

# Studio dei livelli di induzione magnetica generati da 3 linee ad altissima tensione

Nicola Colonna <sup>(1)</sup>, Nicola Zoppetti <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> ARPAT, Dip. prov. di Pisa, Via Vittorio Veneto 27 - 56123 Pisa, n.colonna@arpat.toscana.it

<sup>(2)</sup> IFAC-CNR, Via Madonna del Piano, 10 - 50019 Sesto Fiorentino (FI), n.zoppetti@ifac.cnr.it

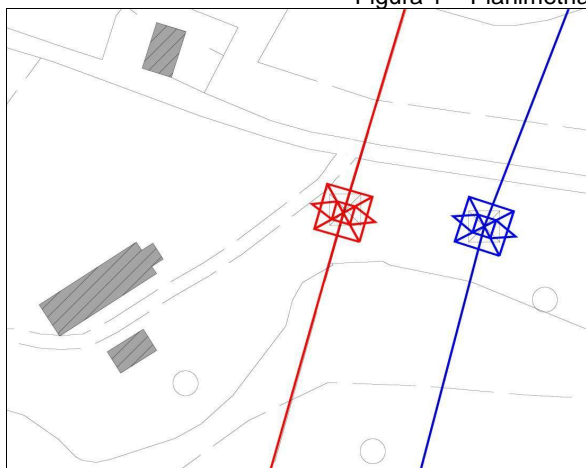
## RIASSUNTO

Durante l'attività di controllo di ARPAT è stato indagato un sito, su richiesta del Comune di Fauglia (PI), nel quale un'abitazione è prossima a tre elettrodotti a 380 kV (uno in semplice terna, gli altri due in doppia terna). Presso tale sito, in primo luogo, sono state eseguite alcune verifiche riguardanti l'attendibilità dei dati tecnici forniti dai gestori. Si è inoltre condotto uno studio sui livelli di induzione magnetica, effettuando dei monitoraggi in continua dell'induzione magnetica in tre diverse occasioni. In seguito, ricevute dal gestore le correnti sugli elettrodotti durante i periodi di misura, sono stati calcolati i valori di induzione magnetica, utilizzando per modellare le linee i dati presenti nel catasto regionale degli elettrodotti (CERT, Catasto Elettrodotti Regione Toscana). Il calcolo dell'andamento nel tempo dell'induzione magnetica è stato eseguito con il programma PLEIA-EMF, sviluppato da ARPAT ed IFAC-CNR, considerando inizialmente le correnti sui conduttori in fase con le rispettive tensioni. Come ulteriore approfondimento, sono stati infine trattati anche i mutui sfasamenti tra le correnti istantanee in transito su ciascuna terna, ricavati dalle potenze attive e reattive. È stato quindi analizzato in dettaglio il raffronto tra i valori di induzione magnetica misurati durante i monitoraggi e quelli ottenuti mediante le diverse simulazione.

## INTRODUZIONE

Nel corso dei controlli effettuati da ARPAT sul territorio della Provincia di Pisa è stato studiato il sito di Poggio alla Farnia, che si trova a 3.5 km a nord est della stazione di trasformazione di Acciaiole, nel Comune di Fauglia. Il sito è caratterizzato dalla presenza di due elettrodotti a 380 kV: la linea n. 314 "Spezia Stazione - Acciaiole" e le linee nn. 326 e 327 "Marginone - Acciaiole" in doppia terna (vedi Figura 1). ARPAT ha effettuato nel tempo (2002, 2005 e 2008), su richiesta del Comune, tre monitoraggi in continua all'interno dell'abitazione più vicina ai due tracciati, al fine di stimare il livello di esposizione dei residenti al variare dell'assetto di rete sulle 3 linee. L'edificio residenziale si trova a 52 m di distanza sul piano orizzontale dall'asse della linea n. 314 e a 98 m di distanza dall'asse delle linee n. 326 e 327, in un tratto in cui gli elettrodotti sono pressoché paralleli e distanti tra loro 46 m.

Figura 1 – Planimetria e foto del sito oggetto di indagine



A sinistra l'abitazione in cui sono stati effettuati i monitoraggi. In rosso il tracciato della linea n. 314 e in blu il tracciato delle linee nn. 327 e 326

A sinistra il sostegno della linea n. 314; a destra il sostegno delle linee in doppia terna con la n. 327 a sx e la n. 326 a dx

Durante il monitoraggio effettuato nell'ottobre del 2002 la linea n. 314 non era in servizio e, quindi, i livelli di induzione magnetica misurati in tale indagine erano dovuti solo alla doppia terna nn. 326 e 327, che ha la disposizione ottimizzata delle fasi.

