Nuovi approcci per la valutazione della sicurezza degli impianti di terra a frequenza industriale

R. Andolfato, L. Fellin, R. Turri
Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Università di Padova

Introduzione

Viene valutata la possibilità di individuare classi di impianti di terra a sicurezza garantita in ogni condizione di mezzo disperdente o predeterminata in funzione della resistività del mezzo stesso.
Nella prima parte del lavoro vengono richiamate le espressioni che consentono il calcolo dei fattori di riduzione da applicare alle tensioni di contatto e di passo indisturbate per avere le corrispettive tensioni effettive (che considerano la presenza del corpo umano).
Successivamente vengono avanzate delle proposte di applicazione di tali coefficienti agli impianti di terra di utenze alimentate da reti gestite con centro stella isolato da terra: viene quindi introdotto il concetto di resistività critiche di un impianto di terra e mostrato come le difficoltà alla realizzazione di un impianto di terra non sono sempre crescenti con l'aumentare della resistività del mezzo disperdente. Tali considerazioni vengono poi estese al caso di impianti di terra di utenze alimentate da reti gestite con centro stella connesso a terra.
Le note conclusive del lavoro lasciano intravvedere la possibilità di utilizzo pratico dei concetti esposti per la definizione di una serie normalizzata di impianti di terra per cabine di trasformazione MT/bt a sicurezza predeterminata (al limite esenti dall'onere della misura delle tensioni di contatto e di passo), oppure per l'ottimizzazione della geometria di dispersori di stazioni AT/AT o cabine primarie AT/MT.

1. Effetti del corpo umano sulle tensioni di contatto e di passo

In generale, si può affermare che la presenza del corpo umano sulla superficie di un mezzo disperdente interessato da un campo di corrente prodotto da un complesso disperdente qualsiasi ha effetti solo localmente nelle immediate vicinanze della zona di appoggio dei piedi.
Gli effetti locali del campo di corrente si traducono in favorevoli riduzioni delle tensioni sia di passo che di contatto, riduzioni che a volte possono essere sostanziali [1].
E' possibile considerare la presenza del corpo umano già all'atto della misura simulandone l'impedenza interna e la resistenza di contatto verso terra. Secondo le norme CEI 11-8 e la recente guida CEI 11-34, l'impedenza interna del corpo umano viene simulata utilizzando un voltmetro con impedenza puramente resistiva pari a R_h = 1000 Ω (in realtà, il corpo umano corrisponde ad una impedenza capacitiva ma, a frequenza industriale, la capacità - localizzata sostanzialmente nell'epidermide - può essere senz'altro trascurata).
Per considerare la resistenza di contatto tra corpo umano e suolo, le stesse norme stabiliscono di simulare ogni piede con una superficie piana premuta sul terreno con una forza pari a 250 N.
Le prescrizioni CEI sul valore della resistenza di simulazione del corpo umano e sulla resistenza di contatto tra corpo umano e suolo sono convenzionali, ma trovano ragione nel tentativo di fornire dei valori misurati delle tensioni di passo e di contatto possibilmente fedeli alla realtà e quindi prossimi alle tensioni di guasto effettive.

2. Calcolo dei fattori di riduzione

2.1 Mezzo disperdente omogeneo

Si consideri un disco metallico di raggio b giacente sulla superficie di un mezzo omogeneo isotropo lineare di resistività ρ. E' noto che la resistenza verso l'infinito di tale disco può essere calcolata come

$$R_p = \frac{\rho}{4b} \qquad (1)$$

Inoltre, la resistenza mutua di tale disco nei confronti di un disco identico posto a distanza d (distanza tra i centri) nelle stesse condizioni di mezzo disperdente vale

$$R_m = \frac{\rho}{2\pi d}\ , \qquad (2)$$

mentre la resistenza verso l'infinito dei due dischi in parallelo può essere espressa come

$$R_{pc} = \frac{1}{2}(R_p + R_m) \qquad (3)$$

La (3) fornisce con buona approssimazione la resistenza interna del generatore

equivalente da utilizzare per il calcolo delle tensioni di contatto effettive.
La resistenza del circuito chiuso a terra tra due dischi invece può essere espressa con la:

$$R_{pp} = 2(R_p - R_m) \qquad (4)$$

La (4), analogamente, fornisce con buona approssimazione la resistenza interna del generatore equivalente da utilizzare per il calcolo delle tensioni di passo effettive.
I dati dimensionali da introdurre nelle relazioni (1) e (2) sono il raggio del piede "standard", b, fissato pari a circa 8 cm (corrispondente ad una superficie di 200 cm^2) e la distanza tra i due piedi, d, pari rispettivamente a 0.16 m per la valutazione delle tensioni di contatto ed 1 m per la valutazione delle tensioni di passo.
In presenza del corpo umano i circuiti equivalenti devono essere chiusi sulla resistenza R_h. I circuiti così ottenuti sono riportati in fig.1 dove si sono indicate con V_{co} e V_{po} rispettivamente le tensioni di contatto e di passo indisturbate valutate tra i punti A-B (mani-piedi) e C-D (piede-piede).

