

# Valutazione di emissioni elettromagnetiche prodotte da impianti in alta tensione continua

Borsero M.\*, Bottauscio O.\*, Chiampi M.<sup>†</sup>, Crotti G.\*, Zilberti L.\*

\*Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Strada delle Cacce 91, 10135 Torino, g.crotti@inrim.it

<sup>†</sup>Politecnico di Torino, Corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino

## RIASSUNTO

*Il lavoro illustra metodi e risultati relativi alla valutazione preventiva delle emissioni elettromagnetiche di un sistema in alta tensione continua (HVDC) di collegamento tra Italia e Francia costituito da due cavi interrati, posizionato prevalentemente al di sotto del manto autostradale. La valutazione è stata effettuata facendo uso sia di modelli numerici per la previsione del campo generato dai cavi interrati in relazione a diverse modalità di posa, sia di rilievi sperimentali delle emissioni in stazioni di conversione AC/DC. L'attività descritta è stata svolta nell'ambito del progetto TIPE Transmission Infrastructure for Power Exchange, finanziato dalla Regione Piemonte.*

## INTRODUZIONE

Le connessioni in alta tensione continua (*high voltage direct current* - HVDC), utilizzate nel passato quasi esclusivamente per connessioni sottomarine, si stanno diffondendo in alternativa alle tradizionali linee di trasmissione a tensione alternata. Queste connessioni presentano infatti significativi vantaggi sia nella trasmissione di elevate potenze su distanze considerevoli, per le minori perdite in linea che compensano i maggiori costi di installazione, sia nell'interconnessione di sistemi asincroni (generazione distribuita e *offshore*). La posa della linea in cavo interrato, eventualmente utilizzando infrastrutture pre-esistenti (autostrade e gallerie), fornisce inoltre una possibile soluzione a situazioni in cui il tracciato interessa aree a forte densità abitativa.

In sede di progetto la scelta del tracciato del cavo non può prescindere da una valutazione preventiva delle emissioni elettromagnetiche in relazione all'esposizione umana, in tutti i tratti in cui si attraversino zone con infrastrutture pre-esistenti o aree abitative. Tale valutazione dovrebbe includere anche le stazioni di conversione AC/DC di interesse per la molteplicità di sorgenti di campo presenti e l'eventuale contiguità ad aree accessibili alla popolazione e/o ai lavoratori e per la sovrapposizione ad altre sorgenti di campo. La valutazione preventiva delle emissioni e la conseguente stima dell'esposizione possono essere effettuate numericamente, quando siano note tutte le caratteristiche della sorgente e dell'ambiente circostante. Laddove tutti questi elementi non siano noti a priori o l'ambiente sia particolarmente complesso per numero e caratteristiche delle sorgenti e delle apparecchiature circostanti, l'analisi si deve basare su rilievi sperimentali eseguiti su strutture analoghe.

Nel seguito si illustrano metodologie e risultati ottenuti dall'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), in collaborazione con il Politecnico di Torino, nella valutazione preventiva delle emissioni elettromagnetiche prodotte da un sistema in alta tensione continua (HVDC), costituito prevalentemente da cavi posizionati al di sotto del manto autostradale. L'attività è stata svolta nell'ambito del progetto TIPE *Transmission Infrastructure for Power Exchange*, che la Regione Piemonte ha finanziato nel triennio 2008-2010 in vista di un possibile futuro collegamento tra Italia e Francia. Dopo un richiamo delle caratteristiche progettuali delle linee considerate, vengono discusse le diverse procedure utilizzate ed i risultati ottenuti con riferimento alle emissioni delle linee in cavo e delle stazioni di conversione AC/DC. La valutazione è effettuata facendo uso sia di tecniche numeriche, per la previsione del campo generato dalle linee in relazione a diverse modalità di posa, sia di rilievi sperimentali, per la stima delle emissioni all'interno e in prossimità delle stazioni di conversione. Lo studio è completato da misure ante-opera dei livelli di campo statico, a bassa frequenza e a radiofrequenza lungo il percorso ipotizzato per i cavi.

## CARATTERISTICHE DELLE LINEE IN CAVO

Il sistema di trasmissione considerato è formato da due linee (denominate A e B), che costituiscono un sistema bipolare HVDC, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 1. Le linee possono essere gestite indipendentemente, con l'unico vincolo che i flussi di potenza nelle due linee abbiano lo stesso verso. Ciascuna linea è alimentata da trasformatori, collegati in parallelo alla rete trifase, e da unità di conversione, ciascuna delle quali è composta da due convertitori AC/DC a 12 impulsi.

Le due linee possono essere posate secondo tre configurazioni (corsia di emergenza, viadotto, galleria), a seconda delle caratteristiche del tratto autostradale, come descritto qui di seguito.

