

Influenza della sovraprotezione sulla corrosione in ca. Analisi di un caso reale.

I. Magnifico

Da sempre, il rischio di corrosione in corrente alternata (ca) è stato legato in particolar modo ai parallelismi delle tubazioni interrate con linee di alta tensione, tanto più in quelle zone geografiche in cui la morfologia del territorio crea dei cosiddetti "Corridoi tecnologici" obbligati, e pertanto costringe alla coesistenza di servizi diversi. Più recentemente, la maggiore diffusione di reti ferroviarie alimentate in ca ha ulteriormente incrementato le fonti interferenti, mentre l'utilizzo di rivestimenti più performanti sulle condotte interrate ne ha da un lato aumentato l'isolamento dal suolo circostante, dall'altro ha aumentato il rischio di sovraprotezione rispetto a vecchi rivestimenti meno performanti o maggiormente degradati. Il presente lavoro, partendo da un caso reale riscontrato in una rete di distribuzione gas di una grande città europea, esporrà i criteri normativi da utilizzare per tenere sotto controllo il rischio di corrosione in ca ed evidenzierà come proprio la presenza contemporanea della sovraprotezione catodica possa risultare in un ciclo autocatalitico che porta alla corrosione in ca, in cui il monitoraggio diventa fondamentale per poter operare le opportune azioni correttive.

PAROLE CHIAVE: PROTEZIONE CATODICA, SOVRAPROTEZIONE, INTERFERENZA CA, MONITORAGGIO REMOTO, COUPON, STANDARD DI RIFERIMENTO

INTRODUZIONE

Esistono diversi meccanismi attraverso i quali una sorgente in ca può interferire con una struttura metallica (come mostrato in Fig.1): per accoppiamento induttivo, come effetto del campo magnetico generato rispetto ad una struttura interrata; per accoppiamento capacitivo, nel caso di una struttura fuori terra; per accoppiamento resistivo in caso di una corrente di guasto verso terra, nel caso di una condotta interrata.

Ivano Magnifico
Automa S.r.l.

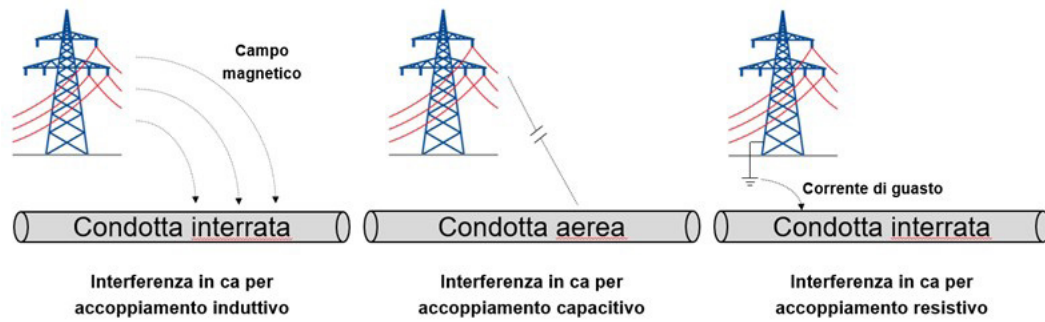


Fig.1 - Meccanismi di interferenza in ca / AC interference mechanism.

Nel caso delle condotte di trasporto per il gas metano interrate, in condizioni di normale funzionamento, il meccanismo che può generare dunque interferenza in ca è il primo di quelli mostrati, l'accoppiamento per induzione: normalmente l'effetto è maggiore all'aumentare della lunghezza delle tratte in cui la condotta e la sorgente in ca (linee di alta tensione, ferrovie esercite in ca, ...) scorrono in parallelo.

che danno indicazioni su quali parametri elettrici monitorare e quali sono i valori massimi ammessi per tali parametri.