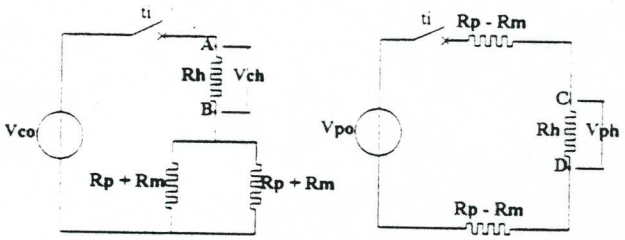

Fig.1: Circuiti equivalenti per la determinazione delle tensioni di contatto e di passo effettive

Utilizzando i valori di b e d sopra definiti, dai circuiti equivalenti di fig.1 si ottengono i fattori di riduzione delle tensioni di contatto, F_{ch}, e di passo, F_{ph}, (fattori correttivi per i quali occorre moltiplicare le tensioni di passo e di contatto indisturbate per ottenere le corrispondenti tensioni effettive nel caso di mezzo disperdente omogeneo, isotropo e lineare):

$$F_{ch} = \frac{V_{ch}}{V_{co}} = \frac{1}{1 + 2.060\frac{\rho}{R_h}} \qquad (5)$$

$$F_{ph} = \frac{V_{ph}}{V_{po}} = \frac{1}{1 + 5.932\frac{\rho}{R_h}} \qquad (6)$$

2.2 Mezzo disperdente omogeneo a due strati

Nel caso di mezzo disperdente omogeneo a due strati, oppure di mezzo disperdente omogeneo ricoperto in superficie da uno strato artificiale, si può dimostrare [2,3] che, detta ρ la resistività del mezzo sottostante (omogeneo isotropo e lineare), e ρ_s la resistività dello strato superficiale (anch'esso omogeneo isotropo e lineare), la resistenza verso l'infinito di un disco metallico avente raggio b giacente in superficie può essere espressa con la:

$$R_p = \frac{\rho_s}{4b}\left(1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}\right)^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h_s}{b})^2}}\right) \qquad (7)$$

dove con h_S si è indicato lo spessore dello strato superficiale.
Si può dimostrare ancora che la resistenza mutua di tale disco nei confronti di un disco uguale posto a distanza d da esso (distanza tra i centri dei dischi) nelle stesse condizioni di mezzo disperdente vale:

$$R_m = \frac{\rho_s}{2\pi d}\left(1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}\right)^n}{\sqrt{1 + (2n\frac{h_s}{d})^2}}\right) \qquad (8)$$

Le (7) e (8) unite alle (3) e (4) consentono di determinare con buona approssimazione le resistenze interne da assegnare ai generatori di forza elettromotrice equivalenti nei circuiti per la determinazione delle tensioni di guasto effettive (circuiti di fig. 1).
Introducendo infine la funzione [3]:

$$F(X) = 1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}\right)^n}{\sqrt{1 + (2nX)^2}} \qquad (9)$$

e sostituendo a b e d i rispettivi valori numerici, dalle (7) e (8) si ottengono le seguenti espressioni per F_{ch} e F_{ph},:

$$F_{ch} = \frac{1}{1 + \left[1.56F(12.5h_S) + 0.5F(6.25h_S)\right]\frac{\rho_s}{R_h}} \qquad (10)$$

$$F_{ph} = \frac{1}{1 + \left[6.25F(12.5h_S) - 0.32F(h_S)\right]\frac{\rho_s}{R_h}} \qquad (11)$$

2.3 Limiti di applicazione dei fattori di riduzione

La criticità nell'applicare le (5) e (6) aumenta all'aumentare della resistività del mezzo disperdente. Mediante confronto con dettagliate simulazioni numeriche è stato verificato che, nel caso di mezzo disperdente omogeneo con resistività fino a 1000 Ωm, queste espressioni possono essere applicate con soddisfacente approssimazione alle seguenti condizioni:

- per la (5): distanza dal dispersore non inferiore a 1 m;
- per la (6): distanza dal dispersore non inferiore a 0.5 m.

L'applicazione delle (5) e (6) in punti sulla superficie del mezzo disperdente eccessivamente vicini al dispersore dà luogo ad approssimazioni delle tensioni di contatto e di passo effettive per difetto: gli errori divengono sensibili solamente in punti in cui le tensioni di contatto e di passo sono ridotte e solitamente non pericolose.