Nel corso dei monitoraggi effettuati nell'ottobre del 2005 e nell'aprile 2008 le tre linee erano tutte in servizio e, quindi, i livelli di induzione magnetica misurati sono dovuti alla sovrapposizione dei relativi contributi. Al fine di confrontare i valori di induzione magnetica misurati con quelli ottenuti mediante calcoli, dopo ciascun monitoraggio sono stati richiesti al gestore delle linee i dati di corrente, di potenza attiva e di potenza reattiva misurati all'estremo di Acciaiole.

Si è scelto di effettuare tale confronto riferendosi in particolare alla possibilità di calcolare l'andamento del campo nel tempo a partire dai dati storici di corrente circolante su ciascuna delle linee considerate. Il calcolo

dell'andamento nel tempo dell'induzione magnetica è stato eseguito con il programma PLEIA-EMF, sviluppato da ARPAT ed IFAC-CNR (Andreuccetti e altri, 2006), che attinge i dati tecnici delle linee di interesse dal Catasto degli Elettrodotti della Regione Toscana (CERT, Andreuccetti e altri, 2003). Il software oltre ad attingere dal catasto i dati tecnici e geometrici necessari alla modellazione delle linee, è in grado di trattare in ingresso le correnti storiche di più elettrodotti, anche al fine del calcolo della massima mediana giornaliera dell'induzione magnetica su un lungo periodo, come previsto dalla normativa vigente. Vista infine la presenza di tre elettrodotti, il sito è stato ritenuto idoneo per effettuare alcune verifiche riguardanti l'attendibilità dei dati tecnici forniti dai gestori ed inseriti in CERT.

### SCelta DEL PUNTO DI MISURA

Poiché l'attività di controllo è stata richiesta ad ARPAT dai cittadini e dal Comune, i monitoraggi in continua sono stati effettuati all'interno dell'abitazione dei richiedenti. Viste le distanze presenti tra il punto di misura e i tracciati della linea n. 314 e delle linee nn. 326 e 327 (rispettivamente 52 m e 98 m) e considerato che la linea in doppia terna, più lontana, ha anche le fasi ottimizzate, si può desumere che il contributo dominante al campo risultante misurato è dovuto alla linea n. 314 (vedi Figura 1, sostegno "a delta").

Nel 2008, durante le attività di verifica dei dati presenti nel Catasto, si era ipotizzato di effettuare anche un monitoraggio in un'altra posizione, che fosse equidistante tra i baricentri delle teste dei due sostegni. Tale posizione è stata individuata considerando sia l'altezza della sonda da terra pari a 2 m, sia la maggiore altezza della doppia terna e corrisponde ad una distanza di circa 9 m dall'asse della linea in doppia terna. La posizione di misura circa equidistante dalle tre terne avrebbe consentito di avere contributi al campo confrontabili, anche in considerazione del fatto che le intensità delle correnti istantanee che percorrono le diverse linee sono generalmente dello stesso ordine di grandezza. Tuttavia, non essendo praticabile una misura in esterno non presidiata per un lungo periodo di tempo, si è deciso di valutare solo i risultati dei monitoraggi già effettuati all'interno dell'abitazione.

### CALCOLO DELL'INDUZIONE MAGNETICA AL VARIARE DELLE CORRENTI

L'andamento nel tempo dei livelli di induzione magnetica in prossimità di due o più elettrodotti dipende da quello delle correnti che circolano sulle linee di interesse.

Nei programmi per il calcolo dell'induzione magnetica generata dagli elettrodotti tipicamente è possibile impostare come dato di input un singolo valore di corrente da associare a ciascuna linea. L'IFAC-CNR, nel 2001, con la modalità batch del software bidimensionale Campi, versione 4.1, ha approntato un codice previsionale che consente, istante per istante, di calcolare un valore di induzione magnetica a partire dai valori di corrente circolanti sulle linee considerate. Ciascun valore istantaneo della corrente è indicato con un segno che indica il verso del flusso di energia su ciascuna linea

L'evoluzione della normativa ed il passaggio ad un codice di calcolo tridimensionale come PLEIA-EMF, hanno portato alla elaborazione del modulo "PLEIA\_costo" (che sta per PLEIA correnti storiche) che consente appunto di calcolare, mediante modelli tridimensionali, l'andamento nel tempo dei livelli di induzione magnetica generata da due o più elettrodotti. Tale modulo attinge i dati di corrente da CERT, dato il lasso di tempo di interesse.

