

PROCEDURE DI MISURA DI CAMPI ELF IN PROSSIMITÀ DI CONFIGURAZIONI COMPLESSE DI LINEE ELETTRICHE

Benes M., Comelli M., Bampo A., Villalta R.

ARPA Friuli Venezia Giulia, piazza Grande 1 – 33057 Palmanova (UD) - benes@arpa.fvg.it

ABSTRACT

Presso l'Agenda Regionale per la Protezione dell'Ambiente del Friuli Venezia Giulia (ARPA FVG), è emerso il problema di come effettuare le misure di campi di induzione magnetica generati da varie configurazioni di linee elettriche, in cui sono presenti più linee insistenti sulla stessa area di interesse. Nell'ambito della classificazione delle varie tipologie di elettrodotti è stato definito il concetto di doppia linea, in cui il campo magnetico è determinato dalla conoscenza dei parametri elettrici e geometrici della linea. Al contrario, per linee indipendenti, la situazione è indeterminata. Viene quindi evidenziato come, nel secondo caso, sia impossibile estrarre informazioni di tipo previsionale da un set di misure del solo campo magnetico. Le misure condotte sul territorio in vari casi hanno permesso di delineare procedure di misura di carattere generale.

INTRODUZIONE

Il problema se l'esposizione prolungata a campi magnetici ELF generati da elettrodotti abbia un significativo impatto sulla salute rimane aperto. Diversi studi in laboratorio compiuti in questo intervallo di frequenze hanno ottenuto effetti non evidenti o difficili da interpretare, mentre alcune ricerche hanno evidenziato effetti sostanziali da esperimenti in vivo ed in vitro. Studi epidemiologici hanno fornito risultati misti, ed una recente valutazione di risultati combinati per i principali studi indica una correlazione statisticamente significativa tra prossimità delle abitazioni agli elettrodotti e leucemia infantile [1].

Le recenti disposizioni normative italiane [2] hanno fissato i limiti precauzionali di esposizione, i valori di attenzione e gli obiettivi di qualità.

Nell'ambito dell'attività istituzionale dell'ARPA FVG si effettuano misure di campo di induzione magnetica presso linee elettriche. Al fine di ricondursi alla normativa italiana vigente, è necessario ricavare dalle misurazioni l'informazione riguardo al valore di induzione inteso come mediana nelle 24 ore nelle normali condizioni di esercizio dell'elettrodotto. La norma CEI [3] e le procedure standard riportate in IEEE [4], comunque, forniscono indicazioni soltanto qualitative su come effettuare le misure, senza indicare la durata della misura, e non accennano a casi complessi.

Nel presente lavoro si procederà, dopo una breve premessa di elettrotecnica, alla definizione delle tipologie di linee che si possono incontrare sul territorio. Quindi vengono presentate delle misure effettuate sia in corrispondenza di un caso banale che presso casi complessi, e viene presentata la procedura di misura che è stata adottata dall'ARPA FVG.

UN CENNO DI ELETTROTECNICA

Gli impianti in esame sono le linee di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica a frequenza industriale (50 Hz): si tratta di sistemi in tensione e corrente alternate trifasi.

Formalmente la tensione è rappresentata dal fasore $e^{i(\omega t + \theta_k)}$, ove ω è la velocità angolare corrispondente alla frequenza di rotazione di 50 Hz, e i tre angoli di fase θ_k assumono i valori di 0° , 120° e 240° . Le fasi vengono solitamente indicate con R , S e T . Le convenzioni adottate nel seguito sono illustrate nelle Figure 1 e 2.