Le (5) e (6) possono essere applicate anche nel caso in cui il mezzo disperdente non sia omogeneo, purché sia garantita la presenza di uno strato superficiale omogeneo avente spessore adeguato: in pratica, uno spessore dello strato superficiale pari a 10 m è in grado di "mascherare" variazioni della resistività degli strati profondi almeno fino ad un ordine di grandezza rispetto alla resistività in superficie.

La criticità nell'applicare le (10) e (11) aumenta al tendere verso la condizione in cui il mezzo disperdente ha uno strato superficiale a bassa resistività con spessore di poco superiore alla profondità di interramento del dispersore, unitamente ad uno strato profondo di elevata resistività.

Nel caso particolarmente critico in cui il mezzo disperdente è a doppio strato con parametri ρ_s = 100 Ωm, h_s = 0.75 , ρ = 1000 Ωm, è stato verificato che le (10) e (11) possono essere applicate alle seguenti condizioni:

- per la (10): distanza dal dispersore non inferiore a 1 m;
- per la (11): distanza dal dispersore non inferiore a 0.5 m.

Applicando le (10) e (11) in punti sulla superficie del mezzo disperdente eccessivamente vicini al dispersore si commettono errori sulla valutazione delle tensioni di contatto e di passo effettive in difetto.

Le (10) e (11) possono essere applicate anche al caso di mezzi disperdenti omogenei a più strati se i due strati superficiali possono ritenersi "predominanti". Ciò accade ad esempio nel caso di uno strato isolante superficiale artificiale ed uno strato sottostante "naturale" di considerevole spessore.

Le limitazioni all'uso delle (10) e (11) ricavate nel caso di mezzo disperdente a due strati non sono solitamente eccessivamente penalizzanti.

Se a ciò si aggiunge che le perturbazioni al campo di corrente generato da un dispersore da parte di un sottile strato isolante superficiale non sono solitamente significative, si può pensare di valutare la tensione da assegnare al generatore equivalente (tensione di contatto o di passo indisturbata a seconda del caso) in assenza dello strato isolante superficiale aggiuntivo: ciò è cautelativo nei confronti della sicurezza e consente di ricondurre lo studio di un mezzo disperdente a tre strati allo studio di un mezzo a due strati con notevole vantaggio da un punto di vista computazionale.

3. Applicazione dei fattori di riduzione

3.1 Sistemi con centro stella isolato

Nelle reti gestite con centro stella isolato le correnti di guasto monofase a terra sono essenzialmente legate alle correnti capacitive di richiusura su cavi e linee aeree.

In tali reti, la corrente di guasto monofase a terra I_g può essere espressa, nei limiti in cui sia lecito fare riferimento a valori di impedenze concentrate, mediante la:

$$I_g = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{R_t^2 + X_c^2}} \qquad (12)$$

dove U è la tensione nominale del sistema, R_t è la resistenza dell'impianto di terra dell'utente e X_C è la reattanza capacitiva verso terra della rete di alimentazione.

3.1.1 Mezzo disperdente omogeneo

Si consideri un impianto di terra qualsiasi immerso in un mezzo omogeneo (almeno in uno strato superficiale con spessore non inferiore a 10 m) e disperdente in esso la corrente di guasto monofase a terra I_t.

Per la linearità del sistema, fissato un riferimento cartesiano sulla superficie del mezzo disperdente, il potenziale di terra indisturbato generato dall'impianto sarà in generale esprimibile con una relazione del tipo:

$$V_t(x,y) = K_t(x,y)\rho I_t \qquad (13)$$

dove la funzione $K_t(x,y)$ dipende solamente dalla geometria del dispersore.

Per le tensioni di passo e di contatto indisturbate si possono utilizzare espressioni del tutto analoghe: in particolare, con riferimento ai loro valori massimi, si potrà scrivere:

$$Vco_{max} = K_c \rho I_t ; \quad Vpo_{max} = K_p \rho I_t \qquad (14)$$

dove K_c e K_p sono due costanti che ancora dipendono solamente dalla geometria del dispersore. Dalle (14) si vede che K_c e K_p sono determinabili in base ai valori massimi di tensione di contatto e di passo indisturbate. Queste ultime sono valutabili analiticamente, nel caso di geometrie molto semplici, oppure con opportune procedure numeriche tipo quelle proposte in [4,5,6].

Si noti che K_c, a differenza di K_p, deve necessariamente venire valutato su di un'area ben definita circostante la zona in cui è presumibile la presenza di masse. Diversamente, si avrebbe che la massima tensione di contatto indisturbata sarebbe sempre equivalente alla tensione totale di terra del dispersore.

