeni corrosivi nelle strutture metalliche interrate e immerse mediante la riduzione del loro potenziale. Norme come UNI EN ISO 15589-1 [1] e UNI 11094 [2] definiscono i valori soglia del potenziale di protezione, al netto delle cadute ohmiche, da assicurare al fine di prevenire la corrosione.

La valutazione dell'efficacia del sistema di protezione catodica si basa soprattutto sulla misura del potenziale della struttura, effettuata tramite un elettrodo di riferimento (ER) posizionato nello stesso elettrolita in cui è immersa la struttura metallica protetta [3 e rif. in esso citati].

Il potenziale rilevato in presenza di corrente di protezione, denominato potenziale "On" (E_{ON}), è influenzato dalla

**Paolo Marcassoli, Daniele Murgia,
Sara Tagini**

Cescor S.r.l., Via Maniago 12, 20134 Milano, Italia

posizione dell'ER rispetto alla struttura e si compone di due termini: il potenziale privo delle cadute ohmiche ($E_{IR-free}$) e la caduta ohmica (IR) nel terreno. Quest'ultima è funzione della corrente circolante, della resistività del suolo e della distanza tra struttura ed ER, e può determinare una sovrastima del livello di protezione, rendendo E_{ON} più negativo rispetto a $E_{IR-free}$.

Tra i parametri che influenzano maggiormente il contributo IR, la resistività del terreno risulta predominante: anche modesti valori di corrente possono indurre cadute di potenziale dell'ordine di decine di millivolt in suoli a bassa resistività (poche decine di $\Omega \cdot m$), fino a diversi volt in presenza di resistività elevata (diverse centinaia o migliaia di $\Omega \cdot m$).

La misura del potenziale $E_{IR-free}$ può essere effettuata mediante diverse metodologie, il cui obiettivo è annullare o minimizzare l'influenza della componente IR. Tra queste si annoverano la tecnica "On-Off" [5] e l'impiego di sonde di potenziale [6], essenziali in contesti in cui l'interruzione della corrente non sia tecnicamente realizzabile, come in aree con presenza di interferenze o nelle cosiddette aree complesse.

Il presente studio, basato su prove sperimentali condotte in laboratorio e in situ, evidenzia l'efficacia di una sonda innovativa per la misura del potenziale, costituita da un elettrodo di riferimento Cu/CuSO₄ integrata con due coupon (come definiti nella norma [2], costituenti gli "elettrodi di lavoro"), nel ridurre significativamente il contributo IR nella valutazione del potenziale di protezione. Le sonde attualmente sviluppate e trasferite all'industria presentano setti porosi di dimensione non trascurabile, principalmente per il timore di non riuscire ad assicurare un adeguato contatto elettrolitico con il terreno, spesso disomogeneo e non sempre compatto. La sonda qui in esame si differenzia da lavori precedenti soprattutto per la dimensione ridotta del setto poroso e per la distanza pressoché trascurabile rispetto ai coupon, discussa per esempio in [7], i cui effetti sono esaminati in questo lavoro.

MATERIALI E METODOLOGIA SPERIMENTALE

I test di laboratorio sono stati effettuati su una sonda con elettrodo di riferimento Cu/CuSO₄ (CSE) e doppio coupon, costituita da un corpo cilindrico in materiale plastico

avente diametro 120 mm e altezza 74 mm. La superficie sensibile dell'elemento di contatto, cioè il setto poroso in materiale ceramico, è di circa 1,8 cm². Si rimanda alla figura 1 per le immagini di questa nuova sonda.

I due coupon circolari in acciaio al carbonio hanno dimensioni differenti: il coupon da 10 cm² ha lo scopo di rilevare le interferenze in continua (CC), mentre il coupon da 2 cm² avrà in seguito lo scopo di verificare le interferenze in alternata (CA), aspetto non analizzato nella presente sperimentazione (nota: nella sua versione definitiva la sonda avrà un coupon da 1 cm² in accordo alla normativa internazionale applicabile). La distanza tra i due coupon e il setto poroso è ≤ 1 mm. L'elettrodo metallico interno è costituito da rame puro e l'elettrolita da soluzione sovrassatura di solfato di rame (con presenza di cristalli in eccesso).

