

Valutazione di emissioni elettromagnetiche prodotte da impianti in alta tensione continua

M. Borsero (°), O. Bottauscio (°), M. Chiampi (*),
G. Crotti (°), L. Zilberti (°)

(°) Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM), Torino

(*) Dip. Energia, Politecnico di Torino

Introduzione

Obiettivo

*Valutazione ante-opera delle emissioni elettromagnetiche di
della connessione HVDC Piossasco-Grand'Ile*

(Progetto regionale *TIPE Transmission Infrastructure for Power Exchange*)

Sommario

- Caratteristiche della linea in studio
- Analisi delle emissioni elettromagnetiche della linea in cavo
- Analisi delle emissioni elettromagnetiche delle sottostazioni di conversione a.c./d.c.
- Misure *ante-opera* sui siti interessati dall'opera

Caratteristiche del sistema

Sistema HVDC, costituito da due linee bipolari (A e B)

Ogni linea è alimentata da trasformatori, collegati in parallelo al sistema trifase.

Ciascuna unità di conversione è composta da due convertitori AC/DC a 12 impulsi

Caratteristiche di ogni singola linea

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

(*) prevalentemente sotto manto autostradale

Campi elettromagnetici generati

Campo elettrico statico, interesse limitato poichè:

- Il campo elettrico prodotto dalla linea interrata è sostanzialmente confinato all'interno del cavo stesso
- Il campo elettrico generato dalla sezione d.c. nelle stazioni di trasformazione a.c./d.c. è di scarso interesse, non essendoci limiti normativi a riguardo

Campo magnetico statico/bassa frequenza, generato da:

- Una componente d.c. principale (connessa con la potenza che si intende trasferire)
- Componenti armoniche (rispetto al 50 Hz dell'alimentazione lato a.c.) il cui spettro varia da 100 Hz ad alcuni kilohertz, in dipendenza dalle condizioni di esercizio e dalle modalità di funzionamento dei convertitori a.c./d.c.

Campo elettromagnetico a radiofrequenza

- Presente in prossimità dei gruppi di conversione a.c./d.c. delle stazioni di trasformazione.

Emissioni delle linee in cavo interrato

Per valutare le emissioni generate dalle linee HVDC si è fatto uso del codice di calcolo *Powerfield* [www.inrim.it], sviluppato dall'INRIM.

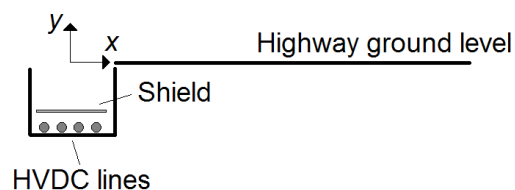
Il codice si basa su un metodo ibrido FEM/BEM e sulla tecnica dei “thin shields” (schermi sottili)

Dati di input:

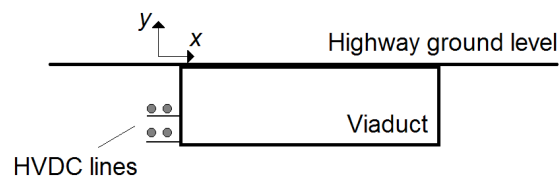
- ☐ dati di progetto delle linee (forma, dimensioni e posizione dei conduttori)
- ☐ condizioni di alimentazione (componente continua e armoniche della corrente)
- ☐ caratteristiche di eventuali schermi magnetici.