Moltiplicando le tensioni di contatto indisturbate (14) per i rispettivi fattori di riduzione (5) e (6), si ottengono le corrispondenti tensioni effettive:

$$Vch_{max} = K_c \rho I_t \frac{1}{1 + 2.06\frac{\rho}{R_h}} \qquad (15)$$

$$Vph_{max} = K_p \rho I_t \frac{1}{1 + 5.93\frac{\rho}{R_h}} \qquad (16)$$

Una volta che sia stabilita la rete di alimentazione dell'impianto rimane fissato il valore di I_t: inoltre, come detto, il valore di R_h è fissato convenzionalmente. Pertanto, le (15) e (16) sono funzioni della sola resistività ed il loro andamento è del tipo crescente in modo asintotico fino ai valori limite, per $\rho \to \infty$, pari a:

$$\lim_{\rho\to\infty} Vch_{max} = \frac{K_c R_h I_t}{2.06} \qquad (17)$$

$$\lim_{\rho\to\infty} Vph_{max} = \frac{K_p R_h I_t}{5.93} \qquad (18)$$

Evidenziando i limiti asistotici nelle (15) e (16) si ha:

$$Vch_{max} = \frac{K_c R_h I_t}{2.06} \frac{\rho}{\frac{R_h}{2.06} + \rho} = \frac{K_c R_h I_t}{2.06} v_c(\rho) \qquad (19)$$

$$Vph_{max} = \frac{K_p R_h I_t}{5.93} \frac{\rho}{\frac{R_h}{5.93} + \rho} = \frac{K_p R_h I_t}{5.93} v_p(\rho) \qquad (20)$$

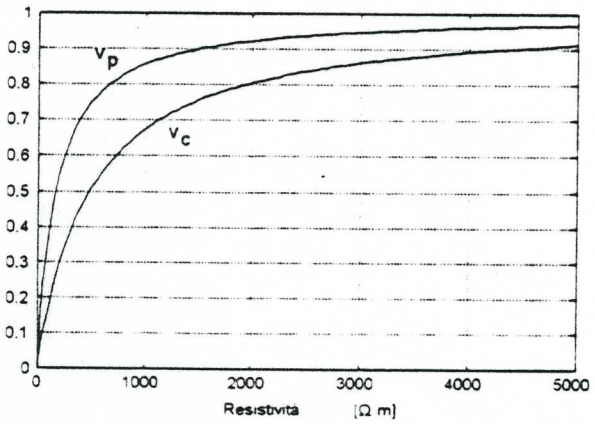

Fig.2: Massime tensioni di contatto e di passo normalizzate in funzione della resistività del mezzo disperdente.

L'andamento delle funzioni $v_c(\rho)$ e $v_p(\rho)$ (massime tensioni di contatto e di passo normalizzate per $\rho \to \infty$) è riportato in fig. 2, la quale si presta alle seguenti importanti osservazioni.

I terreni poco resistivi (aventi resistività fino a qualche centinaio di Ωm), ai fini della sicurezza di un impianto di terra sono i più favorevoli ma anche i più sensibili alle variazioni di resistività (piccole variazioni di resistività danno luogo a grandi variazioni delle tensioni di contatto e di passo effettive).

I terreni molto resistivi (aventi resistività dell'ordine del migliaio di Ωm), per contro, consentono di raggiungere condizioni di sicurezza con difficoltà ma sono praticamente insensibili alle variazioni di resistività. Oltre certi valori di resistività, le condizioni di sicurezza di un impianto di terra sono praticamente indipendenti dalla resistività stessa.

Ora, dal momento che R_t è proporzionale alla resistività del mezzo disperdente (per l'ipotesi di linearità del mezzo), si può porre: $R_t=K_r\rho$ e, in base alla (12), possiamo scrivere:

$$Vch_{max} = K_c \rho \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{(K_r \rho)^2 + X_c^2}} \frac{1}{1 + 2.06\frac{\rho}{R_h}} \quad (21)$$

$$Vph_{max} = K_p \rho \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{(K_r \rho)^2 + X_c^2}} \frac{1}{1 + 5.93\frac{\rho}{R_h}} \quad (22)$$

Dalle (21) e (22) si ha che le tensioni di passo e di contatto effettive non solo non crescono indefinitamente con la resistività, ma per resistività elevate addirittura sono decrescenti (risultando nulle per $\rho \to \infty$).

Le derivate di (21) e (22) rispetto a ρ si annullano rispettivamente per i seguenti valori:

$$\rho_{cc} = \sqrt{\frac{R_h X_c^2}{2.06 K_r^2}} \quad (23)$$

$$\rho_{cp} = \sqrt{\frac{R_h X_c^2}{5.93 K_r^2}} \quad (24)$$

Le resistività ρ_{cc} e ρ_{cp} stanno ad indicare i valori critici di resistività in corrispondenza dei quali il generico dispersore di un'utenza alimentata da rete con centro stella isolato da terra presenta rispettivamente i massimi valori di tensioni di contatto e di passo.