Le prove sperimentali sono state eseguite in un contenitore in materiale isolante.

Quest'ultimo è stato riempito con sabbia silicea, mantenuta umida per tutta la durata delle prove, con alta resistività, intorno ai 400 $\Omega \cdot m$.

La nuova sonda è stata posata all'interno di questo elettrolita insieme a un piccolo anodo in magnesio a basso potenziale. Infatti per semplicità, in prima battuta, si è deciso di non utilizzare un sistema a corrente impressa che sarebbe stato più idoneo vista la resistività. I due coupon sono stati collegati tra loro e all'anodo. Tutti i cavi di collegamento sono stati portati in morsettiera e tra l'anodo e i coupon è stato installato un resistore da 10 Ω per poter misurare anche il valore di corrente circolante nel circuito (calcolata dal rapporto tra la caduta ohmica ai capi del resistore e la resistenza).

Le prove, attualmente in corso, prevedono le seguenti misure sperimentali (tramite voltmetro con impedenza interna $> 10 M\Omega$), eseguite sulla nuova sonda e su un elettrodo di riferimento portatile CSE posizionato a circa 10 cm da essa, nello stesso ambiente:

- misura del potenziale ON dei coupon rispetto all'elettrodo di riferimento interno della nuova sonda;
- misura del potenziale ON dei coupon rispetto all'elettrodo di riferimento portatile;
- misura della corrente circolante nel circuito tramite resistore da 10 Ω ;
- misura del potenziale OFF dei coupon rispetto all'e-

- misura del potenziale OFF dei coupon rispetto all'elettrodo di riferimento portatile.

Le misure OFF sono state acquisite per semplicità in modo rudimentale, tramite lettura diretta del display del voltmetro nell'istante di scollegamento dell'anodo, pertanto possono non risultare accurate quanto misure più

rigorose registrate con strumentazione e frequenza di acquisizione idonei.

Al fine di monitorare l'elettrodo di riferimento interno della nuova sonda, al termine del ciclo di misure sopra riportate e con anodo di magnesio scollegato per qualche minuto, si è proceduto al confronto del potenziale tra i due elettrodi.



Fig. 1 - Immagini del prototipo della nuova sonda / *Images and scheme of the prototype of the new probe.*

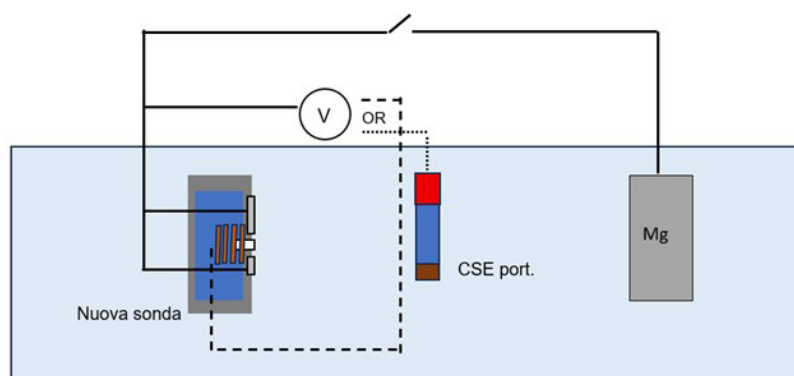


Fig.2 - Schema apparato sperimentale / *Schematics of experimental testing.*

La figura 1 mostra l'interno della sonda (elettrodo in rame in forma di spirale e soluzione sovrassatura di solfato di rame), la superficie esterna dove sono installati i N. 2 coupon e il setto poroso ceramico (in mezzo a essi) e uno schema che raffigura le componenti. La figura 2 illustra l'apparato sperimentale.