#1 Posa lungo la corsia di emergenza: i conduttori sono disposti su un piano orizzontale al di sotto di una lastra ferromagnetica (lunghezza 70 cm, spessore 0.6 cm) inserita per motivi di protezione meccanica. I cavi sono posti a una profondità di 130 cm e spazati di 21 cm.

#2 Posa in viadotto: le due linee sono sovrapposte e appoggiate a sostegni metallici la cui presenza non altera in misura significativa la distribuzione del campo magnetico. Le profondità di posa sono rispettivamente di 70 cm (linea A) e di 120 cm (linea B).


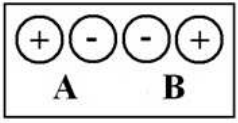
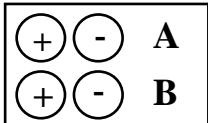
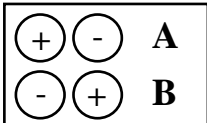
#3 Posa in galleria: i conduttori, disposti su un piano orizzontale all'interno di un tubo in cemento, sono distanziati di 40 cm.

Per ciascuna posa si analizzano le disposizioni delle polarità dei conduttori illustrate in Tabella 2, a cui corrispondono diversi valori dei parametri elettrici (auto e mutue induttanze) della linea.

Tabella 1 – Caratteristiche di una singola linea HVDC

Tensione nominale $U_n$ :	400 kV
Potenza nominale $P_n$ :	500 MW
Corrente d.c. nominale $I_n$ :	625 A
Lunghezza nominale $L_n$ :	184 km

Tabella 2 – Disposizione dei conduttori

 <p>Disposizione 1 Pose #1 e #3</p>	 <p>Disposizione 2 Pose #1 e #3</p>	 <p>Disposizione 1 Posa #2</p>	 <p>Disposizione 2 Posa #2</p>
--	--	--	---

## CAMPO MAGNETICO GENERATO DALLA LINEA IN CAVO

Per valutare le emissioni generate dalle linee HVDC si è fatto uso del codice di calcolo *Powerfield* [1], sviluppato e commercializzato dall'INRIM. Tale codice, basato su un metodo ibrido FEM/BEM (elementi finiti ed elementi al contorno) e sulla tecnica delle "lastre sottili" [2, 3], fornisce la distribuzione del campo magnetico ambientale quando siano noti i dati di progetto delle linee (forma, dimensioni e posizione dei conduttori), le condizioni di alimentazione (componente continua e armoniche della corrente) e le caratteristiche di eventuali schermi magnetici.

Il campo elettrico prodotto dalla linea nell'ambiente circostante è considerato trascurabile, in quanto la presenza di guaine metalliche connesse a terra lo confina all'interno del cavo stesso.

## ANALISI DEL CAMPO MAGNETICO STATICO

Al fine di individuare la configurazione che, a parità di corrente in linea, produce i massimi livelli di campo, si è analizzata la distribuzione del campo magnetico a livello del terreno facendo riferimento ad una corrente unitaria. I valori ottenuti per le tre configurazioni di posa sono

sintetizzati in Figura 1, nei casi in cui sono alimentate sia entrambe le linee, sia una sola di esse. I risultati mostrano che i livelli del campo per la posa #1 sono significativamente inferiori rispetto quelli delle pose in viadotti e gallerie, che rappresentano quindi le condizioni più critiche. Si è inoltre verificato che la disposizione dei conduttori (+ - + -) genera livelli di campo superiori e dovrebbe pertanto essere sostituita, se possibile, dalla disposizione (+ - - +). A titolo di esempio, la Figura 2 mostra la distribuzione spaziale del campo magnetico statico relativo alla posa in galleria, nella disposizione (+ - + -), ipotizzando, per entrambe le linee, una corrente pari a quella nominale  $I_n$  (625 A).