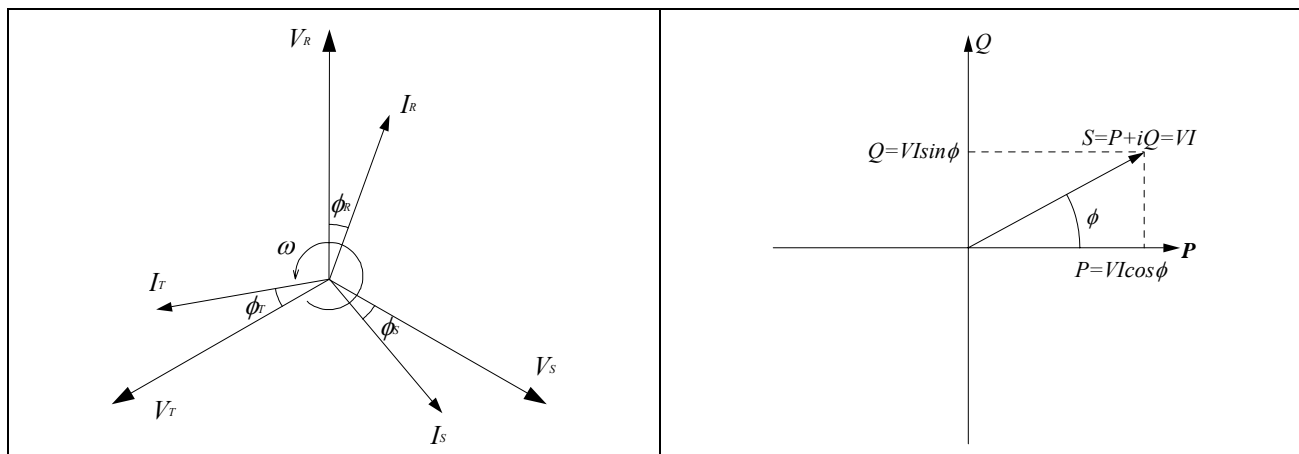


Figura 1: Diagramma dei fasori V-I.

Figura 2: Diagramma scalare P-Q.

Nel diagramma dei fasori di Figura 1 si illustra come correnti e tensioni siano generalmente sfasate di un angolo ϕ_i . Nel caso di correnti uguali ($I_R=I_S=I_T$) la terna si definisce equilibrata, per sfasamenti uguali ($\phi_R=\phi_S=\phi_T$) simmetrica.

Nel seguito della presente trattazione si supporranno valide queste condizioni, generalmente soddisfatte per linee ad Alta (AT, 132 kV) ed Altissima Tensione (AAT, 220 e 380 kV).

Con riferimento alla Figura 2, che per semplicità è riferita ad un caso monofase, S indica la potenza apparente, P la potenza attiva, Q la potenza reattiva, V la tensione concatenata ed I la corrente di linea. Se il carico è capacitivo la corrente si sfasa in anticipo rispetto alla tensione, e Q viene assunta convenzionalmente negativa. Se il carico è induttivo la corrente si sfasa in ritardo rispetto alla tensione, e Q è assunta positiva.

Si può dimostrare che in una linea trifase valgono le relazioni $P = \sqrt{3}VI \cos \phi$ e $Q = \sqrt{3}VI \sin \phi$.

Nel caso di linee AAT, P e Q vengono misurate in centrale di trasformazione primaria. Il segno di P dipende dallo sfasamento tra corrente e tensione (è positivo per $|\phi| < 90^\circ$, negativa per $|\phi| > 90^\circ$), e può essere correlato al flusso di potenza (e quindi di energia). Il flusso di corrente invece, in questo caso di corrente alternata, non ha significato fisico, come erroneamente espresso in [5].

DEFINIZIONE DELLE TIPOLOGIE DI LINEE

Vengono di seguito definite le varie tipologie di linee elettriche che si possono incontrare sul territorio. La terminologia è qui riferita alle linee aeree, ma i concetti valgono analogamente per le interrate.

Singola terna: i tralicci sostengono un solo conduttore per ciascuna delle tre fasi (o ciascuna fase è suddivisa al più in un gruppo di cavi che corrono ravvicinati: si parla di conduttori binati, trinati, ecc.).

Split-phase: si tratta di una linea in cui alcune delle tre fasi vengono disposte su più conduttori, i quali di conseguenza devono sopportare un carico minore.

Doppia terna ottimizzata: è un caso particolare di linea split-phase, in cui le tre fasi vengono sdoppiate e disposte in maniera antisimmetrica: il campo prodotto risulta di conseguenza minimizzato.

Doppia linea: è il sistema costituito da due distinte linee, che percorrano parte del loro tragitto sugli stessi tralicci e aventi le tensioni dei conduttori omologhi (cioè alla stessa fase: R , S o T) sfasate di una quantità nota: affinché ciò accada i conduttori omologhi devono afferire in centrale di trasformazione alla stessa sbarra (nel caso di medesima tensione nominale) oppure rispettivamente al primario e al secondario di un autotrasformatore (nel caso di tensioni nominali distinte).

Doppia linea ottimizzata: è il caso particolare di una doppia linea, caratterizzata da una disposizione delle fasi tale da minimizzare il campo prodotto [6].