Sono state infine eseguite anche prime prove di interrimento in campo.

RISULTATI E DISCUSSIONE

Dai dati delle prove di laboratorio riassunti in tabella 1 e il cui andamento grafico è riportato nella figura 2, seppur rife-

riti a un arco temporale ancora piuttosto limitato, si osserva che la nuova sonda misura anche in condizioni ON (coupon collegati all'anodo di magnesio) valori già estremamente prossimi ai valori in OFF (dopo una settimana dall'interrimento, differenze inferiori ai 50 mV), dimostrando così di abbattere significativamente il contributo di caduta ohmica e il conseguimento di un potenziale IR-free già con misure in modalità ON, senza necessità di annullare la corrente circolante.

A differenza della misura con elettrodo di riferimento portatile, la sonda evidenzia da subito la condizione reale del coupon, in questo caso di sottoprotezione. La misura ON

tradizionale con elettrodo di riferimento portatile, poteva portare a pensare a possibili condizioni di protezione, invece non raggiunte e verificabili solo con un instant-off.

La nuova sonda è stabile nel tempo, non sono attesi essiccazione e contaminazioni, anche grazie al setto poroso di ridotte dimensioni, per cui dovrebbe essere garantita una buona durabilità.

Come evidenziato da Lazzari anche in [8], nonostante il setto poroso ceramico di ridotte dimensioni e il rischio di inadeguato contatto con l'elettrolita, esso si è dimostrato capace di attivarsi immediatamente. Verosimilmente, per saturazione delle microporosità della ceramica con soluzione di solfato di rame e per capillarità, è consentito il passaggio della corrente di una misura inferiore a 0,1 μA .

Alla luce di varie prove di interrimento sia di laboratorio sia in campo, con letto di posa anche molto differente, non si evidenziano criticità dovute alla dimensione piccola del setto poroso, che comunque garantisce un buon contatto elettrolitico con l'ambiente di utilizzo.

Il setto poroso di piccole dimensioni anzi garantisce che il potenziale misurato non sia la media pesata dei potenziali dei diversi punti di un setto più ampio, ma un valore pressoché puntuale; inoltre, assicura che la vera distanza

tra coupon e setto sia minima, ben identificabile e nota, e in ogni caso ben al di sotto dei 5 cm attualmente indicati dalle linee guida di settore, dalla normativa [2] e dagli specialisti e accademici esperti in protezione catodica nei terreni.

I risultati mostrano, relativamente ad alcune misure in OFF con elettrodo portatile, una discrepanza dell'ordine di 100-200 mV circa rispetto alle misure con sonda (sia ON sia OFF). Si ritiene che questo sia in parte dovuto alle modalità semplificate di acquisizione della misura in OFF durante i test, e che sia una dimostrazione di come misure OFF approssimative con elettrodo di riferimento portatile, spesso utilizzate anche in campo, non siano talvolta in grado di abbattere completamente le cadute ohmiche nel transitorio seguente lo spegnimento/lo scollegamento dei sistemi di protezione.

Test preliminari in campo mostrano abbattimenti della caduta ohmica, confrontata con elettrodi portatili, dell'ordine di 200-500 mV in un contesto di terreno estremamente resistivo (oltre 1'000 $\Omega\cdot\text{m}$), in presenza di notevole interferenza ferroviaria e anche stazionaria. Ulteriori test cercheranno di confrontare l'andamento e il valore assoluto dei dati anche con altre sonde di potenziale IR_{free} (StrayProbe®-Ti).