Linea in cavo: Layout di posa

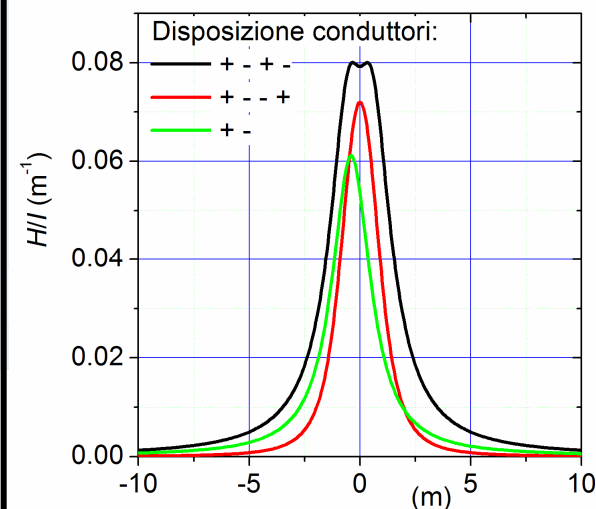
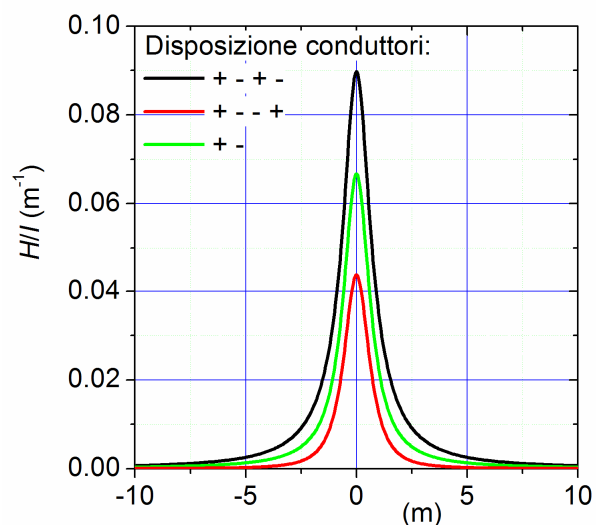
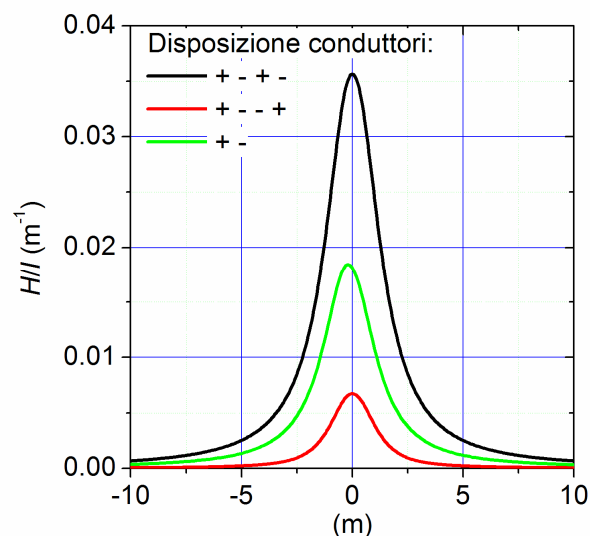
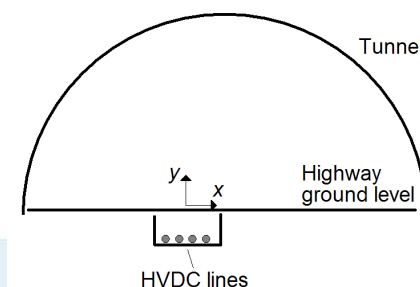
Lato corsia autostradale #1



