

IL CALCOLO DEI LIVELLI DI ESPOSIZIONE DELLA POPOLAZIONE AI CAMPI MAGNETICI GENERATI DA LINEE DI TRASMISSIONE AEREE AD ALTA TENSIONE ALTERNATA

Giovanni Mazzanti

Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Facoltà di Ingegneria - Università di Bologna,
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

SOMMARIO

La crescente sensibilità dell'opinione pubblica nei confronti dei rischi associati ai campi elettromagnetici generati dai sistemi elettrici per l'energia (e in particolare dalle linee di trasmissione aeree) pone l'accento sulla necessità di determinare con precisione ed in modo appropriato i livelli di esposizione ai campi magnetici a frequenza industriale. Questo lavoro si occupa di alcune possibili fonti di incertezza ed errore nel calcolo dei livelli di esposizione continuativa di tipo residenziale ai campi magnetici generati da linee di trasmissione aeree, valendosi di una rigorosa trattazione analitica e di alcune applicazioni numeriche a casi pratici. L'analisi condotta conferma che ai fini di una valutazione dei livelli di esposizione ai campi generati da linee di trasmissione che sia davvero rappresentativa delle condizioni di servizio tipiche delle linee occorre non solo disporre di strumenti di misura o codici numerici sofisticati, ma anche della conoscenza dei fondamenti del funzionamento e della gestione dei sistemi di trasmissione dell'energia elettrica.

INTRODUZIONE

I campi elettromagnetici prodotti da elettrodotti suscitano crescente preoccupazione nell'opinione pubblica, specie per quanto riguarda il campo magnetico a bassa frequenza (per i suoi paventati effetti sulla salute) e le linee di trasmissione aeree ad alta tensione alternata (per il loro non trascurabile impatto sulle attività umane). In tale contesto, la determinazione dei livelli di esposizione della popolazione ai campi magnetici generati da tali linee è di grande importanza, come sancito dalla normativa tecnica internazionale ed europea [1], nonché dalla legislazione Italiana. Per quanto attiene a quest'ultima, è attualmente in vigore il D.P.C.M. 8 luglio 2003 relativo all'esposizione della popolazione ai campi elettrici e magnetici a 50 Hz generati da elettrodotti [2]. Relativamente al valore efficace di induzione magnetica, tale D.P.C.M. prescrive anzitutto la verifica del non superamento del "limite di esposizione di 100 μT "; inoltre, ai fini della "protezione [della popolazione] da possibili effetti a lungo termine, eventualmente connessi con [omissis] permanenze non inferiori a quattro ore" giornaliera, esso prescrive pure che la "mediana dei valori [di induzione magnetica] nell'arco delle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio" non superi il "valore di attenzione di 10 μT " e, nel caso di nuove realizzazioni, "l'obiettivo di qualità di 3 μT " [2]. Ai fini della valutazione dell'esposizione continuativa della popolazione ai campi magnetici generati da elettrodotti, oltre al valore mediano dell'induzione magnetica (al centro dell'attenzione in [2]) è di indubbio interesse anche il valore medio di induzione magnetica (sempre relativo alle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio), per la sua rilevanza statistica.

La stima del valore mediano e del valore medio di induzione magnetica generato in un dato punto da una linea elettrica può effettuarsi in linea di principio mediante misure

in loco; tali misure richiedono però campagne sperimentali lunghe, complesse, costose e soggette a vari tipi di errori. A tale riguardo, in [2] si precisa che, oltre alle misure, gli organi preposti alla "verifica del rispetto delle disposizioni di cui agli articoli 3 e 4 [relativi rispettivamente a valore di attenzione e obiettivo di qualità]" possono "avvalersi di metodologie di calcolo basate su dati tecnici e storici dell'elettrodotto"; si precisa altresì che per elettrodotti a tensione non inferiore a 132 kV, "gli esercenti devono fornire agli organi di controllo [omissis], con frequenza trimestrale, 12 valori per ciascun giorno, corrispondenti ai valori medi delle correnti registrati ogni 2 ore nelle normali condizioni di esercizio" [2].

Pertanto, come la stessa legislazione sottolinea, disponendo di un *database* contenente i valori delle correnti di linea acquisiti su un periodo di riferimento opportuno (cioè rappresentativo delle normali condizioni di esercizio della linea), è possibile derivare i livelli di esposizione della popolazione mediante calcoli di campo magnetico effettuati elaborando le grandezze del *database*. In questo lavoro si esamina la procedura di calcolo dei livelli di esposizione mediano e medio a partire da tali *database*, con riferimento a linee di trasmissione aeree ad alta tensione alternata, sia a terna singola (per le quali la procedura di calcolo è assai semplice), sia a doppia terna (per le quali la procedura di calcolo è invece più complessa, specie per le linee a terne indipendenti). Il lavoro, diviso in una parte teorica con formule analitiche per i livelli di esposizione e in una parte applicativa con esempi numerici, mostra come il calcolo rigoroso ed accurato dei livelli di esposizione della popolazione ai campi magnetici generati da linee di trasmissione aeree ad alta tensione alternata richieda non solo la disponibilità di un *database* e di un codice di calcolo, ma anche una solida conoscenza dei fondamenti della teoria dei sistemi elettrici per l'energia.

CALCOLO DEI CAMPI MAGNETICI GENERATI DA LINEE DI TRASMISSIONE AEREE

L'approccio più comune al calcolo del campo magnetico generato da un elettrodotto si basa sulla legge di Biot-Savart (vedi ad esempio [3]). I conduttori di fase sono considerati come oggetti cilindrici, di sezione trascurabile, aventi una giacitura a catenaria tra due sostegni adiacenti, mentre il terreno su cui essi si affacciano è considerato come un'ampia superficie piana conduttrice. La geometria di tale sistema è tridimensionale e il calcolo del campo magnetico richiede l'impiego di appropriati algoritmi numerici. Per linee di trasmissione aeree ad alta tensione alternata, si ricorre spesso alle seguenti ipotesi semplificative [4, 5]: 1) resistività elettrica del suolo infinita; 2) correnti di fase equilibrate; 3) correnti parassite indotte in elementi conduttori adiacenti alla linea (sostegni, tubazioni, ecc.) trascurabili; 4) correnti armoniche trascurabili; 5) conduttori di linea rettilinei, orizzontali ed infinitamente lunghi. Le ipotesi 1-5 rendono bidimensionale la geometria di calcolo del campo magnetico, che può così essere calcolato, sulla base di un sistema di coordinate Cartesiano ortogonale all'asse della linea (vedi Fig. 1 nel seguito), in N punti-campo giacenti in una data sezione della linea, ciascuno dei quali identificato da un vettore di coordinate $\mathbf{x}_j = \{x_j, y_j\}$ ($j=1, \dots, N$).