La norma ISO 18086:2019 "Corrosione dei metalli e loro leghe - Determinazione della corrosione in corrente alternata - Criteri di protezione" [1] indica due step per la verifica dei livelli di interferenza ca ammissibili, come mostrato in Fig.2:

CRITERI DI PROTEZIONE DA CORROSIONE IN CORRENTE ALTERNATA

Esistono normative internazionali di settore specifiche,



Fig.2 - Verifica del rischio di corrosione in ca secondo ISO 18086 / AC corrosion risk assessment according to ISO 18086

Da notare in realtà come il primo step sia solo relativo ad un criterio di sicurezza per la tensione di contatto massima ammessa, e non abbia una valenza diretta nella valutazione del rischio di corrosione in ca. Le ragioni di tale valore sono anche dettagliatamente spiegate nella prefazione della norma NACE SP0177 [2]. Il criterio, pertanto, si basa su misure di densità di corren-

te effettuate attraverso un coupon di superficie definita dalla norma di $1 cm^2$, collegato alla struttura: sotto controllo non c'è solo la densità di corrente alternata come ovvio aspettarsi, ma si comincia ad intuire come anche il livello di protezione catodica possa influire sul fenomeno, e pertanto anche la densità di corrente continua (cc) deve essere misurata.

Valori analoghi si possono trovare espressi nella norma NACE SP21424-2018 "Alternating Current Corrosion on Cathodically Protected Pipelines: Risk Assessment, Mitigation, and Monitoring" [3]: dove in base al valore di densità di corrente continua misurata, sono ammessi livelli diversi di densità di corrente alternata:

- Se $J_{dc} > 1 \text{ A/m}^2$ allora $J_{ac} < 30 \text{ A/m}^2$;
- Se $J_{dc} < 1 \text{ A/m}^2$ allora $J_{ac} < 100 \text{ A/m}^2$

In questa norma viene imposto un limite massimo alla densità di corrente alternata anche nel caso in cui la densità di corrente continua fosse inferiore a 1 A/m^2 , mentre la superficie del coupon di 1 cm^2 è indicata come generalmente utilizzata, ma non obbligatoria come nel caso della norma ISO.

Nelle norme viene indicata la "Spread Resistance" (o Resistenza di Diffusione): è la resistenza ohmica attraverso un difetto del rivestimento verso terra ed è la resistenza che controlla la corrente cc o ca che attraversa un difetto ad una data tensione in cc o ca, per cui nel caso della ca vale:

$$U_{ac} = R'_s \cdot I_{ac} \quad \text{oppure} \quad U_{ac} = R_s \cdot I_{ac}$$

dove R_s è la Spread Resistance normalizzata ed espressa in $\Omega \cdot \text{m}^2$.

Sui difetti del rivestimento (o sul coupon), dove la corrente di protezione catodica raggiunge la superficie dell'acciaio, si verificano reazioni catodiche, che comportano la riduzione dell'ossigeno e l'evoluzione dell'idrogeno: in entrambe le reazioni vengono generati ioni idrossido (OH^-) che portano ad un aumento del pH all'interfaccia e quindi dell'alcalinità.

Siccome il valore della Spread Resistance dipende [4] sia dalla dimensione del difetto (diminuisce al diminuire della sua superficie), sia dal valore del pH all'interfaccia (diminuisce all'aumentare del pH), la densità di corrente continua che arriva al difetto influisce su di essa, nello specifico:

- Una minore densità di corrente comporta una diminuzione del pH e quindi un aumento della Spread Resistance
- Una maggiore densità di corrente comporta un incremento del pH e quindi la diminuzione della Spread Resistance.

Qui è dove la sovrapprotezione può avere un effetto sul-

la corrosione in ca: in presenza di un potenziale IR-free molto elettronegativo, dovuto a densità di corrente continua elevata, si verifica una diminuzione del valore della Spread Resistance ($U_{ac} = R_s \cdot I_{ac}$) tanto maggiore quanto più negativo sia il potenziale IR-free: questo comporta la possibilità di avere una significativa densità di corrente alternata anche in presenza di un valore non particolarmente elevato di tensione ca misurato.

Per quello che riguarda invece la scelta della dimensione del coupon da utilizzare, l'aumento della superficie del coupon comporta una densità di corrente media inferiore poiché la resistenza di diffusione aumenta linearmente all'aumentare del diametro del difetto e la densità di corrente diminuisce linearmente con l'area della superficie. Pertanto, la densità di corrente risulta tipicamente sottostimata quando l'area della superficie del coupon viene scelta maggiore della dimensione massima del difetto presente sulla struttura: per questo motivo nel caso di corrosione in ca le norme indicano l'utilizzo di un coupon di 1 cm^2 .