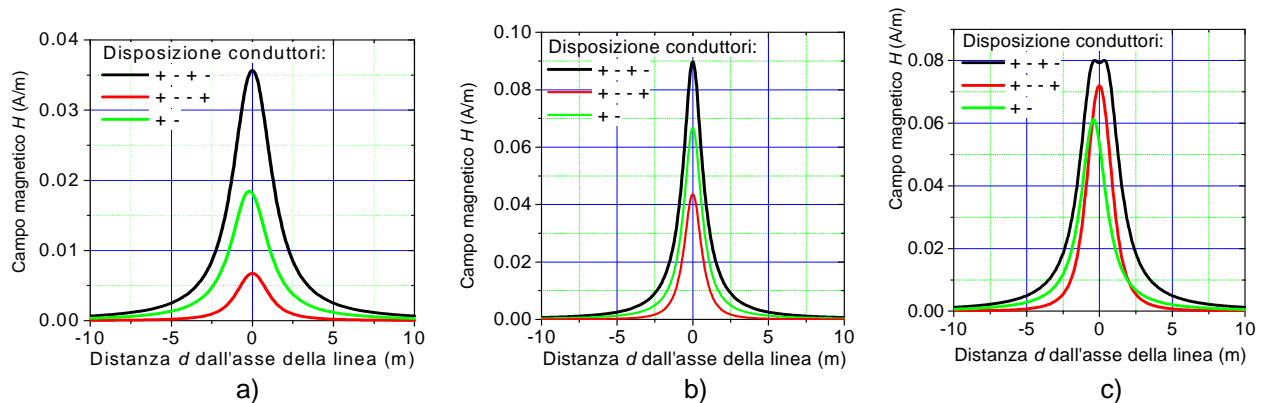


Figura 1 – Distribuzione del campo magnetico lungo una linea orizzontale a livello del terreno, riferita ad una corrente di valore unitario. L'origine del sistema di riferimento è coincidente col centro del sistema di conduttori. a) Posa #1, b) Posa #2, c) Posa #3.

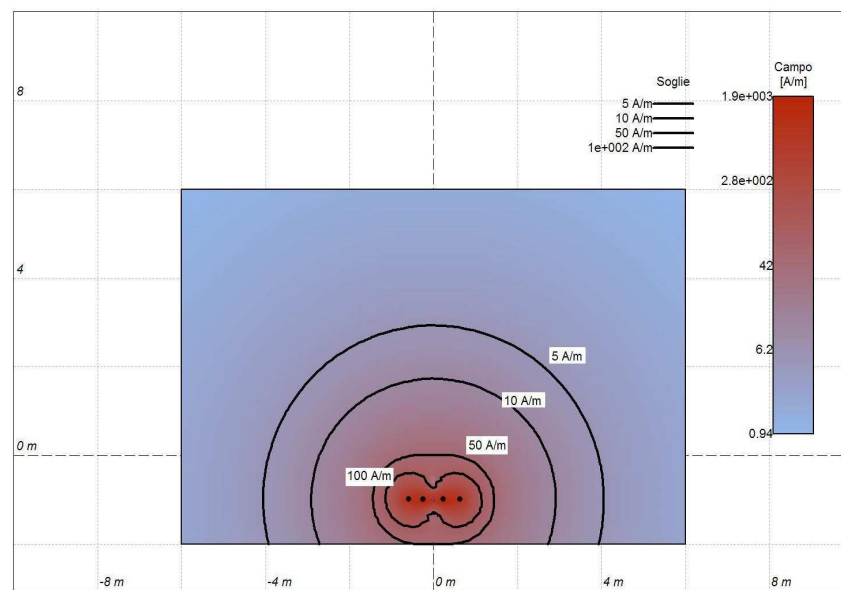


Figura 2 – Distribuzione spaziale del campo magnetico statico per la posa in galleria (#3), con disposizione dei conduttori (+ - + -). Le linee isolivello del campo magnetico relative a 5 A/m, 10 A/m, 50 A/m e 100 A/m sono evidenziate.

I valori di campo magnetico statico prodotti dalla componente DC della corrente di linea (il valore massimo è circa 57 A/m per  $I_n = 625$  A) a livello del terreno risultano sempre notevolmente inferiori rispetto ai livelli di riferimento indicati dall'*International Commission on Non-Ionising Radiation Protection* (ICNIRP) per la popolazione ( $3.2 \cdot 10^5$  A/m) e per i lavoratori ( $1.6 \cdot 10^6$  A/m) rispettivamente [4].

## CAMPO MAGNETICO VARIABILE NEL TEMPO

Il sistema di conversione AC/DC genera componenti armoniche delle correnti che si propagano

lungo la linea, dando origine a campi magnetici periodici [5]. Le componenti armoniche della corrente sono valutate attraverso un modello circuitale che include convertitori e linea. In Figura 3 sono riportate, per la posa #3, le distribuzioni lungo la linea delle armoniche prevalenti con tensioni AC nominali a inizio e fine linea, in assenza di sequenza inversa, e con una potenza trasmessa pari all'80% della potenza nominale. In queste condizioni, sono presenti solo le armoniche multiple di 12 rispetto alla frequenza fondamentale di 50 Hz del sistema AC; in particolare l'armonica 12esima (600 Hz) risulta essere quella prevalente.