Per la valutazione dei livelli di esposizione ai campi magnetici alla frequenza di rete generati da linee elettriche, la grandezza di riferimento è il valore efficace dell'induzione magnetica in un dato punto-campo \mathbf{x}_j , $B(\mathbf{x}_j)$ [1-6]; l'espressione di $B(\mathbf{x}_j)$ derivata in base alle ipotesi 1-5 nel caso generale di linee a doppia terna è la seguente [4, 5]:

$$B(\mathbf{x}_j) = \sqrt{[B_x(\mathbf{x}_j)]^2 + [B_y(\mathbf{x}_j)]^2} \quad (1)$$

dove $B_x(\mathbf{x}_j)$, $B_y(\mathbf{x}_j)$ sono i valori efficaci di $B_x(\mathbf{x}_j, t)$, $B_y(\mathbf{x}_j, t)$, componenti del vettore induzione magnetica $\mathbf{B}(\mathbf{x}_j, t)$ lungo l'asse x e l'asse y , rispettivamente, esprimibili come segue:

$$B_x(\mathbf{x}_j, t) = m \sum_{i=1}^M I_i X_{i,j} \sin[\omega t - \Delta_i - 2(i-1)\pi/3] \quad (2)$$

$$B_y(\mathbf{x}_j, t) = m \sum_{i=1}^M I_i Y_{i,j} \sin[\omega t - \Delta_i - 2(i-1)\pi/3] \quad (3)$$

$$X_{i,j} = (y_i - y_j) / [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2] \quad (4)$$

$$Y_{i,j} = (x_j - x_i) / [(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2] \quad (5)$$

ove $m = \mu_0 / (\pi \sqrt{2})$, essendo μ_0 la permeabilità magnetica del vuoto, $\{x_i, y_i\}$ ($i=1, \dots, M$) sono le coordinate degli M conduttori di fase (ovviamente $M=3$ per linee a terna singola, $M=6$ per linee a doppia terna), I_i è il valore efficace della i -esima corrente di fase, Δ_i è una grandezza uguale a zero per le correnti di fase della prima terna e a $\Delta\phi$ per le correnti di fase della seconda terna, essendo $\Delta\phi$ l'angolo di sfasamento tra le terne dei fasori di corrente della prima e della seconda terna¹. Indicando la prima terna come terna I e gli indici delle relative correnti di fase come $i=1,2,3$, la seconda terna (se presente)

come terna II e gli indici delle relative correnti di fase come $i=4,5,6$, si ha: $\Delta_i=0$ per $i=1,2,3$, $\Delta_i=\Delta\phi$ per $i=4,5,6$. Ne segue (dall'ipotesi 2 di cui sopra) che $I_i=I_1=I_2=I_3$ è il valore efficace delle correnti di fase della terna I e $I_i=I_4=I_5=I_6$ è il valore efficace delle correnti di fase della terna II (se presente).

Ovviamente, $\Delta\phi=0$ per linee di trasmissione aeree a terna singola. Per linee di trasmissione aeree a doppia terna, se la linea è del tipo "split-phase", cioè se deriva dallo sdoppiamento dei conduttori di fase di una linea a terna singola, le correnti di fase che fluiscono nelle due terne (ad un dato istante e in una data posizione lungo la linea) sono descritte da due terne di vettori rappresentativi in fase tra di loro; in tal caso, $\Delta\phi=0$ come per linee a terna singola. Se invece la doppia terna è "ammazzettata", cioè costituita da due linee a terna singola indipendenti (che non collegano gli stessi nodi della rete di trasmissione, ma nodi diversi l'una dall'altra) poste sugli stessi sostegni per una parte della loro lunghezza complessiva, i valori misurati di potenza in transito dimostrano che vi è uno sfasamento fra i fasori di corrente omologhi delle due terne praticamente in tutte le condizioni di servizio (anche se ovviamente lo sfasamento varia al variare del carico) [4]. Questo sfasamento influenza fortemente il campo magnetico generato da tali linee, e quindi i livelli di esposizione della popolazione, come mostrato in [4, 5].

CALCOLO DEL LIVELLO DI ESPOSIZIONE CONTINUATIVA DELLA POPOLAZIONE

Livelli di Esposizione Mediana/Media nel caso di Linee di Trasmissione Aeree ad Alta Tensione Alternata

Il succitato "limite di esposizione" ai campi magnetici a 50 Hz generati da elettrodotti (e quindi anche da linee di trasmissione ad alta tensione alternata), pari a 100 μT [2], non va mai superato, essendo legato a possibili effetti acuti (a breve termine), come stabilito in [6]. Tale valore va quindi confrontato ragionevolmente con il valor massimo di induzione magnetica² generato dalla linea nelle varie possibili condizioni di funzionamento, valore che si avrà in corrispondenza dei valori massimi delle correnti di fase (e di opportune combinazioni dei valori di tali correnti e dell'angolo $\Delta\phi$ per linee a doppia terna ammazzettate, come illustrato in [4]). In pratica spesso ci si riferisce in tal caso alla portata in corrente in servizio normale dei conduttori (determinabile come illustrato nelle norme CEI 11-60 [7] e cautelativamente prescritta in [2] per la determinazione della fascia di rispetto degli elettrodotti nell'osservanza dell'obiettivo di qualità) o ad un percentile estremo (ad es. il 95°) della distribuzione campionaria dei valori di corrente misurati, desumibile dalle serie storiche attualmente a disposizione del Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (GRTN). Scelto il valore delle correnti di fase a cui riferirsi, la verifica del rispetto del limite di esposizione della popolazione ai campi magnetici generati da linee aeree di trasmissione in alta tensione alternata mediante il calcolo dell'induzione magnetica corrispondente ai valori scelti per le correnti (effettuabile in base alle Eqq. (1)-(5) qualora le ipotesi 1-5 di cui al paragrafo precedente siano applicabili) è banale e non pone particolari problemi.

Al contrario, il valore di attenzione di 10 μT e l'obiettivo di qualità di 3 μT vanno confrontati (vedi Introduzione) con il valore mediano dell'induzione magnetica nelle 24 ore nelle

¹ Per l'ipotesi 2, in linee a doppia terna le correnti di ogni terna sono rappresentabili mediante una sola terna simmetrica (diretta) di fasori; quindi, l'angolo $\Delta\phi$ di sfasamento fra coppie di fasori omologhi delle due terne è lo stesso per tutte le coppie e può intendersi come angolo di sfasamento fra le due terne nel loro complesso.