IPOTESI DI MECCANISMO DI CORROSIONE IN CA IN PRESENZA DI SOVRAPROTEZIONE [3]

Per le condotte con protezione catodica applicata, lo sviluppo della corrosione in ca richiede la coesistenza simultanea di: ca indotta, protezione catodica eccessiva, difetti del rivestimento di piccole dimensioni. Come descritto nella norma NACE SP21424, in queste condizioni:

1. La corrente alternata indotta porta alla scarica di corrente alternata sui difetti del rivestimento.
2. La densità di corrente alternata è regolata dalla tensione alternata e dalla resistenza di diffusione associata al difetto del rivestimento, attraverso la legge di Ohm.
3. La resistenza di diffusione dipende:
 - a. dalle dimensioni del difetto del rivestimento,
 - b. dalla resistività del suolo al difetto del rivestimento,
 - c. dalla chimica del suolo
 - d. dalla densità di corrente di protezione catodica nel difetto del rivestimento.

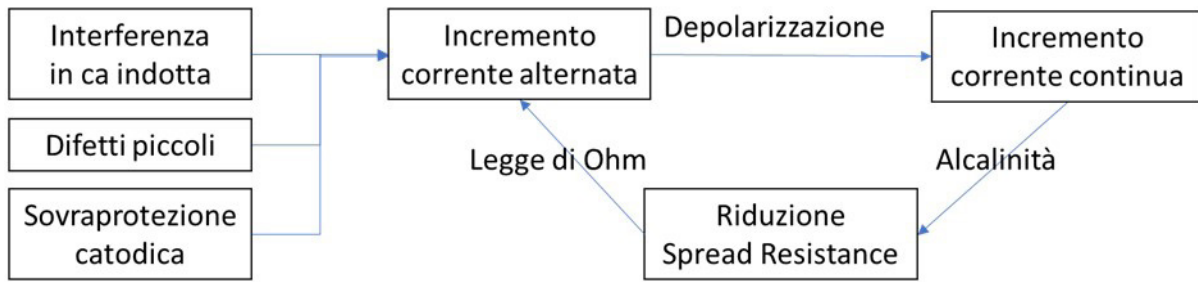


Fig.3 - Natura autocatalitica della corrosione ca su condotte protette catodicamente descritto da SP21424 / Auto-catalytic nature of AC corrosion on cathodically protected pipelines described by SP21424.

Come rappresentato in Fig.3, la densità di corrente alternata può portare alla depolarizzazione del difetto: questo comporta la necessità di una maggiore densità di corrente continua per mantenere un certo potenziale di protezione catodica. Aumentare il livello di protezione catodica per mitigare la corrosione in ca, in questo caso, ha l'effetto opposto: l'aumento della densità di corrente continua diminuisce ulteriormente la Spread Resistance al difetto del rivestimento a causa della produzione di ioni OH^- (alcalinizzazione). Attraverso livelli elevati di protezione catodica, la Spread Resistance diminuisce, aumentando così la densità di corrente alternata, ricominciando il ciclo: questo scenario si traduce in un ciclo autocatalitico che porta alla corrosione in ca. Diventa evidente pertanto che, per uscire da questo ciclo, è necessario il controllo tanto della densità di corrente alternata quanto della densità di corrente continua.

ANALISI DI UN CASO REALE DI CAMPO

Il caso che verrà mostrato è stato rilevato su un punto misura della rete di distribuzione di una grossa città europea, su un sistema di protezione catodica molto esteso, che forma un anello attorno al centro della città con delle propaggini a raggiera verso l'esterno che raggiungono anche altri comuni, con molteplici incroci con ferrovie e metro di superficie eserciti in cc e diversi parallelismi con la rete HVAC, e protetto da due alimentatori di Protezione Catodica. Il punto di misura analizzato si trova lungo un tratto che presenta alcuni km di parallelismo con la linea HVAC, con una resistività del terreno medio-bassa, compresa tra i 25 e i 50 Ωm .