Linee indipendenti: linee i cui conduttori non provengano né terminino alla stessa centrale di trasformazione. In tal caso non è possibile formulare alcuna ipotesi relativamente ad una relazione tra gli sfasamenti relativi dei conduttori omologhi.

Si è distinto tra doppia terna ottimizzata e doppia linea per facilitare la chiarezza dell'esposizione seguente; la doppia linea è costituita da due linee con correnti e tipologie di carico diverse (e quindi sfasamenti ϕ diversi), mentre la doppia terna ottimizzata è una linea con un'unica corrente e ϕ uguali per conduttori omologhi. La condizione che permette di ottimizzare una doppia linea, o in generale un sistema di più linee, è che le tensioni omologhe abbiano sfasamento determinato. Questa condizione viene a cadere nel caso di linee indipendenti.

Gli sfasamenti tra le tensioni omologhe di due linee a diversa tensione nominale sono noti qualora si conosca il tipo di autotrasformatore utilizzato in centrale di trasformazione. Ad esempio, un autotrasformatore di tipo "YNa0" ("Y" indica una connessione a stella dei conduttori, "N" che il neutro è accessibile, "a" che il primario ed il secondario sono autoconnessi e "0" che non viene introdotto alcun sfasamento tra le tensioni), non introduce sfasamenti tra le tensioni all'uscita rispetto a quelle d'ingresso. Se quindi due o più linee di questo tipo interessano il medesimo sito, la situazione è determinata dalla lettura di V , P e Q , e si può procedere alla loro ottimizzazione pervenendo così alla soluzione impiantistica della doppia linea ottimizzata.

In Licitra et al. [5] si considera un caso di due linee indipendenti, che non terminando ad una stessa sottostazione non hanno caratteristiche elettriche in comune. Le linee considerate non sono in fase, e lo sfasamento tra le correnti dei conduttori omologhi, che d'ora in avanti verrà indicato con $\Delta\phi$, varia in maniera imprevedibile nel tempo. In quel lavoro si afferma che il verso dei flussi di energia è stato fornito dal gestore delle linee, ma questi dati non sono utilizzabili per valutare $\Delta\phi$, e quindi per trarre le conclusioni esposte, proprio perché si tratta di linee indipendenti. I versi dei flussi di energia hanno significato solo se esiste un sistema di riferimento comune alle due linee, come potrebbe essere la terna delle tensioni. Questo riferimento non esiste invece nel caso di linee indipendenti: le due terne di tensione (e quindi di corrente) sono scorrelate, sfasate di una quantità sconosciuta, non fissa e quindi non ricavabile neppure dal gestore da misure di P e Q . Nel seguito verrà presentata una trattazione analoga a quanto presentato in [5], ma riferita al caso della doppia linea, in cui il sistema è completamente determinato dalla lettura di V , P e Q .

ASPETTI SPERIMENTALI

Prima di effettuare una misura di campo di induzione magnetica presso linee elettriche è necessario individuare lo specifico caso in cui queste rientrano. Nei casi di compresenza di più linee su uno stesso sito, è necessario innanzitutto ottenere dall'ente gestore l'informazione sulla relazione esistente tra le tensioni omologhe, cioè se le linee siano tra di loro indipendenti o se le tensioni siano sfasate di una quantità fissa. Questa informazione è necessaria per poter interpretare correttamente il risultato delle misurazioni o eseguire delle stime di carattere statistico a partire dal set dei dati acquisiti. Nel seguito vengono presentate misure condotte presso una linea singola, una doppia linea e tre linee.

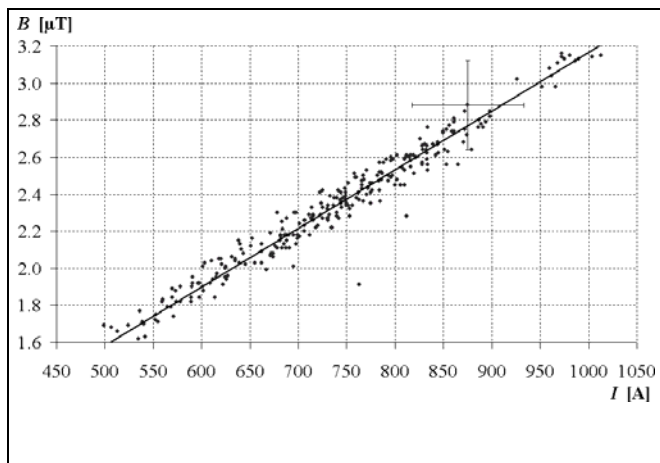


Figura 3: Relazione tra l'induzione misurata e la corrente di linea per la linea singola 356 a 380 kV.