Viadotto #2



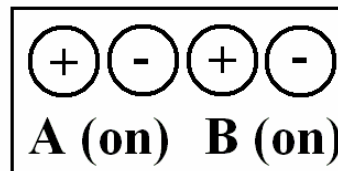
Galleria #3



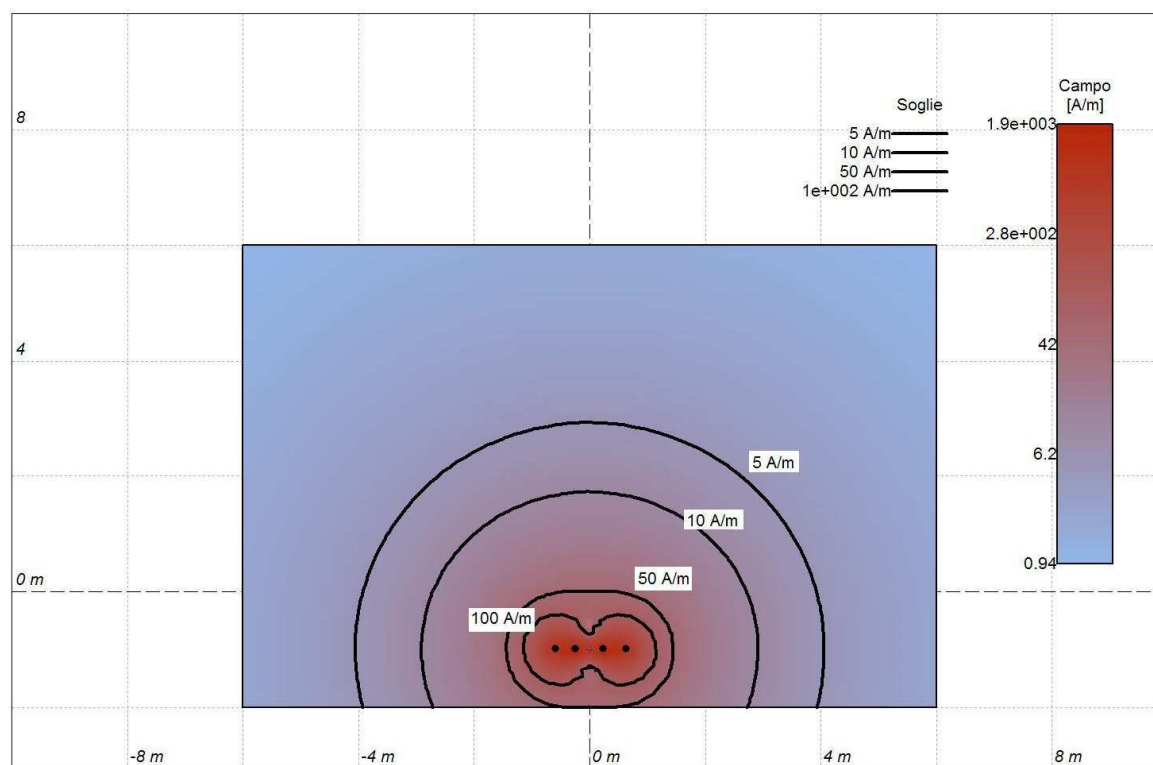
Distribuzioni campo magnetico a livello del terreno per una corrente unitaria

Campo magnetico statico

Distribuzione spaziale del campo magnetico statico per la posa in galleria con disposizione



Corrente nominale d.c. = 625 A

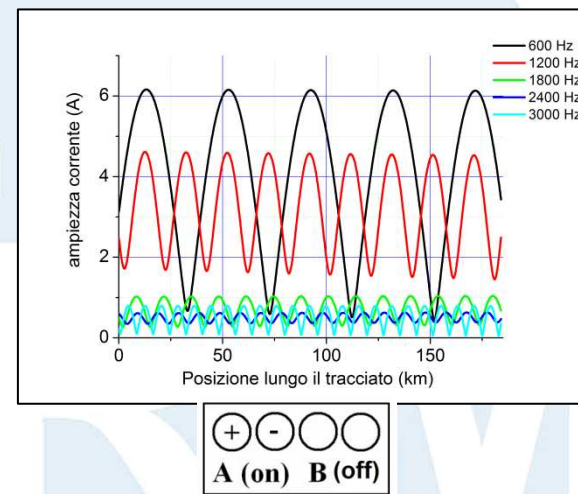
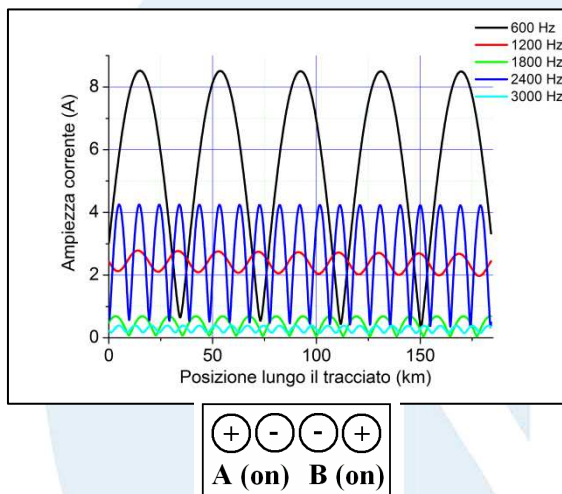
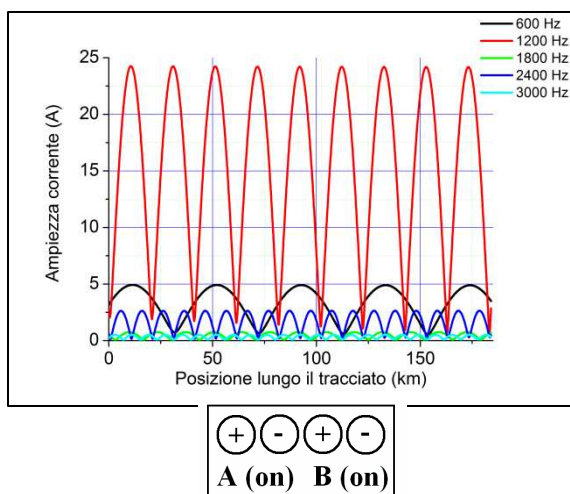