Il punto di misura è equipaggiato di elettrodo di riferimen-

to CSE con coupon da 10 cm^2 integrato (per questo motivo, e per quanto detto prima, va pertanto considerato che la densità di corrente misurata sia sottostimata rispetto a quella reale), e di dispositivo di monitoraggio remoto capace di eseguire misure di instant-off sul coupon. Le misure riportate in Fig.4 corrispondono ai report giornalieri calcolati su misure eseguite alla frequenza di 1Hz (1 misura al secondo) per ogni canale di misura, di cui vengono mostrati il valore minimo, medio e massimo giornaliero, su un periodo di 4 giorni:

- Eon.dc: potenziale ON (cc) espresso in V CSE;
- Eon.ac: potenziale ON (ca) espresso in V;
- Eoff: instant-off su coupon, equivalente a potenziale IR-free (misurato, ogni secondo, dopo 1 ms di attesa dall'apertura dell'interruttore e su un intervallo di 20 ms in presenza di ca a frequenza 50Hz, equivalente ad un periodo della stessa, come indicato dalla norma ISO 22426) espresso in V CSE;
- mlon: corrente di polarizzazione del coupon (cc) espresso in mA; essendo il coupon da 10 cm^2 il valore mostrato corrisponde anche alla densità di corrente in A/m^2
- mlon.ac: corrente di polarizzazione del coupon (ca) espresso in mA; essendo il coupon da 10 cm^2 il valore mostrato corrisponde anche alla densità di corrente in A/m^2
 - o nota: il valore di densità di corrente misurato su un coupon da 1 cm^2 sarebbe significativamente maggiore di quello misurato sul coupon da 10 cm^2

Data	C...	UM	Min	Med	Max
29/10/2019 ...	Eoff		-1.443	-1.307	-1.107
29/10/2019 ...	Eon.ac		+0.148	+0.375	+0.765
29/10/2019 ...	Eon.dc		-2.268	-1.460	-0.989
29/10/2019 ...	mIon		-12.774	+14.793	+85.839
29/10/2019 ...	mIon.ac		+13.495	+34.810	+76.386
28/10/2019 ...	Eoff		-1.447	-1.323	-1.105
28/10/2019 ...	Eon.ac		+0.090	+0.415	+1.021
28/10/2019 ...	Eon.dc		-2.448	-1.533	-0.997
28/10/2019 ...	mIon		-11.915	+18.952	+89.670
28/10/2019 ...	mIon.ac		+8.681	+36.390	+91.151

Data	C...	UM	Min	Med	Max
31/10/2019 ...	Eoff		-1.429	-1.315	-1.104
31/10/2019 ...	Eon.ac		+0.192	+0.413	+0.957
31/10/2019 ...	Eon.dc		-2.100	-1.491	-0.999
31/10/2019 ...	mIon		-13.679	+16.793	+69.451
31/10/2019 ...	mIon.ac		+17.586	+38.527	+90.603
30/10/2019 ...	Eoff		-1.422	-1.315	-1.101
30/10/2019 ...	Eon.ac		+0.162	+0.424	+0.840
30/10/2019 ...	Eon.dc		-2.146	-1.497	-1.034
30/10/2019 ...	mIon		-10.755	+17.175	+71.289
30/10/2019 ...	mIon.ac		+15.679	+39.407	+78.597

Fig.4 - Report giornalieri del PM in esame / Daily reports of the MP analyzed.

In assenza di coupon, le uniche misure disponibili sarebbero Eon.dc e Eon.ac, e su queste l'unica valutazione possibile sarebbe quella relativa al primo step della ISO 18086, che verrebbe assolutamente rispettato considerando che il valore medio di tensione ca più alto sui quattro giorni mostrati (0,424 V) è nettamente inferiore alla soglia indicata di 15V.

Generalmente, un valore di tensione ca così basso, non farebbe mai sospettare un rischio concreto di corrosione in ca, ma come si può vedere dai valori relativi alle densità di corrente continua e alternata, siamo in presenza di livelli di interferenza inammissibili:

1. mIon = 15÷17 A/m²: maggiore della soglia di 1 A/ m² per la quale (secondo ISO 18086) sarebbe indifferente il valore di densità di corrente alternata
2. mIon.ac = 35÷39 A/m²: maggiore della soglia di 30 A/ m² indicati dalla ISO 18086 e dalla NACE SP21424.