Linea singola: in questo caso il campo di induzione magnetica è proporzionale alla corrente circolante (per la legge di Biot-Savart), per cui è sufficiente eseguire una misura a spot come descritto nel seguito. Nota la corrente transitante al momento della misura, è possibile calcolare il campo in quel punto in qualsiasi altro momento dello storico delle correnti. Nella Figura 3 è visualizzata la relazione tra intensità della corrente di linea e induzione magnetica misurata nei pressi di una linea singola a 380 kV, la 356 Planais – Redipuglia. La misura è

stata eseguita per la durata di tre giorni mediante una centralina di monitoraggio continuo PMM

8055S, alimentata da celle fotovoltaiche ed interrogata da remoto tramite modem GSM. La centralina è stata collocata nei pressi della linea in modo tale che la sonda risultasse a 1.5 m di altezza dal suolo, ed il tempo di acquisizione è stato impostato a 1' in modalità AVG. Si è deciso di far riferimento alla media aritmetica perché le correnti indotte nell'organismo sono proporzionali all'intensità di campo, e non alla potenza, nel qual caso si ricorrerebbe ad una misura in media quadratica (RMS).

Considerando un errore del 6.6% sui dati forniti dal gestore e del 8.4% associato alla misura, si ottiene un valore del chi-quadrato ridotto pari a $\tilde{\chi}_{272}^2 = 0.08$, con 272 gradi di libertà, valore che non permette di rigettare l'ipotesi sulla proporzionalità. Il calcolo del campo efficace di induzione magnetica è stato effettuato tramite l'innovativo strumento informatico Phidel [6], una volta ottenuti i dati elettrici (dall'ente gestore - GRTN) e geometrici (dall'ente proprietario - TERNA) del tratto di linea interessato.

Nel caso di linee split-phase la situazione non cambia, in quanto le fasi sono semplicemente disposte su più conduttori.

Doppia linea: le misure sono state condotte in prossimità di due linee a 380 kV (347 Planais - Salgareda e 356 Planais - Redipuglia) a cinque chilometri dalla centrale di trasformazione. È stata collocata sul terreno la stessa centralina descritta al punto precedente, con le impostazioni invariate. Le due linee afferiscono alla medesima sbarra in centrale di trasformazione primaria, per cui le tensioni omologhe sono in fase: il valore dell'induzione magnetica in un punto è quindi ricavabile dalla misura di V , P e Q , i cui valori vengono registrati dal gestore ogni 15 minuti.

Per riprodurre tramite calcolo il valore del campo di induzione magnetica misurato, è stata adottata la convenzione descritta in precedenza per determinare lo sfasamento tra le correnti delle due linee. Con tale assunzione, sono state confrontate le misure della centralina nell'arco di 60 giorni e il calcolo effettuato tramite Phidel.

Per testare la validità del software utilizzato, si sono confrontati i risultati con i rilevamenti sperimentali ottenendo un valore per il chi-quadrato ridotto pari a $\tilde{\chi}_{5182}^2 = 0.6$, con 5182 gradi di libertà, che non consente il rigetto dell'ipotesi fatta, ossia della validità dello strumento informatico.

In [5] gli autori si propongono di trovare una soluzione per determinare il campo prodotto da un sistema di più linee, ipotizzando una dipendenza lineare tra l'induzione e la corrente della linea più vicina al punto di misura, mentre il campo dovuto alle rimanenti viene trattato come un fondo costante.

Considerando però le misure appena descritte, si dimostra nel seguito come l'andamento del campo in funzione della corrente di ciascuna delle due linee presenti caratteristiche che si discostano da tale ipotesi.

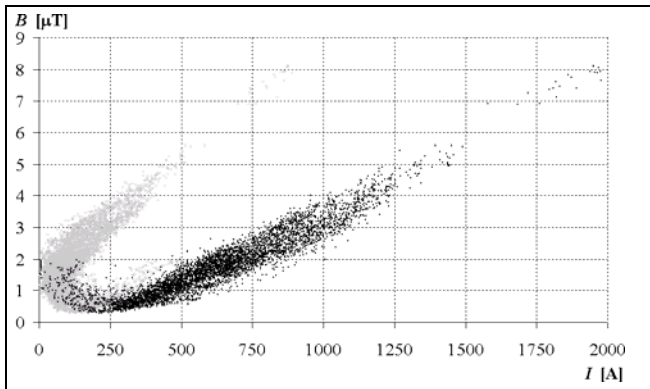


Figura 4: Induzione magnetica in funzione della corrente per le linee 347 (grigio chiaro) e 356 (grigio scuro).