² Nel seguito, con induzione magnetica si intenderà implicitamente il valore efficace di tale grandezza sul periodo alla frequenza di 50 Hz.

normali condizioni di esercizio della linea [2]. Per determinare tale valore mediano è dunque essenziale considerare l'insieme delle diverse condizioni operative che caratterizzano l'usuale funzionamento della linea nell'arco della giornata al variare del carico, tenendo conto da un lato della caratteristica "deterministica" di relativa periodicità mostrata nell'ambito delle 24 ore dall'andamento dei flussi di potenza (pur se subordinata alla natura feriale/festiva del giorno, nonché alle condizioni stagionali), dall'altro della caratteristica "stocastica" legata alle fluttuazioni aleatorie ed imprevedibili del carico su base regionale o zonale, che si ripercuotono a livello locale sui valori di induzione magnetica nel particolare punto-campo considerato. Fatte queste premesse, e tenendo conto di quanto detto espressamente in [2] (vedi Introduzione), per una stima realistica del suddetto valore mediano di induzione magnetica pare quindi inevitabile (ancor più che ragionevole) riferirsi a serie storiche (*database*) di valori di correnti misurati sul periodo di funzionamento pregresso della linea (tipicamente vari anni); da tali serie storiche è possibile calcolare il valore mediano di induzione magnetica in un dato punto-campo tramite opportune procedure computazionali implementabili numericamente, illustrate dettagliatamente in [5] e più sinteticamente nel seguito. Tra l'altro, si noti che anche le misure *in loco*, pur se effettuate non in un solo istante, ma su di una frazione anche significativa della giornata, fanno spesso ricorso (secondo una prassi comune, consigliata dalle stesse norme CEI 211-6 [8]) ad un confronto con le serie storiche di dati, per estrapolare – dai valori misurati – stime accurate ed affidabili del suddetto valore mediano nel punto (o nei punti) considerato, e quindi verificare il rispetto del valore di attenzione e dell'obiettivo di qualità fissati in [2]. Pertanto, considerando anche le incertezze e gli errori a cui sono spesso soggette le campagne sperimentali *in-situ*, nonché la loro onerosità in termini economici e temporali, una procedura di calcolo del campo magnetico rigorosa, basata su *database* ampi ed esaustivi e codici di calcolo validati ed affidabili, rappresenta sicuramente un'alternativa attraente alla misura diretta dei livelli di esposizione. A tale procedura computazionale e ai problemi ed incertezze che può incontrare nel caso di linee di trasmissione aeree ad alta tensione alternata è dedicato il seguito del lavoro.

Nel seguito, per maggiore generalità, al calcolo del valore mediano di induzione magnetica prescritto dalla legge vigente è affiancato il calcolo del valore medio (sempre nelle 24 ore nelle condizioni normali di funzionamento della linea), in quanto il valore medio (pur se non prescritto in [2]) ha rilevanza statistica paragonabile al valor mediano. Infatti, se è vero che il valore mediano – stimato solitamente come il valore centrale di una serie ordinata di valori – consente di portare in conto i livelli di campo osservati più frequentemente in servizio, trascurando quelli relativi a condizioni estreme (e di fatto piuttosto rare), d'altra parte il valor medio – stimato solitamente come la media aritmetica di tutti i valori di campo osservati – è pur sempre rilevante dal punto di vista statistico e tecnico in quanto porta in conto appunto tutti i valori di campo possibili in un dato luogo. Tra l'altro, valore mediano e valore medio sono a volte prossimi fra di loro, tanto che l'induzione magnetica può talora assumersi (almeno approssimativamente) come una variabile aleatoria normalmente distribuita.

Pertanto, nel seguito si illustrerà la procedura mediante la quale calcolare, da un *database* di linea relativo ad un periodo di riferimento rappresentativo del suo normale funzionamento, il valore mediano/medio di induzione magnetica sul periodo di riferimento prescelto, indicato qui come $B_{50,C}(\mathbf{x}_j) / \langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_C$ e detto anche in sintesi "livello di esposizione mediano/medio"

o "livello di esposizione continuativo della popolazione" al campo magnetico generato dalla linea. La procedura si basa sulle Eq. (1)-(5) per il calcolo dei valori "tempovarianti" di induzione magnetica (cioè corrispondenti a ogni singolo tempo di rilevazione del *database* e alle relative condizioni di carico), e su di una successiva elaborazione statistica di tutti i valori tempovarianti³ calcolati, per derivarne il valore mediano/ medio di induzione magnetica sul periodo di riferimento. Il valore così ottenuto è qui definito valore di induzione magnetica mediano/medio "calcolato", ed è indicato come $B_{50,C}(\mathbf{x}_j) / \langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_C$. La procedura di calcolo è illustrata per linee di trasmissione aeree ad alta tensione alternata a singola e a doppia terna. Si omette per brevità la trattazione dei metodi di stima sperimentale basati su misure *in loco*, e dell'integrazione fra stime sperimentali e computazionali, assai utile per la validazione reciproca.

Il calcolo del valor mediano/medio di induzione magnetica sul periodo di riferimento a partire dal *database* di linea è soggetto ad incertezze ed errori. Una prima possibile fonte di errore è la scelta del periodo di riferimento atto a riprodurre le condizioni operative tipiche della linea. A rigore, il periodo di riferimento più appropriato parrebbe quello che comprende tutti gli anni di funzionamento pregresso della linea; d'altra parte - come evidenziato dalla prescrizione fatta in [2] agli esercenti degli elettrodotti di fornire valori delle correnti giornaliere aggiornati trimestralmente - le condizioni di carico più recenti sono spesso più rappresentative del funzionamento tipico attuale della linea rispetto a quelle più lontane nel tempo. Pertanto in pratica, anche per semplificare l'analisi, si sceglie spesso un periodo di riferimento molto più breve (e prossimo nel tempo), ad esempio l'ultimo anno, oppure una stagione o un mese recente, a seconda dei dati rilevati effettivamente disponibili (in alcuni casi pratici, in assenza di altri dati, anche un solo giorno). Ovviamente, tale scelta deve essere valutata attentamente caso per caso, sulla base dell'esperienza di esercizio della linea acquisita nel tempo; in caso contrario, si rischia di incorrere in gravi errori di stima dell'esposizione continuativa della popolazione.

Inoltre, indipendentemente dalla scelta del periodo di riferimento, il calcolo del relativo livello di esposizione mediano/medio non è semplice, in quanto:

1) codici che effettuano il calcolo numerico del campo magnetico generato da linee elettriche sono comunemente disponibili e/o acquistabili, ma la gran parte di essi non è in grado di ripetere automaticamente il calcolo su di un gran numero di diverse condizioni di carico, come invece occorre per determinare $B_{50,C}(\mathbf{x}_j) / \langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_C$;

2) il calcolo di tutti i valori tempovarianti di induzione magnetica sul periodo di riferimento richiede un tempo di elaborazione più o meno lungo, a volte non trascurabile (a seconda della lunghezza del periodo di riferimento prescelto e degli strumenti informatici disponibili), e (data la relativa complessità) può incorrere in errori di *input* o computazionali.