La spiegazione di tale situazione è data appunto dal forte livello di sovrapprotezione catodica presente, rappresentata da valori di potenziale IR-free più negativi di -1,3 V CSE e valori di densità di corrente continua molto elevati, in quanto il punto di misura è situato in una zona di interferenza catodica generata dai sistemi di metro e ferrovia eserciti in cc. Questo comporta un abbattimento del valore della Spread Resistance, al punto da generare una densità di corrente alternata superiore ai limiti ammessi anche in presenza di una tensione ca molto bassa. L'evidenza maggiore della dipendenza di questa condizione dalla sovrapprotezione, si è mostrata quando, a causa di un malfunzionamento, uno dei due alimentatori che protegge il sistema di protezione catodica si è spento, modificando i valori misurati sul punto misura come in Fig.5:

Data	C...	UM	Min	Med	Max
20/01/2020 ...	Eoff		-1.416	-1.310	-1.087
20/01/2020 ...	Eon.ac		+0.092	+0.236	+0.492
20/01/2020 ...	Eon.dc		-1.857	-1.440	-1.023
20/01/2020 ...	mIon		-8.631	+16.332	+58.170
20/01/2020 ...	mIon.ac		+9.635	+28.438	+61.525
19/01/2020 ...	Eoff		-1.396	-1.310	-1.116
19/01/2020 ...	Eon.ac		+0.076	+0.238	+0.535
19/01/2020 ...	Eon.dc		-1.793	-1.427	-1.095
19/01/2020 ...	mIon		-4.726	+14.276	+49.089
19/01/2020 ...	mIon.ac		+8.603	+28.496	+61.727

Data	C...	UM	Min	Med	Max
22/01/2020 ...	Eoff		-1.334	-1.063	-0.888
22/01/2020 ...	Eon.ac		+0.098	+0.389	+0.901
22/01/2020 ...	Eon.dc		-1.844	-1.067	-0.792
22/01/2020 ...	mIon		-3.806	+0.072	+19.266
22/01/2020 ...	mIon.ac		+2.389	+12.341	+26.542
21/01/2020 ...	Eoff		-1.419	-1.197	-1.005
21/01/2020 ...	Eon.ac		+0.038	+0.243	+0.731
21/01/2020 ...	Eon.dc		-1.889	-1.254	-0.951
21/01/2020 ...	mIon		-9.063	+6.872	+59.259
21/01/2020 ...	mIon.ac		+4.655	+20.682	+68.503

Fig.5 - Report giornalieri del PM in esame / Daily reports of the MP analyzed.

Il giorno 21/01 lo spegnimento di uno dei due alimentatori comporta una riduzione della corrente di protezione, con il risultato che, in corrispondenza ad uno shift positivo del potenziale IR-free da -1,3V CSE a -1,06 V CSE, la densità di corrente alternata sia diventata meno della metà, passando da valori medi giornalieri di 28 A/m² a valori di 12 A/m² possibilmente di nuovo compatibili con i criteri di

ammissibilità espressi dalle norme (va ricordato che essendo la misura fatta su coupon da 10 cm², il risultato è sottostimato rispetto all'utilizzo di un coupon da 1 cm²). L'andamento è evidente anche in Fig.6, dove è mostrata l'evoluzione dei valori medi giornalieri nelle due settimane a cavallo dello spegnimento dell'alimentatore:

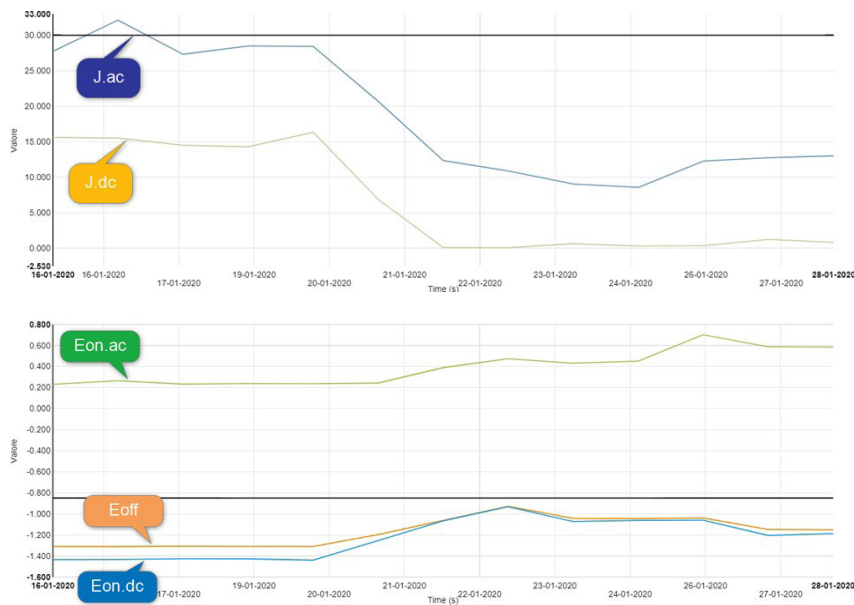


Fig.6 - Andamento dei valori medi giornalieri misurati sul PM in esame in corrispondenza al malfunzionamento dell'alimentatore / Trend of the daily average values measured on the analysed MP in correspondence with the malfunctioning of the T/R.

In corrispondenza della diminuzione della densità di corrente di protezione (J.dc) c'è ovviamente un contemporaneo shift positivo dei valori della misura di potenziale IR-free (Eoff): questo porta alla riduzione dei valori della densità di corrente alternata (J.ac) a valori ammissibili (e ad un leggero innalzamento dei valori di tensione ca in termini di valore assoluto, che comunque quasi triplica rispetto ai valori misurati in condizioni di sovraprotezione). Purtroppo, da un punto di vista di gestione del sistema di protezione catodica, questo presenta delle criticità che nell'ottica globale non consentono una facile gestione della problematica semplicemente riducendo la corrente erogata dagli alimentatori, dal momento che questo comporterebbe il manifestarsi di problematiche per raggiungere invece i livelli di protezione in altre zone del Sistema. Per questo motivo sono state valutate delle soluzioni per mitigare localmente queste interferenze in ca, la cui installazione è attualmente in gestione.

È interessante notare come il comportamento mostrato si confermi anche nel lungo periodo, come mostrato in Fig.7: fintanto che il potenziale IR-free rimane in valori di protezione, ma senza sovraprotezione, la densità di corrente alternata rimane entro i limiti di ammissibilità; non appena il valore del potenziale IR-free ritorna su valori di sovraprotezione, anche la densità di corrente alternata supera i limiti di ammissibilità confermando pertanto la forte influenza che la sovraprotezione ha sulla corrosione in ca.