Con riferimento alla Figura 4, in cui sono rappresentati i dati raccolti, non si può stabilire una relazione del tipo $B=B_0+kI$ con $B_0>0$: in un caso si evidenzia la mancanza di linearità (punti chiari), nell'altro un "fondo" negativo (punti scuri). Ne consegue che per determinare il valore del campo in prossimità di più linee è necessario tener conto dello sfasamento relativo tra le correnti, ed approssimazioni più semplici possono trovare apparente giustificazione solo a

causa della scarsa statistica raccolta o della particolare geometria del sistema, per cui l'effetto di una linea risulta predominante.

Tre linee: è stato analizzato il caso di una doppia linea a 220 kV (283 Monfalcone Z.I. - Redipuglia e 277 Redipuglia - Monfalcone Z.I. AL.) e di una linea a 380 kV (343 Monfalcone C. TE - Redipuglia), i cui tracciati si snodano per un tratto paralleli, a pochi metri l'uno dall'altro. Le tre linee derivano dalla stessa centrale di produzione-trasformazione, e tra di esse è inserito un autotrasformatore di tipo "YNa0". Anche in questo caso il sistema è completamente determinato dalla disponibilità di V , P e Q , ed il campo è quindi calcolabile come nel caso precedente.

Linee indipendenti: nel caso generale di linee indipendenti, o nel caso non siano disponibili le letture di P e Q , non è possibile avanzare, neanche da parte del gestore, alcuna ipotesi su $\Delta\phi$ al momento della misura, né una previsione statistica sui versi dei flussi di potenza allo scopo di riprodurre o interpretare le misure. In questi casi, l'unica possibilità per estrapolare considerazioni cautelative sull'intensità del campo di induzione magnetica è ricorrere ad un calcolo nella configurazione di fase peggiore tramite il software Phidel, oppure eseguire un monitoraggio in continuo sul lungo periodo dal quale estrarre informazioni statistiche.

CONCLUSIONI

È stata chiarita la nomenclatura associata alle tipologie di linee, definendo il concetto di doppia linea, e messa a punto una procedura di misura a partire dal caso banale di linea singola, per passare a quello della doppia linea fino a considerare un sistema di linee indipendenti. Si è messo in evidenza come, nei casi di indisponibilità di P e Q per le linee o nel caso di linee indipendenti, sia fondamentale il contributo della simulazione tramite un software appropriato. In alternativa è necessario ricorrere al monitoraggio continuo mediante centralina. Si è quindi evidenziato come sia inappropriato azzardare previsioni statistiche su linee indipendenti a partire da una semplice misura dell'induzione magnetica.

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare va al sig. Giorgio Pangerc, per la disponibilità e l'aiuto offerti nelle questioni di elettrotecnica degli autotrasformatori.

BIBLIOGRAFIA

- [1] A. Ahlbom et al. *A Pooled Analysis of Magnetic Fields and Childhood Leukemia*. Br. J. Cancer **83** (9) (2000).
- [2] D.P.C.M. del 08.07.2003 – “*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*”. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana 200 (29-8-2003).
- [3] CEI 211-6. *Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0-10 kHz con riferimento all'esposizione umana*. (2001)
- [4] IEEE *Standard Procedures for Measurement of Power Frequency Electric and Magnetic Fields from AC Power Lines*. **644** (1994).
- [5] G. Licitra, N. Colonna and C. Chiari, *Evaluation of LongTerm Exposure to the MagneticField Produced from Power Lines*. Radiation Protection Dosimetry Vol. **97**, No 4, pp. 401-404 (2001).
- [6] M. Comelli, L. Bertocchi, M. Benes and R. Villalta. *Analisi, Modelli Previsionali e Valutazione di Impatto Ambientale di Campi di Induzione Magnetica Generati da Linee Elettriche ad Altissima Tensione*. Università degli Studi di Trieste, Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Corso di Laurea Specialistica in Fisica (Anno Accademico 2003-2004).