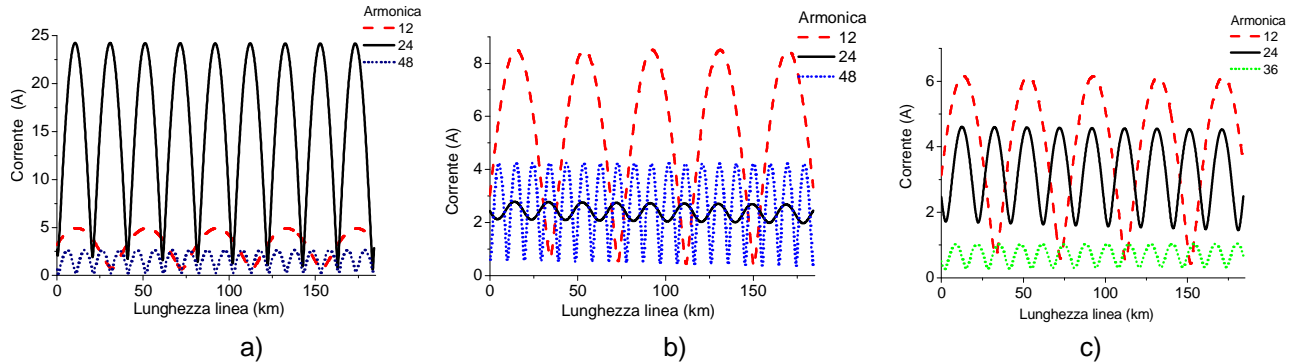


Figura 3 – Distribuzione dell'ampiezza delle componenti armoniche della corrente lungo la linea: a) disposizione dei conduttori (+ - + -), b) disposizione dei conduttori (+ - - +), c) solo una linea alimentata.

Si rileva inoltre un forte incremento dell'armonica 24esima (1200 Hz) nel caso della disposizione (+ - + -), a causa di fenomeni di risonanza, legati alle caratteristiche geometriche delle linee e alla disposizione dei conduttori.

Per un'analisi sistematica delle diverse situazioni che si presentano si introduce la funzione  $K_p$  che rappresenta la distribuzione magnetico generato da una corrente unitaria in direzione verticale. La funzione  $K_p$ , determinata con simulazioni numeriche, dipende dalla configurazione di posa e dalla disposizione dei conduttori. Al fine di verificare il rispetto dei livelli di riferimento per l'esposizione umana, deve essere soddisfatto il seguente criterio:

$$I_n \cdot f_n \leq \frac{f_n H_{ICNIRP}^n}{K_p} = \frac{f_n}{K_p} \cdot \frac{64000}{f_n} = \frac{64000}{K_p} \quad (1)$$

dove  $n$  è l'ordine dell'armonica di frequenza  $f_n$ ,  $I_n$  è il valore efficace della corrispondente corrente armonica e  $H_{ICNIRP}^{(n)}$  rappresenta il livello di riferimento indicato dall'ICNIRP [6], che nella gamma di frequenze da 400 Hz a 3 kHz è pari a  $64000/f_n$  A/m. Poiché il valore di  $K_p$  a livello del terreno è, per ogni configurazione analizzata, inferiore a  $0.08 \text{ m}^{-1}$ , la condizione (1) risulta sempre ampiamente verificata per tutte le armoniche considerate.

## VALUTAZIONE DELLE EMISSIONI ELETTROMAGNETICHE DELLA STAZIONE DI CONVERSIONE AC/DC

Il rilievo sperimentale delle emissioni elettromagnetiche generate da una sottostazione di conversione AC/DC in alternativa all'uso di modelli numerici è dettato dalla complessità e dalla quantità delle sorgenti di campo, che riducono drasticamente i vantaggi di una simulazione numerica. Si è fatto quindi riferimento alla sottostazione di proprietà di Terna SpA, che alimenta la connessione HVDC sottomarina (500 MW, 400 kV) tra Italia e Grecia. L'interconnessione (di lunghezza pari a 167 km) è realizzata mediante un sistema monopolare, utilizzando il mare come conduttore di ritorno. Sul lato italiano la sottostazione è connessa alla linea sottomarina tramite un cavo interrato di lunghezza pari a 43 km, mentre sul lato greco la connessione con la sottostazione di conversione avviene mediante una linea aerea di lunghezza pari a 110 km [7].

L'analisi delle emissioni elettromagnetiche della sottostazione di conversione è stata condotta distinguendo i diversi contributi dovuti alle sorgenti presenti. Si sono misurati il campo magnetico statico e a bassa frequenza e il campo elettromagnetico a radiofrequenza, individuandone le

principali sorgenti nelle aree accessibili esterne all'edificio dei convertitori, sintetizzate in Tabella 3. Le misure di campo magnetico statico sono state limitate al lato DC e lungo il percorso del cavo HVDC. Le misure a bassa frequenza e a radiofrequenza sono state effettuate sia sul lato AC, sia su quello DC. In tutte le misure la sonda di campo è stata posizionata a 1.1 m dal suolo.