I livelli di riferimento ICNIRP:
 $3.2 \cdot 10^5$ A/m Popolazione
 $1.6 \cdot 10^6$ A/m Lavoratori
sono ampiamente rispettati

Campo magnetico tempovariante

- E' il campo magnetico generato dalla armoniche di corrente che fluiscono lungo il cavo.
- Dipendentemente dalle condizioni di posa e di esercizio variano:
 - lo spettro armonico (ordine armoniche multiple di 12: 600 Hz, 1200 Hz,.....);
 - l'ampiezza delle singole componenti armoniche;
 - la loro distribuzione spaziale lungo il percorso della linea.

Distribuzione spaziale delle armoniche di corrente nel caso di una potenza trasmessa pari all'80%



Stazioni di conversione AC/DC

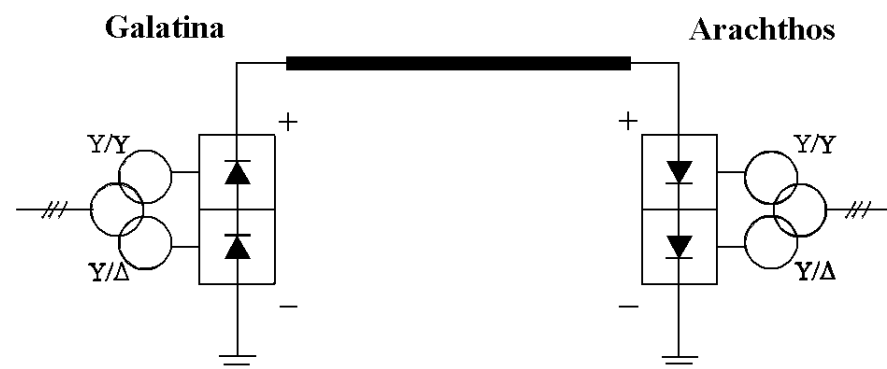
Ambiente complesso:

- **più sorgenti di campo presenti**
- **emissioni dipendenti dal layout della stazione**



Rilievi in una stazione di conversione già operativa

GRITA: la connessione HVDC Italia-Grecia*






Sistema a singola polarità con corrente di ritorno via mare

Potenza e tensione nominali	500 MW, 400 kV
Cavo interrato (Italia)	Lunghezza: 43 km, Sezione: 1200 mm ²
Cavo sottomarino	Lunghezza: 167 km, Sezione: 1250 mm ²
Strategia di conversione	Convertitore a 12 impulsi con tiristori (2 ponti AC/DC a 6 impulsi connessi in serie)
Trasformatori monofase con doppio secondario	Potenza nominale: 199 MVA / 99.5 MVA / 99.5 MVA
	Tensione nominale: 231 kV (YN) / 99.1 kV (Y) / 171.7 kV (Δ)
Induttore di spianamento (in aria)	Induttanza: 225 mH

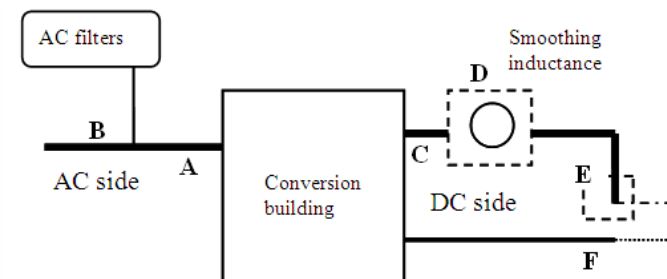
*A. Giorgi, et al. "The Italy-Greece HVDC link", CIGRE Session, 2002, Paper 14-116.