Dato un generico dispersore, se esso soddisfa contemporaneamente alle condizioni:

$$Vch_{max}(\rho_{cc}) \le Vpc_{max\,CEI}$$
$$Vph_{max}(\rho_{cp}) \le Vpc_{max\,CEI} \quad (25)$$

si può dire che tale dispersore è sicuro indipendentemente dalla resistività del mezzo disperdente (dispersore intrinsecamente sicuro).

Se invece una delle condizioni (25) non è verificata, si avrà un dispersore che garantisce l'osservanza dei limiti imposti dalle norme CEI solo per valori di resistività al di fuori di una fascia di pericolo.

Per la determinazione di tale fascia si devono risolvere le equazioni che si ottengono eguagliando le (21) e (22) al limite Vpc_{max} consentito dalle norme CEI.

Dalla prima di tali equazioni si otterranno due valori di resistività che si possono denominare ρ_{cmin} e ρ_{cmax}. Analogamente, dalla seconda di tali equazioni si otterranno due valori di resistività che si possono denominare ρ_{pmin} e ρ_{pmax}.

L'impianto sarà sicuro per:

$$\rho \le \inf(\rho_{cmin}, \rho_{pmin}) \quad (26\,a)$$

oppure:

$$\rho \ge \sup(\rho_{cmax}, \rho_{pmax}) \quad (26\,b)$$

Solitamente, l'intervallo di resistività di pericolo per le tensioni di passo è compreso nell'intervallo di pericolo delle tensioni di contatto.

3.1.2 Mezzo disperdente omogeneo con strato isolante superficiale

Nelle stesse condizioni al contorno di cui al punto 2.1, si supponga di stendere sulla superficie del mezzo disperdente, in corrispondenza al dispersore, un sottile strato isolante omogeneo isotropo e lineare.

Se il sottile strato isolante ha resistività dell'ordine dei $10^5\,\Omega$m (resistività tipiche dei manti bituminosi), i fattori di riduzione sopra definiti assumono valori decisamente ridotti indipendentemente dalla resistività del sottostante mezzo disperdente: sopra lo strato isolante superficiale le tensioni di contatto e di passo effettive risultano fortemente attenuate rispetto alle rispettive tensioni indisturbate ed in pratica sempre contenute entro i limiti di cui alle norme CEI 11-8 e CEI 11-37.

Se lo strato isolante superficiale viene ad interessare un'area che si estende fino ad oltre 1 m dalla zona in cui sono presenti masse connesse al dispersore, si ha che tutte le tensioni di contatto indisturbate vengono ridotte del fattore F_{ch}, per cui le tensioni di

contatto effettive risultano tutte entro i limiti normativi.
In tal caso, la conformità del dispersore alle norme può essere valutata solamente con riferimento alle tensioni di passo effettive al di fuori della zona interessata dalla ricopertura dello strato isolante superficiale (le tensioni di passo effettive sopra l'area ricoperta con lo strato isolante superficiale vengono ridotte del fattore F_{ph}, e pertanto risultano anch'esse sempre entro i limiti di cui alle norme CEI 11-8 e CEI 11-37).
In tale situazione il dispersore possiede la sola resistività critica espressa dalla (24) ed è intrinsecamente sicuro se vale la (25 b).

3.2 Sistemi con centro stella connesso a terra

Nelle reti gestite con centro stella connesso a terra un guasto monofase a terra rappresenta un cortocircuito e la conseguente corrente può assumere valori rilevanti: tale corrente può essere calcolata mediante la:

$$I_g = \frac{\sqrt{3}\,U}{|Z_d + Z_i + Z_0 + 3R_t|} \qquad (27)$$

dove U rappresenta la tensione nominale del sistema, Z_d, Z_i, Z_0 le impedenze dei bipoli alle sequenze rispettivamente diretta, inversa e omopolare visti dalla sezione di guasto ed R_t la resistenza dell'impianto di terra dell'utente derivato.
La dipendenza della corrente di guasto monofase a terra dalla reale configurazione del sistema ne rende arduo il calcolo: in pratica solo l'ente distributore è in grado di fornire valori di I_g attendibili e peraltro solitamente prudenziali. Diversamente dalle reti con centro stella isolato, la I_g fornita dalla (27) dipende dal punto particolare della rete in cui si verifica il guasto. Inoltre, è opportuno tenere in debita considerazione ogni fenomeno di drenaggio di porzioni della corrente di guasto da parte di circuiti di ritorno ausiliari al mezzo disperdente (non confondendo I_g con la corrente I_t dispersa dall'impianto).