Tabella 3 - Sorgenti di campo e aree di misura

Sorgenti		Aree di misura
<b>Campo magnetico statico</b>	Convertitori AC/DC Conduttore HVDC aereo Cavo interrato Conduttori di ritorno	A Sotto conduttore DC in uscita dall'edificio dei convertitori, tra l'edificio e l'induttore di spianamento B A lato dell'induttore di spianamento C Discesa cavo verso l'interramento D Sopra il cavo interrato E Cavi di ritorno
<b>Campo magnetico a bassa frequenza</b>	Linee trifase HV AC 380 kV Trasformatori Convertitori AC/DC	F Sotto la linea 380 kV, ingresso edificio convertitori G Sotto la linea 380 kV, vicino ai filtri AC C Discesa cavo verso l'interramento B A lato dell'induttore di spianamento
<b>Campo elettromagnetico a radiofrequenza</b>	Convertitori AC/DC Conduttori aerei (effetto corona)	A Sotto conduttore DC in uscita dall'edificio dei convertitori, tra l'edificio e l'induttore di spianamento B A lato dell'induttore di spianamento C Discesa cavo verso l'interramento F Sotto la linea 380 kV, ingresso edificio convertitori; G Sotto la linea 380 kV, vicino ai filtri AC

Durante la campagna di misure [8] la potenza  $P$  erogata dalla sottostazione è risultata variabile tra 200 MW e 500 MW (valore nominale  $P_N$  della sottostazione). Il massimo carico è stato riscontrato nelle ore centrali della giornata. I valori rilevati sono stati sempre correlati al valore istantaneo di carico della sottostazione.

Le caratteristiche principali della strumentazione di misura utilizzata sono riassunte in Tabella 4. Tutti i misuratori sono stati preliminarmente tarati presso l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) mediante i sistemi di generazione di campi magnetici ed elettromagnetici di riferimento [9, 10]. L'incertezza relativa (livello di fiducia 95%) associata ai valori di misura riscontrati, valutata tenendo conto dei contributi dovuti a taratura e condizioni di misura *on-site*, è risultata contenuta tra il 10% e il 20%.

Tabella 4 - Strumentazione di misura

Campo	Misuratore/sonda	Banda passante	Intervallo di misura
Campo magnetico statico	NARDA – mod. ETM-1 Sonda Hall 3D	DC	0.010 mT – 2 T
Campo magnetico a bassa frequenza	1) NARDA mod. EFA300 Sonda esterna 3D 100 mm <sup>2</sup>	5 Hz÷32 kHz	10 nT a 32 mT
	2) NARDA mod. ELT 400 Sonda esterna 3D 100 mm <sup>2</sup> - Uscita analogica tre componenti di campo. Oscil. digitale Yokogawa (8 bit, 10 MS/s)	10 Hz÷400 kHz	50 nT÷80 mT
Campo elettromagnetico a radiofrequenza	Holaday mod. HI-4422	10 kHz÷1GHz	1 V/m÷300 V/m

## RISULTATI DI MISURA E CONFRONTO CON I LIVELLI DI RIFERIMENTO

### *Campo magnetico statico*

I valori di induzione magnetica misurati sotto l'uscita del conduttore DC e in prossimità dell'induttore di spianamento variano da 0.13 a 0.21 mT, che corrispondono a 0.19 mT e 0.31 mT se riportati alla potenza nominale  $P_N$ . Valori più elevati, fino a 0.65 mT (riferiti a  $P_N$ ) sono stati riscontrati in prossimità del cavo HVDC (area di misura C), posizionando la sonda all'interno della griglia di protezione.

### Campo magnetico variabile nel tempo

Misure di campo magnetico variabile nel tempo sono state effettuate sul lato AC della stazione di conversione. La Figura 4 mostra gli andamenti temporali delle tre componenti di campo misurate sotto i conduttori di fase ad una distanza di circa 7.7 m dal trasformatore posto in ingresso alla stazione di conversione. La potenza  $P$  erogata al momento della misura era pari a  $42\%P_N$ . L'ampiezza (valori di picco) delle componenti armoniche (Figura 4b) mostra che, come atteso, sono presenti le sole componenti di 11esima e 13esima armonica (fisiologiche per la strategia di conversione adottata). Il campo magnetico risultante sotto i conduttori e in prossimità dei filtri AC è dello stesso ordine di grandezza.