Tab.1 - Misure ON e OFF acquisite con nuova sonda ed elettrodo portatile / *ON and OFF measurements with the new probe and with portable reference electrode.*

		Data	13/02	17/02	21/02	04/03	07/03	19/03	25/03	04/04	11/04	22/04	06/05
Misure effettuate	PC	UM											
E coupon vs ER NUOVA SONDA	ON	mV vs CSE	-589	-628	-616	-654	-643	-678	-675	-651	-628	-582	-588
E coupon vs ER portatile	ON	Mv vs CSE	-1231	-1386	-1368	-1311	-1351	-1361	-1357	-1322	-1289	-1213	-1231
Corrente su resistore (da 10 Ω)	ON	mA	0,2	0,15	0,14	0,22	0,19	0,21	0,22	0,22	0,21	0,17	0,19
Densità di corrente	ON	mA/m ²	167	125	117	183	158	175	183	183	175	142	158
E coupon vs ER NUOVA SONDA	OFF	mV vs CSE	-470	-566	-606	-644	-597	-637	-644	-618	-594	-558	-576
E coupon vs ER portatile	OFF	mV vs CSE	-555	-684	-681	-752	-730	-811	-805	-818	-708	-777	-745
Δ ON-OFF NUOVA SONDA	ON-OFF	mV	-119	-62	-10	-10	-46	-41	-31	-33	-34	-24	-12
Δ ON-OFF ER portatile	ON-OFF	mV	-676	-702	-687	-559	-621	-550	-552	-504	-581	-436	-486
Δ V ER NUOVA SONDA vs ER Portatile	OFF	mV	-	25	19	-3	-14	-6	-13	-11	-1	-5	-6

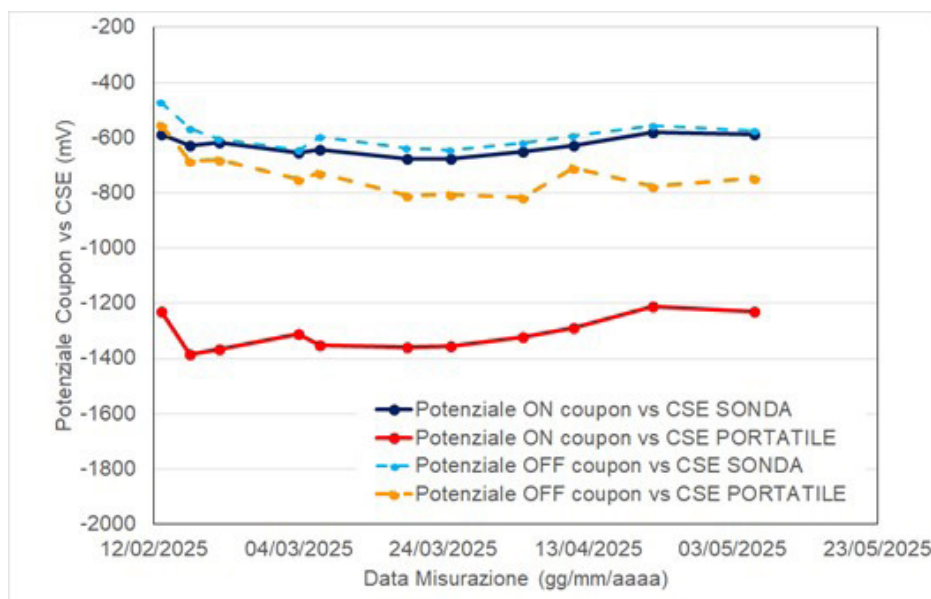


Fig.3 - Confronto grafico andamento valori nuova sonda / *Comparison of ON and OFF potential measurements with the new probe and a portable CSE reference electrode.*

CONCLUSIONI

Le normative internazionali e nazionali hanno evidenziato la necessità di installazione di sonde incorporanti elettrodo di riferimento e coupon per una più accurata valutazione dello stato di protezione catodica delle strutture interrate, andando significativamente a ridurre il contributo di caduta ohmica nella misura di potenziale.

La memoria ha illustrato, mediante risultati ottenuti da test di laboratorio e di campo preliminari, l'effetto di riduzione del contributo IR di una sonda che si discosta da quelle impiegate in passato o attualmente.