3.2.1 Mezzo disperdente omogeneo

Si consideri il dispersore di un impianto derivato da una rete gestita con centro stella connesso a terra in un punto in cui la corrente di guasto monofase a terra vale I_g: si supponga il mezzo disperdente omogeneo.
Trascurando per semplicità di trattazione il contributo alla dispersione da parte dei sostegni della linea aerea di alimentazione, la situazione di guasto monofase a terra può essere rappresentata schematicamente come in fig.3.

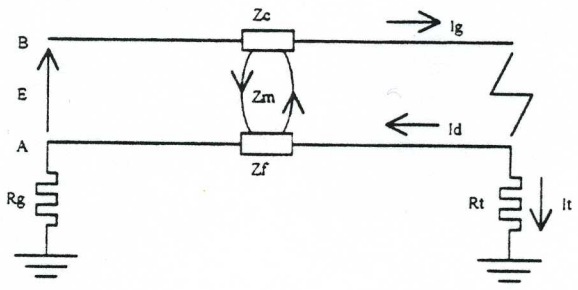

Fig.3 Rappresentazione schematica di impianto alimentato da linea aerea di rete gestita con centro stella collegato a terra

Con riferimento alla fig.3 si ha che:
- $E = U / \sqrt{3}$ = tensione stellata nominale;
- Z_c = impedenza del conduttore di fase;
- Z_f = impedenza della fune di guardia;
- Z_m = impedenza mutua tra conduttore di fase e fune di guardia;
- R_g = resistenza di terra equivalente della rete di alimentazione del guasto;
- R_t = resistenza di terra dell'impianto sede del guasto;
- I_g = corrente di guasto monofase a terra nel punto di derivazione dell'impianto sede del guasto;
- I_t = corrente dispersa dall'impianto sede del guasto;
- I_d = corrente drenata dalle funi di guardia.

Si suppone che la rete a monte di A-B sia di potenza infinita: il circuito di fig.3 si può rappresentare come in fig.4.

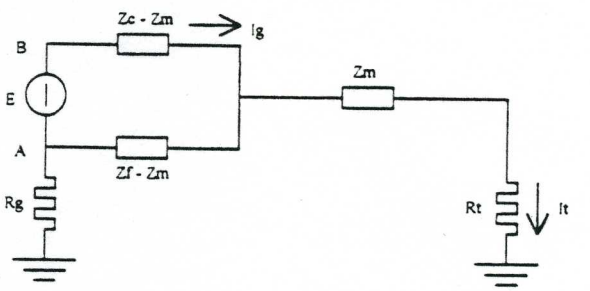

Fig.4 Rappresentazione equivalente del circuito di fig. 3.

Dal circuito di fig.4 si ottiene:

$$I_t = \frac{E}{R_t\left(1 + \frac{Zc - Zm}{Zf - Zm}\right) + R_g + Zm + Zf\frac{Zc - Zm}{Zf - Zm}} = \frac{E}{R_t(a + jb) + c + jd} \qquad (28)$$

In modulo, la corrente dispersa a terra dall'impianto alimentato vale:

$$|I_t| = \left|\frac{E}{aR_t + jbR_t + c + jd}\right| = \frac{E}{\sqrt{(aR_t + c)^2 + (bR_t + d)^2}} = \frac{E}{\sqrt{\alpha R_t^2 + \beta R_t + \gamma}} \qquad (29)$$

Per un dimensionamento economico, converrà che I_t sia per quanto possibile ridotta, il che è possibile solo agendo sui parametri circuitali.

Tralasciando ovviamente la possibilità di aumentare Z_c e di ridurre la tensione nominale, la riduzione di I_t si può conseguire mediante uno o più dei seguenti modi:

- aumentando R_t;
- aumentando R_g;
- aumentando Z_m;
- riducendo Z_f.

L'aumento di R_g è in pratica già attuato limitando il numero di connessioni a terra del centro stella del sistema.

La diminuzione di Z_f (impedenza prevalentemente resistiva) si può ottenere utilizzando funi di guardia in alumoweld o copperweld (possibilmente più funi di guardia in parallelo) in sostituzione di funi di guardia in acciaio.

La riduzione di Z_m risulta invece ardua: le funi di guardia devono proteggere le linee sottostanti dalle scariche atmosferiche e pertanto la loro posizione geometrica rimane praticamente assegnata.

L'aumento di R_t è sempre possibile a patto che il dispersore garantisca il contenimento delle tensioni di contatto e di passo entro i limiti stabiliti dalle norme CEI.

Si supponga assegnata la rete di alimentazione del guasto: rimane la possibilità di agire sulla sola R_t.