Misure di campo variabile nel tempo sono state effettuate anche sul lato DC della stazione, allo scopo di rilevare le sole componenti armoniche. La Figura 5a mostra le forme d'onda dell'induzione magnetica registrate posizionando la sonda di campo a 0.6 m di distanza dal cavo HVDC (area di misura C, a una distanza di circa 10 m dall'edificio dei convertitori), all'interno della griglia metallica di protezione intorno al percorso discendente del cavo. L'ampiezza delle componenti armoniche dell'induzione magnetica è riportata nel grafico in Figura 5b.

Oltre all'armonica a 600 Hz e ai suoi multipli, si evidenziano una componente a 300 Hz (attribuibile a un imperfetto coordinamento dei due ponti AC/DC) e una a 100 Hz (verosimilmente dovuta a uno squilibrio delle tensioni AC).

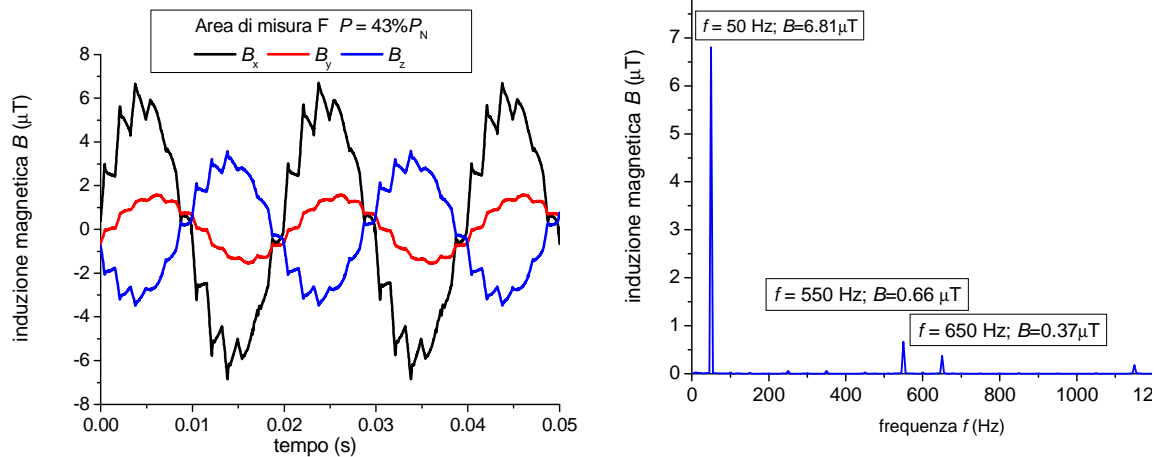


Figura 4 – Induzione magnetica misurata sul lato AC: a) forme d'onda delle componenti di induzione; b) ampiezza delle componenti armoniche.

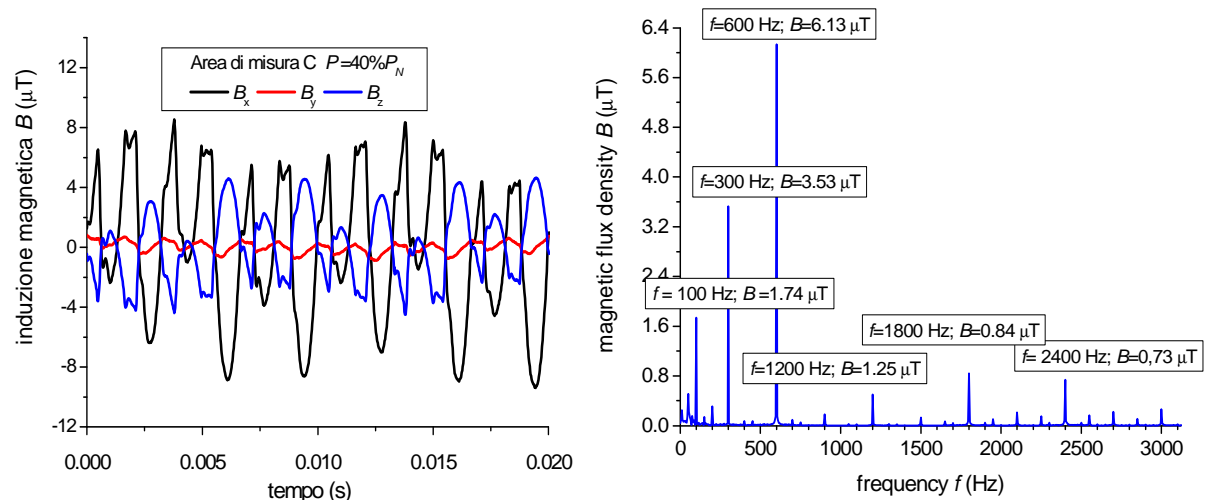


Figura 5 – Induzione magnetica misurata in prossimità del cavo DC (0.6 m): a) forme d'onda delle componenti di induzione; b) ampiezza delle componenti armoniche.