Linee di Trasmissione Aeree a Terna Singola

Il calcolo del livello di esposizione mediano/medio si semplifica drasticamente se l'induzione magnetica (in un dato

³ I valori "tempovarianti" (nel senso qui precisato) non vanno confusi con i valori istantanei, poichè questi ultimi (vedi Eq. (2)-(3)) variano sinusoidalmente alla frequenza di rete, mentre i primi – ottenuti come valori efficaci degli ultimi (vedi Eq. (1)) – variano al variare del carico (quindi su una scala temporale assai più ampia).

punto-campo) può essere espressa linearmente in funzione delle correnti di fase e dell'angolo di sfasamento, poiché ciò implica che il valore mediano/medio di induzione magnetica può essere anch'esso espresso linearmente in funzione dei valori mediani/medi delle correnti di fase e dell'angolo di sfasamento sul periodo di riferimento. In tal caso, non occorre calcolare tutti i valori tempovarianti di induzione magnetica sul periodo di riferimento; infatti, il valore mediano/medio di induzione magnetica su tale periodo può essere determinato mediante un unico calcolo "statico" (ovvero a carico costante) basato sui valori mediani/medi delle correnti di fase e dell'angolo di sfasamento (ottenuti elaborando statisticamente in modo opportuno le grandezze del database di linea, anche a mezzo di un semplice foglio di calcolo elettronico). E' questo il caso delle linee di trasmissione aeree a terna singola, per le quali la sola sorgente di campo è la terna simmetrica delle correnti di fase; per tali linee, dalle Eqq. (2)-(5) con $M=3$ e $\Delta\varphi=0$, definendo le grandezze seguenti:

$$\xi_{I,j}(X) = X_{1,j} - (X_{2,j} + X_{3,j})/2 \quad (6)$$

$$\zeta_{I,j}(X) = \sqrt{3}(-X_{2,j} + X_{3,j})/2 \quad (7)$$

$$\xi_{I,j}(Y) = Y_{1,j} - (Y_{2,j} + Y_{3,j})/2 \quad (8)$$

$$\zeta_{I,j}(Y) = \sqrt{3}(-Y_{2,j} + Y_{3,j})/2 \quad (9)$$

si ottiene [5]

$$B_x(\mathbf{x}_j, t) = mI_I[\xi_{I,j}(X)\sin(\omega t) + \zeta_{I,j}(X)\cos(\omega t)] \quad (10)$$

$$B_y(\mathbf{x}_j, t) = mI_I[\xi_{I,j}(Y)\sin(\omega t) + \zeta_{I,j}(Y)\cos(\omega t)] \quad (11)$$

Derivando $B_x(\mathbf{x}_j)$, $B_y(\mathbf{x}_j)$ dalle Eqq. (10), (11) in base alla definizione di valore efficace ed introducendo le relative espressioni nell'Eq. (1), essa assume la forma seguente:

$$B(\mathbf{x}_j) = mI_I \sqrt{[\xi_{I,j}^2(X) + \zeta_{I,j}^2(X) + \xi_{I,j}^2(Y) + \zeta_{I,j}^2(Y)]/2} \quad (12)$$

Infine, definendo la seguente funzione geometrica $F_I(\mathbf{x}_j)$:

$$F_I(\mathbf{x}_j) = \sqrt{[\xi_{I,j}^2(X) + \zeta_{I,j}^2(X) + \xi_{I,j}^2(Y) + \zeta_{I,j}^2(Y)]/2} \quad (13)$$

l'eq. (12) si riscrive in modo più compatto, come segue:

$$B(\mathbf{x}_j) = mF_I(\mathbf{x}_j)I_I \quad (14)$$

Essendo $B(\mathbf{x}_j)$ nell'Eq. (14) una funzione lineare di I_I , ne segue che il valore mediano/medio di induzione magnetica sul periodo di riferimento generato da una linea di trasmissione aerea a singola terna in un punto campo \mathbf{x}_j , è una funzione lineare del valore mediano/medio della corrente di fase della linea su tale periodo, $\langle I_I \rangle / I_{I,50}$, ovvero:

$$B_{50}(\mathbf{x}_j) = mF_I(\mathbf{x}_j)I_{I,50} \quad (15)$$

$$\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle = mF_I(\mathbf{x}_j) \langle I_I \rangle \quad (16)$$

Le Equazioni (15), (16) dimostrano che per linee di trasmissione aerea a terna singola il livello di esposizione mediano/medio sul periodo di riferimento può determinarsi mediante un unico "lancio" di un codice "statico" (che calcola

l'induzione magnetica mediante le Eqq. (1)-(5), di cui si è mostrata l'equivalenza con l'Eq. (14) per linee di questo tipo), introducendo in *input* a tale codice il valore mediano/medio della corrente di fase calcolato direttamente dal *database* di linea relativamente a tale periodo.

Linee di Trasmissione Aeree a Doppia Terna

Considerazioni analoghe valgono, *mutatis mutandis*, per linee di trasmissione aerea a doppia terna del tipo *split-phase*, poiché la variazione temporale delle correnti di fase delle due terne è determinata dall'unico circuito trifase il cui sdoppiamento ha dato luogo alla linea a doppia terna, e quindi le due terne di fasori di corrente sono sempre in fase fra loro. Per queste linee, dalle Eqq. (2)-(5) con $M=6$ (doppia terna) e $\Delta\varphi=0$, affiancando alle Eqq. (6)-(9) (relative alla terna I) le definizioni delle grandezze seguenti (relative alla terna II):

$$\xi_{II,j}(X) = X_{4,j} - (X_{5,j} + X_{6,j})/2 \quad (17)$$

$$\zeta_{II,j}(X) = \sqrt{3}(-X_{5,j} + X_{6,j})/2 \quad (18)$$

$$\xi_{II,j}(Y) = Y_{4,j} - (Y_{5,j} + Y_{6,j})/2 \quad (19)$$

$$\zeta_{II,j}(Y) = \sqrt{3}(-Y_{5,j} + Y_{6,j})/2 \quad (20)$$

si ottiene [5]

$$B_x(\mathbf{x}_j, t) = m\{[\xi_{I,j}(X)\sin(\omega t) + \zeta_{I,j}(X)\cos(\omega t)]I_I + [\xi_{II,j}(X)\sin(\omega t) + \zeta_{II,j}(X)\cos(\omega t)]I_{II}\} \quad (21)$$

$$B_y(\mathbf{x}_j, t) = m\{[\xi_{I,j}(Y)\sin(\omega t) + \zeta_{I,j}(Y)\cos(\omega t)]I_I + [\xi_{II,j}(Y)\sin(\omega t) + \zeta_{II,j}(Y)\cos(\omega t)]I_{II}\} \quad (22)$$