Il setto poroso, seppur di ridotte dimensioni, assicura

un'immediata attivazione in presenza di umidità e acqua, in condizioni di interrimento anche molto differente. La distanza quasi annullata tra coupon e setto poroso, dell'ordine del millimetro, assicura un abbattimento della caduta ohmica fino a valori inferiori a 50 mV.

Il contatto elettrolitico con il terreno non è compromesso dalle ridotte dimensioni del setto, che anzi, essendo piccolo, garantisce che la misura sia puntuale e non mediata, e che l'effettiva distanza tra coupon ed elettrodo di riferimento sia minimizzata, ben al di sotto dei 5 cm attualmente indicati da molti come limite.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI EN ISO 15589-1:2017 Industrie del petrolio, petrolchimiche e del gas naturale - Protezione catodica dei sistemi di condotte - Parte 1: Condotte sulla terraferma
- [2] UNI 11094:2019 Protezione catodica di strutture metalliche interrate - Criteri generali per l'attuazione, le verifiche e i controlli ad integrazione della ISO 15589-1 per sistemi di protezione catodica a corrente impressa o anodi galvanici
- [3] P. Marcassoli, D. Pesenti Bucella, M. Tironi, G. Martinelli, Elettrodo di riferimento CSE innovativo con doppio coupon per una misura più accurata del potenziale, La Metallurgia Italiana, n. 2 Feb 2022
- [4] L. Lazzari, P. Pedefferri, M. Ormellese, "Protezione catodica", Milano, Italia: Polipress, 2006.
- [5] A. Brenna, S. Beretta, R. Uglietti, L. Lazzari, M. Pedefferri, M. Ormellese, "Cathodic protection monitoring of buried carbon steel pipeline: measurement and interpretation of instant-off potential," Corrosion Engineering, Science and Technology, 2017.
- [6] N. Khan, "Using coupons and ER soil corrosion probes in applying pipeline CP criteria," Materials Performance, vol. 46, no. 4, pp. 26-30, 2007.
- [7] M. Ormellese, A. Brenna, Sonde di potenziale per applicazioni in protezione catodica: accuratezza della misura del potenziale IR-free, APCE Focus 05/2024
- [8] L. Lazzari, Diario di un corrosionista, Vol. III, 2024

Potential probe for monitoring cathodic protection in soil

Gas pipelines and other underground cathodically protected structures are subject to periodic measurements and checks aimed at establishing the level of polarization with respect to standard intervals, which establish the achievement of conditions of full protection, under- or over-protection. In the soil, where resistivity is high, it is well known that each potential measurement also includes a spurious contribution of ohmic drop, due to the currents circulating in the ground, whether those generated by the cathodic protection system itself, or interference, such as those due to railway traction. In inspections, the instant-off technique is aimed at excluding this effect, however the method finds limits in the so-called complex structures where it is not applicable, or in interfered contexts. In monitoring with permanent devices, the distance of the reference electrodes from the structures makes the ohmic drop non-negligible in "On" conditions. The use of coupons, simulating coating holidays, if close to the reference electrodes, improves the measurement, but does not allow to sufficiently mitigate the ohmic drops. Potential probes, which incorporate reference electrode and coupon, although known and used for decades, have only found greater use in recent years, also thanks to international and Italian regulations. Recent publications and conference presentations have shown how crucial the distance between the coupon and the porous septum of the reference electrode inside the probe is. In this work, this aspect will be explored also in relation to the dimensions of the porous septum and the interpretation of the measurements obtained using the probe. Laboratory and some preliminary field measurements carried out with a new generation copper-copper sulphate probe of a different design will be illustrated.

KEYWORDS: COPPER/COPPER SULPHATE ELECTRODE; COUPON; OHMIC DROP; POTENTIAL; CATHODIC PROTECTION;;

[TORNA ALL'INDICE >](#)