Sorgenti di campo e strumentazione di misura

<p>Arachthos: lato DC</p> 	<p><u>Campo DC</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Conduttore in uscita lato DC ▪ Induttore di spianamento ▪ Cavo interrato ▪ Conduttori di ritorno 	<p>NARDA mod. ETM-1</p> <p>Sonda Hall 3D</p>
<p>Galatina: lato AC</p>  	<p><u>Campo AC</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Linea AT trifase in ingresso ai convertitori ▪ Trasformatori ▪ Alimentazione servizi ▪ Altre linee HV AC ▪ Convertitori AC/DC 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ NARDA EFA 300 (5 Hz – 32 kHz) ▪ NARDA ELT400 (10 Hz – 400 kHz) <p>+ oscilloscopio digitale (sonda 3D 100 cm²)</p>
	<p><u>Campo a radiofrequenza</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Convertitori AC/DC ▪ Corona 	<p>Holaday HI-4422 (10 kHz – 1 GHz)</p>

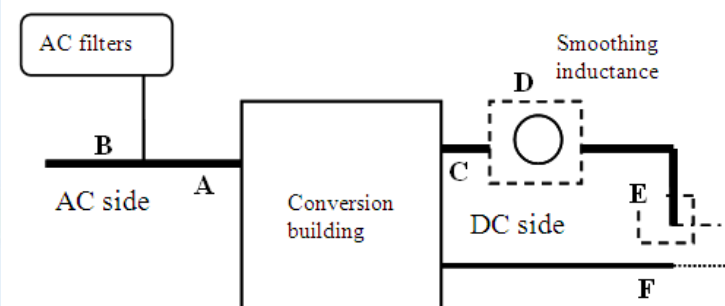
Punti di misura

Zone di misura	
A	Sotto i conduttori della linea AC 380 kV, vicino all'edificio di conversione
B	Sotto i conduttori della linea AC 380 kV, vicino ai filtri AC
C	Sotto il conduttore DC, tra l'edificio di conversione e l'induttore
D	Nell'interno dell'induttore di spianamento
E	Vicino al punto di interramento del cavo
F	Al di là del conduttore di ritorno
G	All'interno del recinto della sottostazione, lontano dall'edificio di conversione



Risultati di misura: Campo magnetico DC

Zona di misura	Induzione magnetica (mT)	
	Valori misurati	Valori normalizzati alla potenza nominale
C Sotto il conduttore DC in uscita	0.18	0.26
D Vicino all'induttore	Da 0.13 a 0.21	Da 0.26 a 0.41
E Da 0.5 m a 2 m dal cavo HVDC	Da 0.13 a 0.53	Da 0.15 a 0.63
F Da 0.5 m a 1.5 m dal cavo di ritorno	Da 0.1 a 0.25	Da 0.15 a 0.37



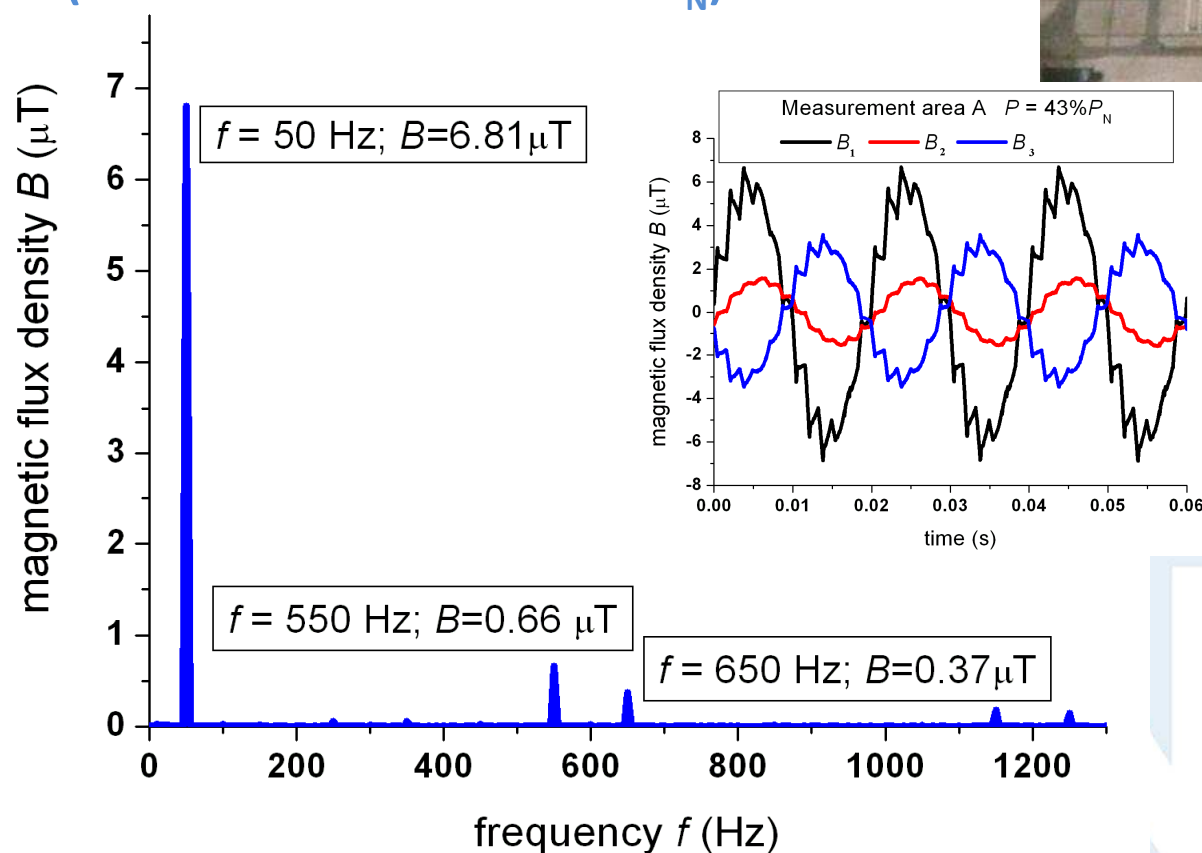
Induzione magnetica sopra al cavo interrato alla profondità di 1.5 m → 0.04 mT.