Derivando $B_x(\mathbf{x}_j)$, $B_y(\mathbf{x}_j)$ dalle Eqq. (21), (22) mediante la definizione di valore efficace ed introducendo le relative espressioni nell'Eq. (1), e rielaborando quest'ultima in base alle funzioni geometriche $F_I(\mathbf{x}_j)$, $F_{II}(\mathbf{x}_j)$, $M_{I,II}(\mathbf{x}_j)$, definite come segue ($F_I(\mathbf{x}_j)$ è già stata definita tramite l'Eq. (13)):

$$F_{II}(\mathbf{x}_j) = \sqrt{[\xi_{II,j}^2(X) + \zeta_{II,j}^2(X) + \xi_{II,j}^2(Y) + \zeta_{II,j}^2(Y)]/2} \quad (23)$$

$$M_{I,II}(\mathbf{x}_j) = [\xi_{I,j}(X)\xi_{II,j}(X) + \zeta_{I,j}(X)\zeta_{II,j}(X) + \xi_{I,j}(Y)\xi_{II,j}(Y) + \zeta_{I,j}(Y)\zeta_{II,j}(Y)]/2 \quad (24)$$

dopo semplici passaggi riportati per esteso in [5], si ottiene:

$$B(\mathbf{x}_j) = m\sqrt{F_I^2(\mathbf{x}_j)I_I^2 + F_{II}^2(\mathbf{x}_j)I_{II}^2 + 2M_{I,II}(\mathbf{x}_j)I_I I_{II}} \quad (25)$$

L'Equazione (25) non è un quadrato perfetto, perché in generale si ha (vedi Eqq. (13), (23), (24)):

$$M_{I,II}(\mathbf{x}) \neq F_I(\mathbf{x})F_{II}(\mathbf{x}) \quad (26)$$

Pertanto, $B(\mathbf{x}_j)$ nell'Eq. (25) è una funzione non-lineare di I_I e I_{II} . Ne segue che il valore medio - su un dato periodo - dell'induzione magnetica generata da una linea di trasmissione aerea a doppia terna del tipo *split-phase* in un punto-campo \mathbf{x}_j non è, a rigore, una funzione lineare dei valori medi delle correnti di fase delle terne I e II su quel periodo, $\langle I_I \rangle$ e $\langle I_{II} \rangle$, rispettivamente; considerazioni analoghe valgono per il valore mediano. Questo aspetto, né banale né intuitivo, può essere

evidenziato solo da una trattazione analitica rigorosa.

D'altronde, in [5] si mostra che gli errori dovuti al considerare l'Eq. (26) come un'uguaglianza sono ampiamente accettabili per linee del tipo *split-phase*, specie all'esterno della fascia di rispetto delle linee. Quindi, in pratica, si può scrivere con buona approssimazione quanto segue:

$$B(\mathbf{x}_j) \cong m[F_I(\mathbf{x}_j)I_I + F_{II}(\mathbf{x}_j)I_{II}] \quad (27)$$

L'Equazione (27) implica che, per le linee di trasmissione aeree a doppia terna del tipo *split-phase*, $B_{50}(\mathbf{x}_j)/\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle$ si può ritenere con buona approssimazione funzione lineare dei valori mediani/medi delle correnti di fase di ambo le terne, $I_{I,50}, I_{II,50} / \langle I_I \rangle, \langle I_{II} \rangle$. Quindi, una buona stima del livello di esposizione mediano/medio per tali linee può determinarsi mediante un unico "lancio" di un codice "statico" (che si basa sulle Eqq. (1)-(5), di cui si è mostrata l'equivalenza con l'Eq. (25) per linee di trasmissione aerea a doppia terna), introducendo in *input* a tale codice i valori mediani/medi delle correnti di fase di ambo le terne calcolati direttamente dal database di linea relativamente a tale periodo. Tali stime di valore mediano e medio, $B_{50,E}(\mathbf{x}_j)$ e $\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_E$, rispettivamente, sono esprimibili come segue:

$$B_{50,E}(\mathbf{x}_j) = m\sqrt{F_I^2(\mathbf{x}_j)I_{I,50}^2 + F_{II}^2(\mathbf{x}_j)I_{II,50}^2 + 2M_{I,II}(\mathbf{x}_j)I_{I,50}I_{II,50}} \quad (28)$$

$$\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_E = m\sqrt{F_I^2(\mathbf{x}_j)\langle I_I \rangle^2 + F_{II}^2(\mathbf{x}_j)\langle I_{II} \rangle^2 + 2M_{I,II}(\mathbf{x}_j)\langle I_I \rangle\langle I_{II} \rangle} \quad (29)$$

I relativi errori percentuali sul livello di esposizione mediano e medio, ΔB_{50} e ΔB_μ , si definiscono come segue:

$$\Delta B_{50} = 100[B_{50,E}(\mathbf{x}_j) - B_{50,C}(\mathbf{x}_j)] / B_{50,C}(\mathbf{x}_j) \quad (30)$$

$$\Delta B_\mu = 100[\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_E - \langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_C] / \langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_C \quad (31)$$

Al contrario, per le linee di trasmissione aeree a doppia terna del tipo a terne indipendenti, le sorgenti di campo magnetico sono due terne di correnti prevalentemente sfasate l'una rispetto all'altra, con un angolo di sfasamento $\Delta\phi$ che varia nel tempo, come pure le correnti stesse. Inoltre, la dipendenza dei valori di induzione magnetica tempovarianti da $\Delta\phi$ e dalle correnti di fase I_I e I_{II} è non-lineare. Infatti, per tali linee, dalle Eqq. (2)-(5) con $M=6$ (doppia terna) e $\Delta\phi \neq 0$, si ottiene, dopo vari passaggi illustrati dettagliatamente in [5]:

$$B(\mathbf{x}_j) = m\sqrt{H_{I,II}(\mathbf{x}_j, \Delta\phi)} \quad (32)$$

essendo $H_{I,II}(\mathbf{x}_j, \Delta\phi)$ una funzione quadratica di I_I e I_{II} , la quale non è mai assimilabile a un quadrato perfetto, essenzialmente a causa della dipendenza da $\Delta\phi$ (per ulteriori dettagli si veda [5]); quindi l'induzione magnetica è una funzione non-lineare di I_I , I_{II} e $\Delta\phi$. Pertanto, per linee di trasmissione aeree a doppia terna del tipo a terne indipendenti $\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle$ non è una funzione lineare di $\langle I_I \rangle$, $\langle I_{II} \rangle$ e $\langle \Delta\phi \rangle$ (essendo quest'ultimo il valor medio di $\Delta\phi$ sul periodo di riferimento), come pure $B_{50}(\mathbf{x}_j)$ non è una funzione lineare di $I_{I,50}$, $I_{II,50}$ e $\Delta\phi_{50}$ (essendo quest'ultimo il valore mediano di $\Delta\phi$ sul periodo di riferimento); quindi, si ha che:

$$\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle = m \langle \sqrt{H_{I,II}(\mathbf{x}_j, t)} \rangle \quad (33)$$

$$B_{50}(\mathbf{x}_j) = m \left(\sqrt{H_{I,II}(\mathbf{x}_j, t)} \right)_{50} \quad (34)$$