Il calcolo del campo viene eseguito in due passaggi: nel primo si calcola il contributo all'induzione magnetica generato da ciascuna linea, in ogni punto considerato, supponendo che su ciascun conduttore scorra una corrente pari ad 1 A ed in fase con la rispettiva tensione.

Per ciascuna linea e ciascun punto si determinano 6 numeri reali cioè la parte reale e la parte immaginaria di ciascuna componente cartesiana del campo magnetico. Il campo generato da una linea trifase è infatti rappresentabile mediante un vettore con componenti complesse, come riportato nella seguente espressione, che si riferisce ad una generica linea  $k$  ed ad un altrettanto generico punto.

$$\vec{B}_k^{\text{@1A}} = \left( B_{k \times \text{Re}}^{\text{@1A}} + j B_{k \times \text{Im}}^{\text{@1A}} \right) \hat{i}_x + \left( B_{k \times \text{Re}}^{\text{@1A}} + j B_{k \times \text{Im}}^{\text{@1A}} \right) \hat{i}_y + \left( B_{k \times \text{Re}}^{\text{@1A}} + j B_{k \times \text{Im}}^{\text{@1A}} \right) \hat{i}_z \quad \text{Eq. 1}$$

Nel secondo passaggio viene eseguita la composizione del contributo al campo generato da ciascuna linea con la effettiva corrente di linea. I contributi delle diverse linee sono poi sommati vettorialmente per ottenere il campo complessivo, ed in particolare la sua intensità.

Se si suppone che su tutti i conduttori della terna  $k$  scorra una corrente di pari intensità  $I_k$ , in fase con la rispettiva tensione, il campo generato dalla terna  $k$  è dato da  $\vec{B}_k^{\text{@I}_k\text{A}} = I_k \vec{B}_k^{\text{@1A}}$

Nel seguito si descrive la procedura utilizzata nel caso più in generale in cui si voglia tenere conto di eventuali sfasamenti tra corrente e tensione e quindi del fatto che sulla linea non scorre solo potenza attiva ma anche potenza reattiva. In tal caso, per ottenere il campo generato dalla linea  $k$  in un generico punto, si moltiplica il vettore  $\vec{B}_k^{\text{@1A}}$  relativo al punto di interesse, per il numero complesso  $I_k^*$  riportato nella seguente espressione:

$$\begin{cases} I_k^* = |I_k| \cdot (\cos \varphi_k + j \sin \varphi_k) \\ \varphi_k = \tan^{-1} \left( \frac{Q_k}{P_k} \right) \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

dove con  $P_k$  e  $Q_k$  sono indicati i valori istantanei di potenza attiva e reattiva sulla linea k.

Le precedenti espressioni fanno riferimento al caso in cui si consideri univocamente fissato il riferimento dei tempi per le tensioni; in altre parole si considerano in fase le tensioni su conduttori omologhi di linee diverse. Nel caso trattato in questo articolo, le tre linee fanno capo alla stessa stazione e la condizione può ragionevolmente pensarsi rispettata.

In ogni istante ed in ogni punto, l'espressione con la quale si calcola il campo totale generato da N linee è quindi la seguente:

$$\vec{B}_{tot} = \sum_{k=1}^N I_k^* \vec{B}_k @ 1A \quad \text{Eq. 3}$$

Il motivo principale di un approccio suddiviso in due passaggi risiede nel fatto che il calcolo dell'induzione magnetica, ed in particolare l'integrazione sulle catenarie che è l'operazione più onerosa, avviene per ciascun punto una volta per tutte, considerando una corrente pari ad 1 A e non deve essere ripetuto per ciascun istante di tempo.

Il fattore tempo è infatti preso in considerazione solo nella seconda fase, in cui si eseguono operazioni algebriche nel dominio dei numeri complessi.

Anche se non è un aspetto trattato in questo articolo, una volta nota l'intensità del campo totale in ogni istante, è immediato calcolarne la mediana su un intervallo di tempo ed in particolare la peggior mediana giornaliera, limitatamente al periodo in cui sono disponibili i dati di corrente.