Ripetendo le medesime considerazioni di cui al punto 3.1.1, si possono ricavare:

$$Vch_{max} = K_c\rho\frac{E}{\sqrt{\alpha(K_r\rho)^2 + \beta K_r\rho + \gamma}}\frac{1}{1 + 2.06\frac{\rho}{R_h}} \qquad (30)$$

$$Vph_{max} = K_p\rho\frac{E}{\sqrt{\alpha(K_r\rho)^2 + \beta K_r\rho + \gamma}}\frac{1}{1 + 5.93\frac{\rho}{R_h}} \qquad (31)$$

Analogamente al caso precedente, è lecito supporre che vi siano due valori di resistività che rendono massimi rispettivamente i valori delle massime tensioni di contatto e di passo. Equagliando a zero le derivate di (30) e (31) si ottengono due equazioni algebriche di terzo grado, ognuna delle quali ammette almeno una soluzione reale e positiva (le derivate si annullano anche per valori di resistività infiniti). Si possono quindi denominare tali valori di resistività rispettivamente ρ_{cc} e ρ_{cp} ad indicare i valori critici di resistività in corrispondenza dei quali il generico impianto di terra dell'utenza alimentata da rete con centro stella connesso a terra denuncia rispettivamente i massimi valori di tensioni di contatto e di passo: le considerazioni sulla sicurezza del dispersore sono perfettamente analoghe a quelle svolte al punto 3.1.1.

Le correnti in gioco in un guasto a terra su sistemi con centro stella connesso a terra solitamente rendono eccessivamente oneroso il dimensionamento di dispersori a "sicurezza intrinseca": le considerazioni sin qui svolte si prestano però alla generalizzazione dei criteri di ottimizzazione di tali dispersori.

Non va dimenticato che il problema del dimensionamento di un impianto di terra, assegnate le condizioni al contorno, consiste nell'individuare tra la classe delle possibili soluzioni, la soluzione ottimale da un punto di vista economico.

In termini analitici, ciò corrisponde alla ricerca del dispersore economicamente più vantaggioso nel rispetto delle condizioni:

$$Vch_{max} \le Vpc_{max\,CEI} \qquad (32)$$

$$Vph_{max} \le Vpc_{max\,CEI} \qquad (33)$$

Le (32) e (33) ben evidenziano come interagiscano i vari parametri in gioco. Si suppongano ad esempio assegnati:

- tempo di intervento delle protezioni per guasto monofase a terra (e quindi $Vpc_{max\,CEI}$);
- rete di alimentazione del guasto (e quindi α, β, γ);
- mezzo disperdente (e quindi ρ).

Rimangono in gioco i soli parametri dipendenti dalla geometria del dispersore e cioè K_r, K_c e K_p.

A grandi linee si può dire intuitivamente che, a parità di altre condizioni, il costo di un impianto di terra è inversamente proporzionale a K_r.

Peraltro, l'aumento di K_r sembra favorevole al soddisfacimento delle condizioni (32) e (33): in realtà, l'aumento di K_r è generalmente legato all'aumento di K_c e K_p, il che va parzialmente a compensare i vantaggi ottenibili. L'ottimizzazione del dispersore si consegue ricercando forme geometriche che rendano massimi i rapporti K_r/K_c e K_r/K_p.

3.2.2 Mezzo disperdente omogeneo con strato isolante superficiale

Mediante la tecnica di abbattimento delle tensioni di contatto e di passo ad opera di strati isolanti superficiali si può ottenere un certo "disaccoppiamento" tra K_r e K_c, K_p: tale tecnica (che è comunque alternativa ad altre metodologie come ad esempio l'uso di pedane isolanti o di recinzioni per l'impedimento di accesso), consente di concentrare l'attenzione sul solo K_r, dando per scontato che per il contenimento delle tensioni di passo e di contatto, e quindi per la riduzione di K_c e K_p, c'è comunque un sistema alternativo all'intervento sulla geometria del dispersore.

Ad ogni modo, per limitare l'estensione dell'area dove sono richiesti interventi correttivi superficiali per l'abbattimento delle tensioni di passo, sarà opportuno studiare la geometria del dispersore in modo da circoscrivere le aree in cui si verificano le massime tensioni di passo nelle vicinanze delle masse.

In breve, un dispersore appartenente alla classe dei dispersori soluzione (che quindi soddisfa alle (32) e (33)), è tanto migliore sotto l'aspetto economico quanto più il suo K_r ed il rapporto K_r/K_p all'esterno di una data area (che solitamente corrisponde all'area circoscritta alle masse e masse estranee che possono determinare situazioni di pericolo per tensioni di contatto) risultano elevati.

Quando i rapporti K_r/K_c e K_r/K_p sono favorevoli (quindi elevati), l'aumento di K_r può essere spinto ai valori massimi consentiti dalla limitazione della massima tensione totale di terra.