Se ne conclude che livello di esposizione continuativo della popolazione al campo magnetico generato da linee a doppia terna a terne indipendenti può ottenersi solo come "valore mediano/medio calcolato" (cioè come valore mediano/medio di tutti i valori di induzione magnetica tempovarianti calcolati sull'intero periodo di riferimento per una data linea). Stime approssimate del valore mediano/medio di induzione magnetica aventi la forma di funzioni lineari dei valori mediani/medi di I_I , I_{II} e $\Delta\phi$, del tipo:

$$\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_E = m[a\langle I_I \rangle^2 + b\langle I_{II} \rangle^2 + c\langle I_I \rangle\langle I_{II} \rangle]^{1/2} \quad (35)$$

$$B_{50,E}(\mathbf{x}_j) = m[a'I_{I,50}^2 + b'I_{II,50}^2 + c'I_{I,50}I_{II,50}]^{1/2} \quad (36)$$

(ove a , b , c , a' , b' , c' sono coefficienti derivati con trattazioni approssimate *ad hoc*) sono da ritenersi errate. Gli errori che tali stime comportano possono essere valutati con le stesse Eqq. (30), (31) già introdotte per linee tipo *split-phase*.

APPLICAZIONI

La precedente trattazione mostra che il calcolo del livello di esposizione continuativo della popolazione ai campi magnetici è banale per linee di trasmissione aeree a singola terna, mentre incertezze ed errori possono sorgere per linee a doppia terna, specie se del tipo a terne indipendenti. Perciò, il caso applicativo che segue è relativo a una linea esistente a 380 kV a doppia terna a terne indipendenti, caratterizzata da sostegni del tipo MV (vedi schema in Fig. 1). Cautelativamente, si considera la sezione di linea a campo massimo, ovvero quella a metà campata, assumendo per il franco minimo h_L un valore conservativo, pari a 11,5 m. A completamento dello studio svolto in [5], relativo alla disposizione dei conduttori a fasi affiancate, la disposizione delle fasi qui considerata è quella a fasi contrapposte.

Per la linea in esame è disponibile un *database* di valori orari di potenza attiva e reattiva e di tensione concatenata misurati per entrambe le terne alla stazione di partenza nel periodo 1994-2001, dai quali, ricorrendo a formule-base dell'elettrotecnica (omesse per brevità) si ricavano i valori tempovarianti di I_I , I_{II} e $\Delta\phi$. Un'analisi preliminare del database suggerisce che, per una valutazione di massima del livello di esposizione continuativo della popolazione al campo magnetico generato dalla linea in esame, i valori di I_I , I_{II} e $\Delta\phi$ relativi al giorno lunedì 8 gennaio 2001 (riportati in Fig. 2) si prestano a rappresentare il normale funzionamento della linea, anche perché le condizioni di carico del lunedì sono intermedie tra quelle dei giorni feriali e quelle dei giorni festivi. I risultati illustrati nel seguito si basano su calcoli effettuati mediante il codice BDP (le cui caratteristiche, ivi inclusa la procedura di validazione, sono illustrate in dettaglio in [4, 5]) a un'altezza dal suolo di 1 m.

Le Figure 3 e 4 mostrano, rispettivamente, gli errori percentuali, ΔB_μ e ΔB_{50} , sul livello di esposizione medio e mediano al campo magnetico generato dalla linea in esame (sottoposta al carico giornaliero di Fig. 2) introdotti dall'uso – in luogo delle equazioni corrette (33) e (34) – di espressioni approssimate del tipo delle Eqq. (35) e (36). In ciascuna figura sono considerate tre diverse espressioni approssimate per il

livello di esposizione – quindi tre valori dell'errore percentuale - tutte basate sulle Eqq. (35)/(36) e sulle correnti medie/mediane; le espressioni si differenziano per la stima di $\langle \Delta\phi \rangle / \Delta\phi 50$: la prima stima è pari alla media aritmetica / al valore centrale della serie ordinata di valori di $\Delta\phi$ relativi al giorno tipico di Fig. 2, la seconda è pari a 0° e la terza è pari a 180° . Si noti che le due ultime stime corrispondono a comuni ipotesi aprioristiche arbitrarie circa l'angolo di sfasamento $\Delta\phi$ (per il quale spesso, in base ad un'analisi assai grossolana, le uniche alternative ritenute possibili sono $\Delta\phi=0^\circ$ - cioè terne di corrente in fase, situazione spesso identificata con la dicitura "correnti nella stessa direzione" – o $\Delta\phi=180^\circ$ - cioè terne di corrente in opposizione, situazione spesso identificata con la dicitura "correnti in direzione opposta"), mentre la prima stima è anch'essa arbitraria, poiché la media aritmetica / il valore centrale dei valori di $\Delta\phi$ è una stima del valor medio/mediano di $\Delta\phi$ soggetta ad inconsistenze, essendo $\Delta\phi$ periodico tra -180° e 180° (vedi Fig. 2).

La Figura 3 mostra che gli errori percentuali sul valor medio di induzione magnetica sono notevoli (fino a oltre il 60%) e praticamente sovrapposti per $\langle \Delta\phi \rangle = 0^\circ$ e $\langle \Delta\phi \rangle =$ "media aritmetica" (quest'ultima pari a -7°); l'ipotesi $\langle \Delta\phi \rangle = 180^\circ$, pure arbitraria, fornisce sorprendentemente una stima assai migliore (almeno nel caso considerato), con errori di pochi percento su gran parte della sezione (specie in prossimità dell'asse della linea) e un errore massimo del 12%. La Figura 4 mostra che per $\Delta\phi 50 = 0^\circ$ e $\Delta\phi 50 =$ "valore centrale" (pari a -22°) gli errori percentuali sul valor mediano di induzione magnetica sono simili (sia in termini numerici, sia come andamento sulla sezione) agli omologhi riscontrati per il valor medio (anche se sono lievemente inferiori e lievemente discosti), mentre per $\langle \Delta\phi \rangle = 180^\circ$ l'andamento è diverso (l'errore massimo è del 15%, prossimo alla Fig. 3).