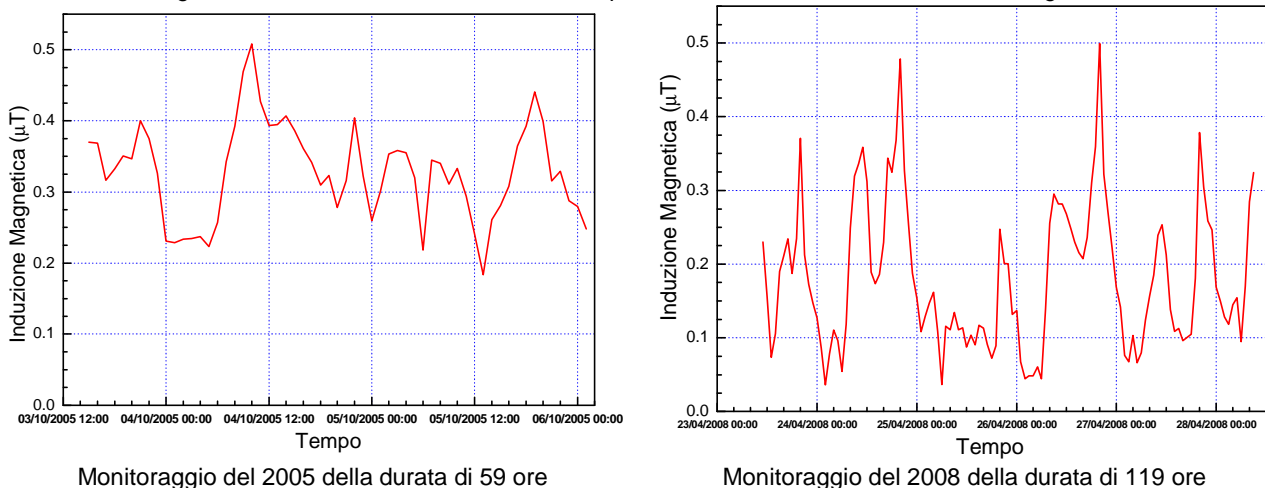
## VERIFICHE SUI DATI PRESENTI NEL CATASTO

Per il sito di Fauglia, come per altri siti in cui vi sono linee a 380 kV, i rilevamenti effettuati sul campo mediante telemetro laser in merito a posizione, altezza e geometria della testa dei sostegni, hanno evidenziato una buona corrispondenza tra quanto comunicato dai gestori e quanto riscontrato *in situ*, con differenze dell'ordine del metro e quindi paragonabili all'incertezza che caratterizza la misura effettuata con il telemetro.

## RISULTATI OTTENUTI

Si riportano in Figura 2 i risultati dei monitoraggi effettuati nel 2005 e nel 2008 presso l'abitazione in Via Poggio alla Farnia; i grafici mostrano l'andamento nel tempo dei valori medi orari dell'induzione magnetica registrata.

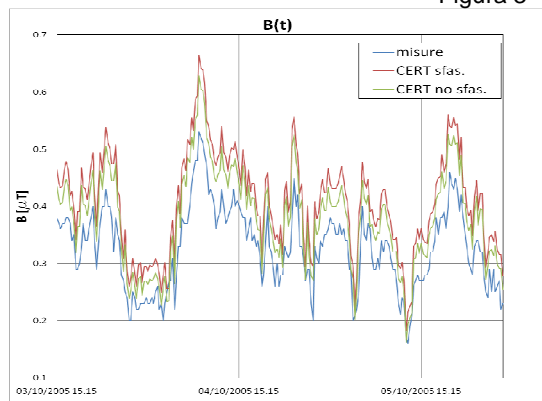
Figura 2 – Grafici con l'andamento nel tempo dei valori medi orari dell'induzione magnetica



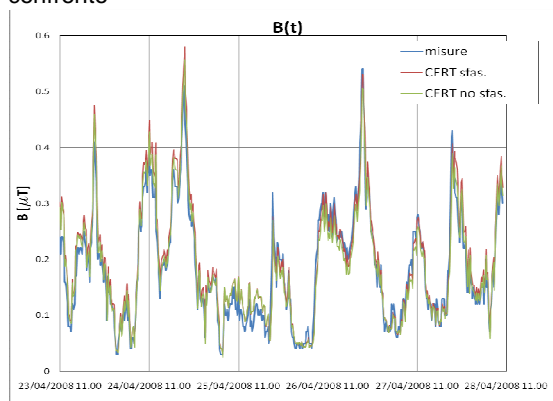
In figura 3 sono invece rappresentati i valori istantanei, misurati al quarto d'ora, dell'induzione magnetica ed insieme quelli calcolati, sia tenendo conto, sia trascurando gli sfasamenti tra corrente e tensione.