Sia i valori misurati che quelli correlati a P_N sono inferiori ai limiti ICNIRP (2 T per i lavoratori e 400 mT per la popolazione generica).

Risultati di misura: Campo magnetico a bassa frequenza

Lato AC

Zona A: sotto uno dei conduttori di fase laterali, a circa 7.7 m dai trasformatori
(Potenza effettiva $P = 43\% P_N$)



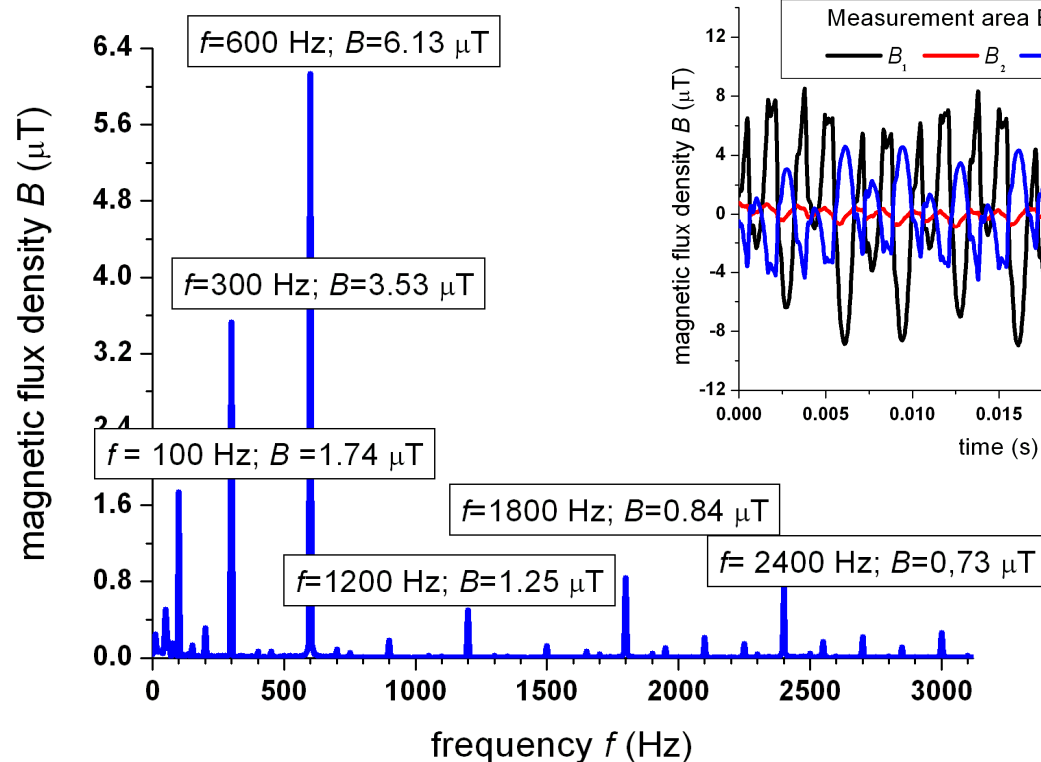
Come previsto, sono presenti solo le armoniche di ordine 11 e 13

Risultati di misura: Campo magnetico a bassa frequenza

Lato DC

Zona di misura E a 0.6 m dal cavo discendente ($B_{DC} = 0.53 \text{ mT}$).