L'inadeguatezza delle Eqq. (35)/(36) e le incertezze nella stima di $\langle \Delta\phi \rangle / \Delta\phi 50$ sono dunque provate per il ciclo di carico giornaliero di Fig. 2 nei casi $\langle \Delta\phi \rangle / \Delta\phi 50 = 0^\circ$ e $\langle \Delta\phi \rangle / \Delta\phi 50 =$ media aritmetica / valore centrale, ma si noti che anche la stima $\langle \Delta\phi \rangle / \Delta\phi 50 = 180^\circ$ (essendo aprioristica e non giustificabile in base al ciclo di carico giornaliero) non garantisce affatto un comportamento soddisfacente in altri casi. Ovviamente, per trarre conclusioni più certe per una data linea, occorre considerare periodi di riferimento più lunghi di quello qui considerato, ad esempio un anno intero (si veda al proposito [4, 5]). Comunque, poiché risultati analoghi a quelli di Figg. 3, 4 sono stati riscontrati per altre linee a doppia terna a terne indipendenti, e per diversi cicli di carico e periodi di riferimento, se ne deduce che in genere per tali linee l'uso delle Eqq. (35), (36) unitamente ad ipotesi aprioristiche sul valore mediano/medio di $\Delta\phi$ comporta errori inaccettabili nel calcolo del valore mediano/medio di induzione magnetica, ergo del livello di esposizione continuativa della popolazione ai campi magnetici generati da linee di questo tipo.

Infine, per fornire valori assoluti di induzione magnetica da confrontare con i vigenti limiti di legge, in Tabella I sono riportati il minimo e il massimo (alla mezzera della campata) dei valori mediani di induzione magnetica calcolati, $B_{50,C,MIN}$, $B_{50,C,MAX}$, e dei valori medi di induzione magnetica calcolati, $\langle B \rangle_{C,MIN}$, $\langle B \rangle_{C,MAX}$, relativi alle Figg. 3 e 4, rispettivamente (i minimi si hanno al limite esterno della sezione di calcolo, mentre i massimi nei pressi dell'asse della linea). Si noti che, nel caso in esame, valori mediani e medi sono assai prossimi; inoltre, pur con un valore assai cautelativo di h_L , il valore di attenzione è rispettato ovunque, mentre l'obiettivo di qualità è superato dai valori massimi.

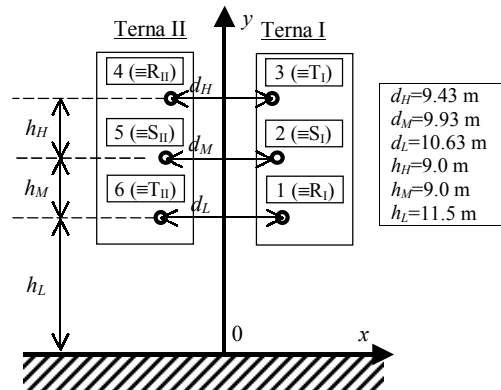


Figura 1. Schema (alla mezzera della campata) della linea a 380 kV a doppia terna a terne indipendenti esaminata. Gli indici dei conduttori di fase ($i=1, \dots, 6$), entro riquadri, illustrano la disposizione a fasi contrapposte.

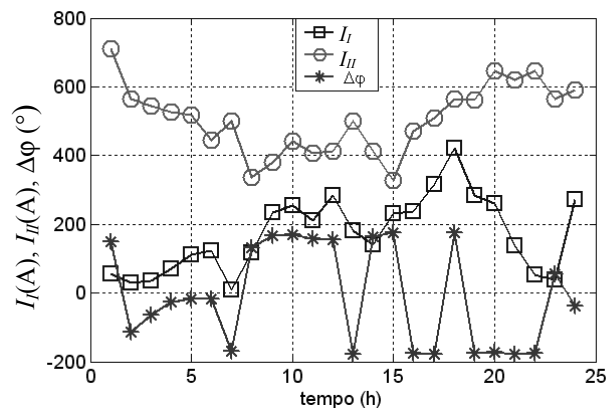


Figura 2. Valori di I_I , I_{II} e $\Delta\phi$ relativi a lunedì 8 gennaio 2001 per la linea considerata (vedi Fig. 1), derivati dal database di linea [5] e assunti come rappresentativi del carico nel periodo di riferimento (carico giornaliero tipico).

CONCLUSIONI

Come stabilito dalla legislazione vigente, il valore mediano di induzione magnetica sulle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio è una grandezza essenziale per valutare l'esposizione continuativa della popolazione ai campi magnetici generati da elettrodotti. Lo studio qui condotto specificamente per linee di trasmissione aeree in corrente alternata, oltre a porre in rilievo anche il valore medio di induzione magnetica, mostra che il calcolo del valore mediano e del valor medio è soggetto ad incertezze ed errori, e può effettuarsi con precisione mediante i tradizionali codici "statici" nel caso delle linee a terna singola, nonché a doppia terna del tipo *split-phase*, a condizione di scegliere con cura il periodo di riferimento e di avere la disponibilità di un database relativo alla linea da cui stimare i valori mediani /medi delle correnti di fase. Al contrario, nel caso di linee a doppia terna del tipo a terne indipendenti, è necessario calcolare tutti i valori di induzione magnetica sul periodo di riferimento, ed espressioni approssimate basate su assunzioni aprioristiche circa il valore mediano/medio dell'angolo di sfasamento fra le correnti delle due terne comportano solitamente gravi errori nella stima del livello di esposizione.

In futuro, questo studio verrà ampliato al fine di individuare espressioni approssimate basate su stime più realistiche del valore mediano/medio dell'angolo di sfasamento (possibilmente correlate in modo diretto al database di linea) e relative a periodi di riferimento di maggior durata (uno o più