Sono stati valutati gli scarti percentuali tra i livelli misurati dell'induzione magnetica e quelli calcolati, sia non considerando gli sfasamenti tra corrente e tensione (caso A), sia tenendone conto (caso B). Fissata una disposizione ottimizzata delle fasi sulle linee DT, si è inoltre cercato la disposizione delle fasi sulla linea ST che minimizzasse lo scarto medio con le misure (caso C), anche in questo caso tenendo conto degli sfasamenti tra I e V. Nella tabella 1 sono riportati i risultati sugli scarti percentuali ottenuti.

Figura 3 – Grafici di confronto



Monitoraggio 2005: confronto calcoli e misure



Monitoraggio 2008: confronto calcoli e misure

Tabella1 – Risultati degli scarti percentuali

MONITORAGGI	SCARTI (%)	Caso A dati CERT senza sfasamenti I-V	Caso B dati CERT con sfasamenti	Caso C: disposizione fasi modificata, con sfasamenti
2005	Medio	16.4	24.8	15.9
	Massimo	41.6	52.7	40.9
	Minimo	0.2	2.4	0.3
2008	Medio	10.8	12.2	11.8
	Massimo	53.6	54.6	61
	Minimo	0.1	0.1	0.1

Risultati dell'analisi statistica degli scarti percentuali tra i valori misurati nel 2008 e quelli calcolati

Nel 2008, in termini di scarto tra valori calcolati e misurati, non ci sono grandi differenze tra considerare o meno gli sfasamenti; lo scarto percentuale medio risulta rispettivamente pari al 12,2% ed il 10,8%. Nel 2005 invece si verificano scarti maggiori che inoltre risentono maggiormente dalla variazione di disposizione delle fasi sulle linee. Non si esclude pertanto che tra le due misure siano stati effettuati interventi sulle linee ed in particolare sulla disposizione reciproca delle fasi e questo renderebbe i due monitoraggi non direttamente confrontabili

## CONCLUSIONI

I dati meccanici forniti dal gestore risultano confermati dai rilievi e questa è una caratteristica abbastanza generale delle linee a 380 kV, probabilmente grazie alla cosiddetta "unificazione", intesa come standardizzazione delle tecnologie costruttive e quindi anche della annessa documentazione.

Per quanto riguarda il confronto tra calcoli e misure, anche se i risultati ottenuti non sono privi di contraddizioni e rimanderebbero ad ulteriori approfondimenti, in generale si può affermare che, in casi in cui è dominante il contributo di una linea sulle altre, non ha grande importanza tenere conto degli sfasamenti relativi tra correnti e tensioni. Cionondimeno sarebbe interessante applicare l'approccio qui descritto ad un sito in cui, presso il punto di misura, contribuiscano in modo più bilanciato diverse linee indipendenti.

Nel particolare caso analizzato infine gli approfondimenti dovrebbero riguardare anche il parametro di tesatura dei conduttori e la quota della base dei sostegni che, essendo ricavata dalla cartografia in scala 1:10000 di una porzione di territorio ad orografia complessa, potrebbe essere una delle concause responsabili degli scarti rilevati tra misure e calcoli.

## Bibliografia

Andreuccetti D., Colonna N., Fossi R. e Zoppetti N. (2006). Campo magnetico disperso da elettrodotti ad alta tensione: validazione di una metodologia avanzata di valutazione basata su modelli 3D di linee elettriche e territorio. Atti del terzo convegno nazionale "Controllo ambientale degli agenti fisici: dal monitoraggio alle azioni di risanamento e bonifica", Biella, 7-9 giugno 2006, vol.2, pp.704-709.

Andreuccetti, D'Amore e Licitra (2003) *Il catasto delle sorgenti di campi elettromagnetici*, Atti del secondo convegno nazionale Agenti Fisici, Torino, 29-31 ottobre 2003 vol.1, pp.31-36.