Andamenti analoghi si riscontrano in prossimità dell'edificio dei convertitori (aree di misura A e B). Si sottolinea che l'ambiente in esame è caratterizzato dalla presenza di numerose sorgenti di campo magnetico e di parti metalliche conduttrici e/o ferromagnetiche che possono perturbare la distribuzione del campo. Infine, sorgenti di campo magnetico a 50 Hz (ad esempio linee HVAC e alimentazioni dei servizi ausiliari) giustificano la presenza, sul lato DC di campi magnetici a 50 Hz di ridotta intensità.

I rilievi a radiofrequenza, effettuati sia sul lato AC in prossimità dell'edificio dei convertitori (area di misura F), sia sul lato DC in prossimità del cavo HVDC (aree di misure C e D), sono risultati sempre inferiori a 6 V/m.

## VALUTAZIONE DELL'ESPOSIZIONE E CONFORMITÀ AI LIVELLI DI RIFERIMENTO.

Per quanto riguarda i livelli di campo magnetico statico, la conformità ai limiti ICNIRP [4] è stata riscontrata, in tutte le situazioni considerate, per diretto confronto con il limite indicato sia per i lavoratori (2 T), sia per la popolazione (400 mT), facendo riferimento ai valori di induzione riportati alla potenza nominale  $P_N$ .

Nel caso del campo magnetico a bassa frequenza, si è valutata la conformità alle prescrizioni valutando l'indice di esposizione  $T$  mediante la relazione che implementa l'approccio più cautelativo [6]:

$$T = \sum_{f_n} \frac{B(f_n)}{B_{\text{lim}}(f_n)} \leq 1 \quad (2)$$

dove  $B(f_n)$  è l'ampiezza dell'armonica di ordine  $n$  e  $B_{\text{lim}}(f_n)$  è il corrispondente livello di riferimento. La conformità ai limiti è stata largamente verificata ( $T < 0.1$ ) in tutte le zone esaminate. A causa delle armoniche generate dal convertitore, gli indici massimi si riscontrano sul lato DC, sebbene i valori di campo più elevati siano stati misurati sul lato AC. Il contributo delle componenti armoniche di ordine elevato, sebbene di entità limitata, è il più significativo in quanto i livelli di riferimento si riducono con la frequenza.

Con riferimento infine al campo elettromagnetico RF, i valori rilevati presso l'edificio di conversione lato DC e AC (A, B, F e G) e in prossimità del cavo (C, E), sono risultati di alcune unità di volt al metro, inferiori di almeno un ordine di grandezza rispetto al livello di riferimento più restrittivo (61 V/m) nella gamma di frequenza di interesse.

## VALUTAZIONE ANTE OPERA DELL'AMBIENTE ELETTROMAGNETICO

I livelli di campo pre-esistenti all'installazione sono stati stimati con una campagna di misure lungo l'autostrada A32 e nell'area circostante la stazione elettrica di Piosasco (TO).

Sono state identificate a tal fine le sorgenti di campo presenti lungo il percorso autostradale (campo magnetico terrestre e linee di trazione ferroviaria, cabine, linee di trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica, alimentazione dei servizi autostradali, trasmettitori per telefonia mobile, radio-TV e per comunicazioni di servizio). Sono state quindi selezionate nove postazioni ritenute rappresentative dell'intero percorso (barriera tunnel, barriera autostradale, gallerie, piazzole di sosta). Le misure sono state eseguite con la strumentazione descritta in precedenza per quanto riguarda il campo magnetico a bassa frequenza (Tabella 4). Per i rilievi di campo statico si è fatto uso del misuratore triassiale "flux-gate" Bartington Mag-03 (intervallo di misura 1 nT÷170 µT), mentre, per quanto riguarda la banda RF, sono state effettuate anche misure a banda stretta con opportune antenne (EMCO mod. 6507, banda di frequenza 10 kHz÷30 MHz, e ARC mod. PCD-8250, banda di frequenza 80 MHz÷2.5 GHz) e associato analizzatore di spettro (ROHDE & SCHWARZ mod. FSP-13).

Il campo magnetico statico misurato è risultato compreso tra 35 µT e 60 µT. I valori di induzione per il campo magnetico BF sono risultati non superiori a qualche centinaio di nanotesla. I campi RF misurati, di cui un esempio è riportato in Figura 6, sono rappresentativi di livelli e frequenze riscontrabili in ambienti suburbani: i valori massimi, in relazione alla gamma di frequenza esplorata, sono risultati sempre inferiori a 1 V/m (telefonia mobile, comunicazioni di servizio).