anni). Inoltre, l'analisi verrà estesa alle linee di distribuzione, che hanno un impatto ancor maggiore sulle attività umane nelle aree densamente abitate.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. European Union, Council Recommendation of July 12th 1999 on the Limitation of Exposure of the General Public to Electromagnetic Fields (0 - 300 GHz), *Official J. Eur. Comm.*, vol. L199, luglio 1999.
2. Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri, Fissazione dei Limiti di Esposizione, dei Valori di Attenzione e degli Obiettivi di Qualità per la Protezione della Popolazione dalle Esposizioni ai Campi Elettrici e Magnetici alla Frequenza di Rete (50 Hz) Generati dagli Elettrodotti, 8 luglio 2003.
3. IEEE Magnetic Fields Task Force, Magnetic Fields from Electric Power Lines. Theory and Comparison to Measurements, *IEEE Trans. Pow. Del.*, vol. 3, pp. 2127-2136, ottobre 1988.
4. G. Mazzanti, Current Phase-shift Effects in the Calculation of Magnetic Fields Generated by Double-circuit Overhead Transmission Lines, Proc. 2004 IEEE PES General Meeting, Denver (U.S.A.), giugno 2004.
5. G. Mazzanti, Uncertainties in the Calculation of Continuous Exposure of General Public to Magnetic Field from ac Overhead Transmission Lines, Proc. 2005 IEEE PES General Meeting, San Francisco (U.S.A.), giugno 2005.
6. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), *Health Phys.*, vol. 74, pp. 494-522, aprile 1998.
7. Norme CEI 11-60, Portata al Limite Termico delle Linee Elettriche Aeree Esterne con Tensione Maggiore di 100 kV, 2^a edizione, 2002.
8. Norme CEI 211-6, Guida per la Misura e la Valutazione dei Campi Elettrici e Magnetici nell'Intervallo di Frequenza 0 Hz - 10 kHz, con Riferimento all'Esposizione Umana, 1^a edizione, 2001.

NOMENCLATURA

- $\mathbf{B}(\mathbf{x}_j, t)$ vettore induzione magnetica nel j -esimo punto-campo ($j=1, \dots, N$) all'istante $t \in [0, T]$
- $B(\mathbf{x}_j)$ valore efficace di induzione magnetica nel j -esimo punto-campo
- $B_x(\mathbf{x}_j, t)$ componente di $\mathbf{B}(\mathbf{x}_j, t)$ lungo l'asse x
- $B_x(\mathbf{x}_j)$ valore efficace di $B_x(\mathbf{x}_j, t)$
- $B_y(\mathbf{x}_j, t)$ componente di $\mathbf{B}(\mathbf{x}_j, t)$ lungo l'asse y
- $B_y(\mathbf{x}_j)$ valore efficace di $B_y(\mathbf{x}_j, t)$
- $B_{50}(\mathbf{x}_j)$ valore mediano di induzione magnetica
- $B_{50,C}(\mathbf{x}_j)$ valore mediano di induzione magnetica "calcolato"
- $B_{50,E}(\mathbf{x}_j)$ valore mediano di induzione magnetica "stimato"
- $\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle$ valore medio di induzione magnetica
- $\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_C$ valore medio di induzione magnetica "calcolato"
- $\langle B(\mathbf{x}_j) \rangle_E$ valore medio di induzione magnetica "stimato"
- M numero dei conduttori di fase
- N numero dei punti-campo
- T periodo delle grandezze sinusoidali alla frequenza di rete
- t istante di tempo entro il periodo T
- \mathbf{x}_j vettore di coordinate del j -esimo punto-campo

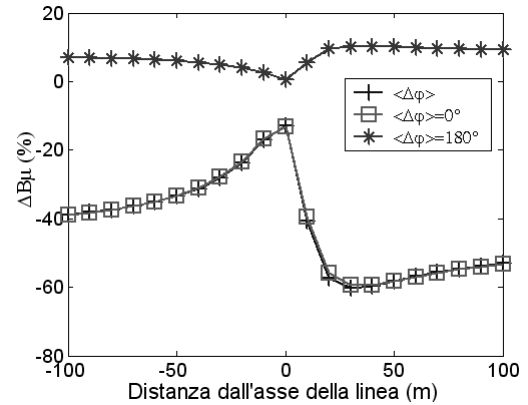


Figura 3. Errore percentuale sul livello di esposizione medio, $\Delta B\mu$, dovuto all'Eq. (35) con $\langle \Delta\phi \rangle$ (media aritmetica della serie di valori di $\Delta\phi$), $\langle \Delta\phi \rangle = 0^\circ$, $\langle \Delta\phi \rangle = 180^\circ$, per la linea di Fig. 1 (carico giornaliero di Fig. 2). Altezza dal suolo 1 m.

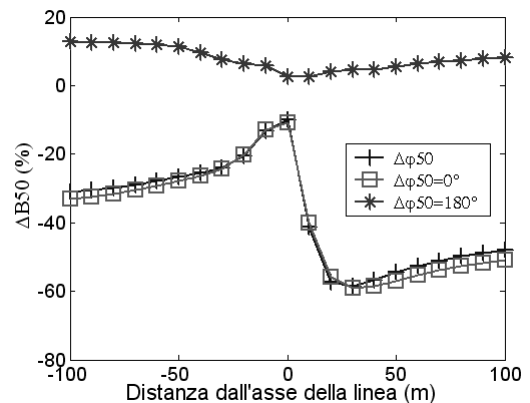


Figura 4. Errore percentuale sul livello di esposizione mediano, ΔB_{50} , dovuto all'Eq. (36) con $\Delta\phi_{50}$ (valore centrale della serie di valori di $\Delta\phi$), $\Delta\phi_{50} = 0^\circ$, $\Delta\phi_{50} = 180^\circ$, per la linea di Fig. 1 (carico giornaliero di Fig. 2). Altezza dal suolo 1 m.

Tabella I. Minimo e massimo dei valori mediani e medi calcolati nei casi di Figg. 3 e 4. Altezza dal suolo 1 m.

	$B_{50,C,MIN}$	$B_{50,C,MAX}$	$\langle B \rangle_{C,MIN}$	$\langle B \rangle_{C,MAX}$
Figg. 3,4	0.18 μT	5.31 μT	0.18 μT	5.41 μT

- x_i coordinata x dell' i -esimo conduttore ($i=1, \dots, M$)
- x_j coordinata x del j -esimo punto-campo
- y_i coordinata y dell' i -esimo conduttore
- y_j coordinata y del j -esimo punto-campo
- I_i valore efficace della i -esima corrente di fase
- I_I valore efficace delle correnti di fase della terna I
- $I_{I,50}$ mediana del valore efficace delle correnti di fase della terna I
- $\langle I_I \rangle$ media del valore efficace delle correnti di fase della terna I
- I_{II} valore efficace delle correnti di fase della terna II
- $I_{II,50}$ mediana del valore efficace delle correnti di fase della terna II
- $\langle I_{II} \rangle$ media del valore efficace delle correnti di fase della terna II
- Δ_i grandezza pari a 0 per $i=1,2,3$, a $\Delta\phi$ per $i=4, 5, 6$
- $\Delta\phi$ angolo di sfasamento tra le terne dei fasori di corrente della terna I e della terna II
- $\Delta\phi_{50}$ valore mediano di $\Delta\phi$
- $\langle \Delta\phi \rangle$ valore medio di $\Delta\phi$
- μ_0 permeabilità magnetica del vuoto