Tale limitazione, che ha l'obiettivo di contenere la sollecitazione dielettrica sui cavi di sistemi elettrici di categoria 0 e 1 in partenza (o in arrivo) dall'impianto con estensione fino ad aree remote a potenziale nullo, si traduce in termini analitici nella condizione:

$$K_r\rho\frac{E}{\sqrt{\alpha(K_r\rho)^2+\beta K_r\rho+\gamma}} \le Vt_{max} \qquad (34)$$

Le condizioni (32), (33) e (34) generalizzano i criteri di valutazione dell'idoneità di un impianto di terra alimentato da rete gestita con centro stella connesso a terra e riassumono analiticamente le relazioni fondamentali che consentono di tenere in considerazione il fenomeno del drenaggio di parte della corrente di guasto ad opera delle funi di guardia delle linee aeree nonché l'effetto di riduzione delle tensioni di contatto e di passo ad opera della caduta di tensione sulle resistenze di interfaccia tra corpo umano e mezzo disperdente.

Le equazioni (32), (33) e (34) mettono in evidenza come lo studio del dispersore per un impianto alimentato da rete gestita con centro stella connesso a terra dovrebbe essere condotto considerando anche la rete di alimentazione del guasto senza limitarsi al solo contesto locale.

Conclusioni

Le espressioni ricavate per i fattori di riduzione delle tensioni di contatto e di passo hanno un campo di validità piuttosto ampio e consentono pertanto di trarre alcune importanti conclusioni di carattere pressoché generale.

1) Le difficoltà che si incontrano nella realizzazione di impianti di terra non sono linearmente crescenti con la resistività del mezzo disperdente. Ogni impianto di terra è

caratterizzato da due resistività critiche (una per le tensioni di contatto ed una per le tensioni di passo) che individuano il "punto di massima difficoltà" nel conseguire la sicurezza richiesta dalle norme CEI.
Generalmente risulta più critica la massima tensione di contatto: nel caso in cui si adotti la tecnica di limitare le tensioni di contatto per mezzo di uno strato isolante superficiale la situazione si può capovolgere.
2) Un impianto di terra che garantisca condizioni di sicurezza in corrispondenza alle sue resistività critiche, può essere considerato intrinsecamente sicuro.
Il concetto di dispersore a sicurezza intrinseca acquista significato negli impianti alimentati con reti gestite con centro stella isolato dove le correnti di guasto monofase a terra sono limitate: in tal caso, la sicurezza del dispersore è solamente legata alle caratteristiche della rete di alimentazione (corrente di guasto monofase a terra e tempo di intervento delle protezioni) ma non dipende in modo alcuno dal mezzo disperdente.
In pratica, fissate le caratteristiche della rete di alimentazione, risulta possibile individuare una classe di possibili dispersori intrinsecamente sicuri che pertanto potrebbero essere esenti dagli oneri della verifica delle tensioni di passo e di contatto.
In modo perfettamente duale, fissate le caratteristiche del dispersore, possono essere determinati i limiti dei parametri di rete (tensione nominale, reattanza capacitiva e tempo di intervento per guasto monofase a terra) che ne garantiscono la sicurezza intrinseca indipendentemente dal mezzo disperdente.
3) Nel caso di impianti alimentati con reti gestite con centro stella connesso a terra si possono trarre conclusioni analoghe, ma appare più opportuno parlare di dispersori a geometria ottimizzata. I criteri di ottimizzazione possono condurre a dispersori aventi geometrie non convenzionali ma economicamente validi ed in grado di risolvere problemi attuali, come accade per esempio nelle recenti realizzazioni di cabine primarie isolate in SF_6 dove le dimensioni in pianta richieste da dispersori tradizionali vanificano in parte il contenimento degli ingombri in pianta ottenibile con tale soluzione.
Si fa notare infine che, in presenza di corpi perturbanti disposti in prossimità del dispersore diventa difficile trarre conclusioni di carattere generale ed in tal caso è necessario il ricorso a specifici programmi di calcolo.

Bibliografia

[1] P. Buccheri, S. Mangione, G. Parise: "General method to evaluate human body effects on dangerous voltages in earthing systems", L'Energia Elettrica, n.5, 1988

[2] E.D. Sunde:"Earth Conduction Effects in Transmission Systems", D. Van Nostrand Co. Inc., New York, 1948

[3] ANSI/IEEE Std. 81: "Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System", 1983

[4] F.P. Dawalibi, N. Barbeito:"Measurements and Computations of the Performance of Grounding Systems Buried in Multilaier Soils", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, No. 4, October 1991

[5] G. Ala - P. Buccheri, S. Mangione:"Recenti sviluppi nello studio di elettrodi interrati a mezzo di programmi di calcolo", *L'Energia Elettrica*, n.11, 1992, pp. 463

[6] R. Andolfato, L. Fellin, R. Turri:"Analisi degli impianti di terra a frequenza industriale: confronto tra indagine sperimentale e simulazione numerica", accettato per pubblicazione su *L'Energia Elettrica*, 1997