Per quanto riguarda infine i rilievi in prossimità della sottostazione elettrica di Piossasco, lungo il percorso ipotizzato per il cavo HVDC sino all'ingresso della stazione, si sono riscontrati i valori tipici attesi in prossimità di linee di trasmissione AC.

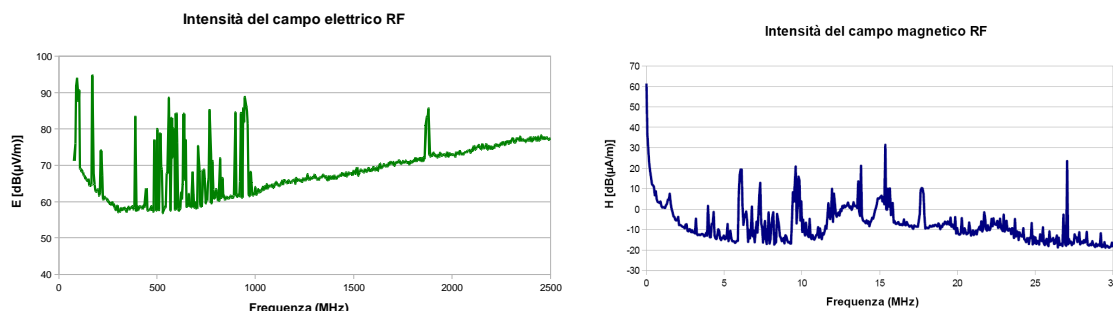


Figura 6 – Intensità del campo elettrico e magnetico a radiofrequenza, rilevate nell'area di una piazzola autostradale

## CONCLUSIONI

La valutazione preventiva delle emissioni elettromagnetiche di un sistema di trasmissione in alta tensione continua (HVDC) richiede la messa a punto di specifici strumenti numerici e la definizione e sperimentazione di procedure di misura per la previsione delle caratteristiche del campo generato, in funzione delle diverse soluzioni costruttive adottabili. L'applicazione degli strumenti sviluppati per lo studio dell'impatto elettromagnetico di una linea HVDC di collegamento tra Italia e Francia, effettuato nell'ambito del progetto TIPE finanziato dalla Regione Piemonte, ha evidenziato, con riferimento alle soluzioni di progetto considerato (posa del cavo prevalentemente al disotto del manto autostradale), la compatibilità delle emissioni con i limiti attualmente indicati per l'esposizione della popolazione.

## RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano il Prof. M. Pastorelli e l'Ing. E. Pons, per gli indispensabili contributi forniti e la Terna S.p.A. per aver consentito l'effettuazione delle misure "in situ".

## Bibliografia

- [1] Software Powerfield™, [www.powerfield.it](http://www.powerfield.it)
- [2] O. Bottauscio, M. Chiampi, A. Manzin, "Numerical analysis of magnetic shielding efficiency of multilayered screens," *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 40, pp. 726-729, 2004.
- [3] O. Bottauscio, M. Chiampi, A. Manzin, "Nonlinear ferromagnetic shield modeling by the thin-shell approximation", *IEEE Trans. Mag.*, Vol. 42, pp. 3144-3146, 2006.
- [4] ICNIRP "Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields", *Health Physics* 96 (4) (2009).
- [5] L. Zilberti, E. Pons, O. Bottauscio, M. Chiampi, M. Pastorelli. "Evaluation of the Electromagnetic Environment Around Underground HVDC Lines", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 25, no. 4, pp. 3085-3094 (2010).
- [6] ICNIRP "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)", *Health Physics*, vol. 99, n. 6, pp. 818-836 (2010).
- [7] A. Giorgi et al. "The Italy-Greece HVDC link", *CIGRE Session*, 2002, Paper 14-116.
- [8] Borsero, G. Crotti, G. Vizio, L. Zilberti, "Measurement of magnetic and electromagnetic fields in a HV AC/DC conversion substation". *Proceedings of the 16th International Symposium on High Voltage Engineering - ISH2009*, pp. 368-373, Cape Town (South Africa), August 2009.
- [9] M. Borsero, G. Crotti, L. Anglesio, G. D'Amore., "Calibration and evaluation of uncertainty in the measurement of environmental electromagnetic fields", *Rad. Prot. Dos.*, Vol. 97, no. 4, pp. 363-368 (2001).
- [10] M. Chiampi, G. Crotti, D. Giordano: "Set up and characterization of a system for the generation of reference magnetic fields from 1 to 100 kHz", *IEEE Trans. IM*, Vol. 564, no. 2, pp. 300-304 (2007).