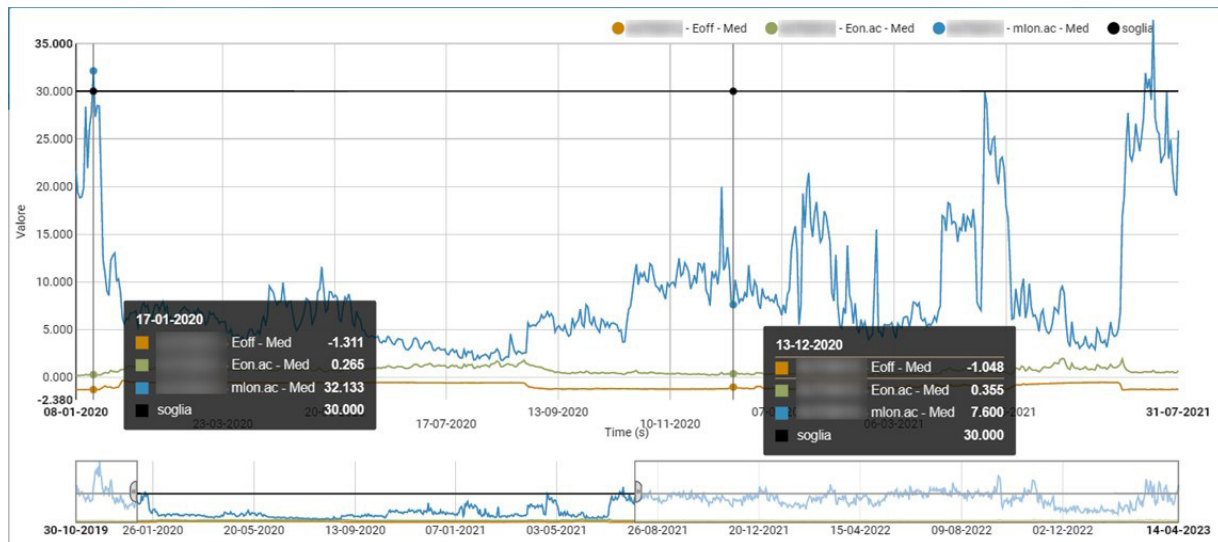


Fig.7 - Andamento dei valori medi giornalieri misurati sul PM in esame su un arco temporale di 19 mesi / Trend of the daily average values measured on the analysed MP over a period of 19 months.

CONCLUSIONE

Come verificato anche nella situazione reale di campo, in presenza di interferenza alternata, una condizione di sovrapprotezione è in grado di accelerare in modo significativo il fenomeno di corrosione in corrente alternata: una maggiore densità di corrente di protezione catodica aumenta l'alcalinità all'interfaccia del difetto e ne abbassa il valore di Spread Resistance.

Un valore di Spread Resistance troppo basso, in presenza di interferenza alternata, può portare a valori medi di densità di corrente alternata superiori ai valori limite ammessi, anche in presenza di valori di tensione ca molto inferiori alla soglia indicata dal primo step di verifica della norma ISO 18086 ($V_{ac} = R_s * I_{ac}$).

Per questo motivo, anche se risulta esserne la forza motrice, non è possibile stabilire un criterio affidabile che si basi sul solo valore della tensione ca, dal momento che

il processo è pilotato dal valore della Spread Resistance e pertanto sarà dipendente dalle dimensioni del difetto, dal tipo di terreno e dalla modifica dell'alcalinità locale generata dalla densità di corrente continua che arriva sul difetto/coupon.

L'utilizzo dei coupon si dimostra pertanto fondamentale per poter tenere sotto controllo contemporaneamente sia la sovrapprotezione che le densità di corrente continua e alternata, e per questo motivo un dispositivo di monitoraggio remoto che permetta di monitorare tutte queste grandezze in contemporanea diventa necessario, soprattutto con la possibilità di poter gestire contemporaneamente due coupon: quello con dimensione variabile (p.e.: 10 cm²) per la verifica dei livelli di protezione e sovrapprotezione e della densità di corrente continua, e quello da 1 cm² per la verifica della densità di corrente alternata.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ISO 18086:2019 "Corrosion of metals and alloys - Determination of AC corrosion - Protection criteria"
- [2] NACE SP0177-2019 "Mitigation of Alternating Current and Lightning Effects on Metallic Structures and Corrosion Control Systems"
- [3] NACE SP21424-2018 "Alternating Current Corrosion on Cathodically Protected Pipelines: Risk Assessment, Mitigation, and Monitoring"
- [4] L.V. Nielsen, M.B. Petersen, L. Bortels, J. Parloungue; "Effect of Coating Defect Size, Coating Defect Geometry, and Cathodic Polarization on Spread Resistance: Consequences in relation to AC Corrosion Monitoring"; Proceedings CEOCOR Congress 2010, Bruges, Belgium.

Influence of overprotection on AC corrosion. Analysis of a real case.

The risk of AC corrosion has always been linked to the parallelisms of underground pipelines with HVAC lines, especially in those geographical areas where the morphology of the territory creates obligatory so-called "technological corridors", and therefore forces the coexistence of different services over long distances. More recently, the greater diffusion of AC-powered railway networks has further increased the AC interfering sources, while the use of more performing coatings on underground pipelines has on the one hand increased their insulation from the surrounding soil, and on the other has increased the risk of overprotection compared to old, less performing, or more degraded coatings.

This paper, starting from a real case found in a gas distribution network in a European big city, will present the normative criteria to be used to keep the AC corrosion risk under control, and will highlight how precisely the simultaneous presence of cathodic overprotection may result in an autocatalytic cycle leading to accelerated AC corrosion, in which monitoring becomes essential in order to be able to carry out on time the appropriate corrective actions.

KEYWORDS: CATHODIC PROTECTION, OVERPROTECTION, AC INTERFERENCE, REMOTE MONITORING, COUPON, REFERENCE STANDARD

[TORNA ALL'INDICE >](#)