(Potenza effettiva $P = 40\% P_N$)



Oltre alla prevista armonica a 600 Hz e ai suoi multipli, sono presenti sia una componente a 100 Hz, sia una a 300 Hz.

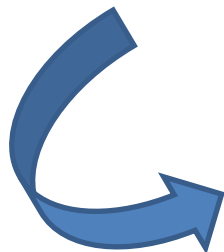
Esposizione ai campi a bassa frequenza

Zona di misura	Indice di esposizione T
A/B (lato AC)	0.097
E/F (lato DC)	0.31
E (all'interno della griglia di protezione)	0.63

Conformità ai limiti ICNIRP*:

$$T = \sum_{f_i=1\text{Hz}}^{65\text{kHz}} \frac{B(f_i)}{B_{\text{lim}}(f_i)} + \sum_{f_i>65\text{kHz}}^{10\text{MHz}} \frac{B(f_i)}{b} \leq 1$$

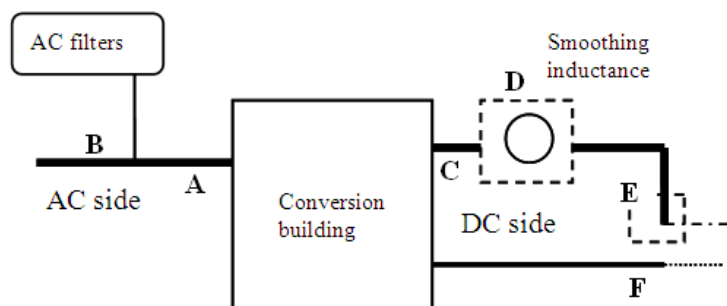
- ✓ La conformità ai limiti è stata verificata in tutte le zone esaminate
- ✓ A causa delle armoniche generate dal convertitore gli indici massimi sono riscontrati sul lato DC, sebbene i valori di campo più elevati siano stati misurati sul lato AC.



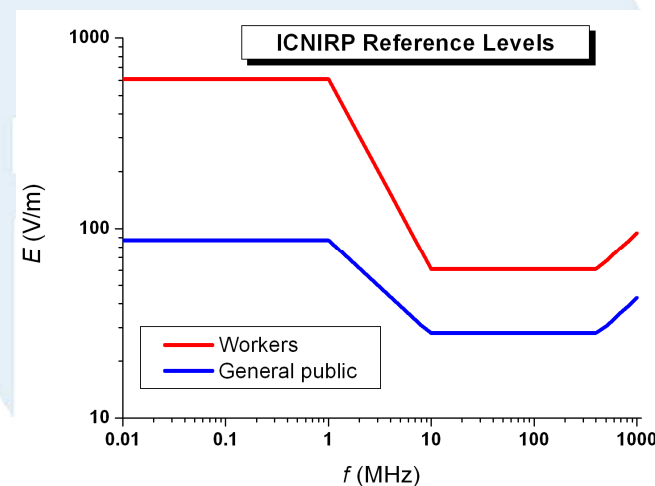
Il contributo delle componenti armoniche di ordine elevato, sebbene di entità limitata, è il più significativo poiché i livelli di riferimento si riducono con la frequenza.

Risultati di misura: Campi a radiofrequenza

Sia sul lato AC vicino all'edificio di conversione (A), sia sul lato DC in prossimità del cavo (E, F), i campi RF sono risultati contenuti entro **alcune unità di volt al metro**.



I valori massimi del campo risultante misurato sono almeno un ordine di grandezza inferiori rispetto ai più severi livelli stabiliti per la banda di frequenza considerata.



Misure ante-opera (A32 e sottostazione Piossasco)

Scopo

Valutazione ante-opera dei livelli di campo magnetico ed elettromagnetico lungo il tracciato di posa del cavo

Modalità

- **Identificazione delle possibili sorgenti di campo**

DC ➡ campo terrestre, linee di trazione ferroviaria

AC ➡ cabine, elettrodotti e linee di distribuzione e utilizzo dell'energia elettrica, alimentazione servizi autostrada

RF ➡ trasmettitori per telefonia mobile, radio TV e per telecomunicazioni

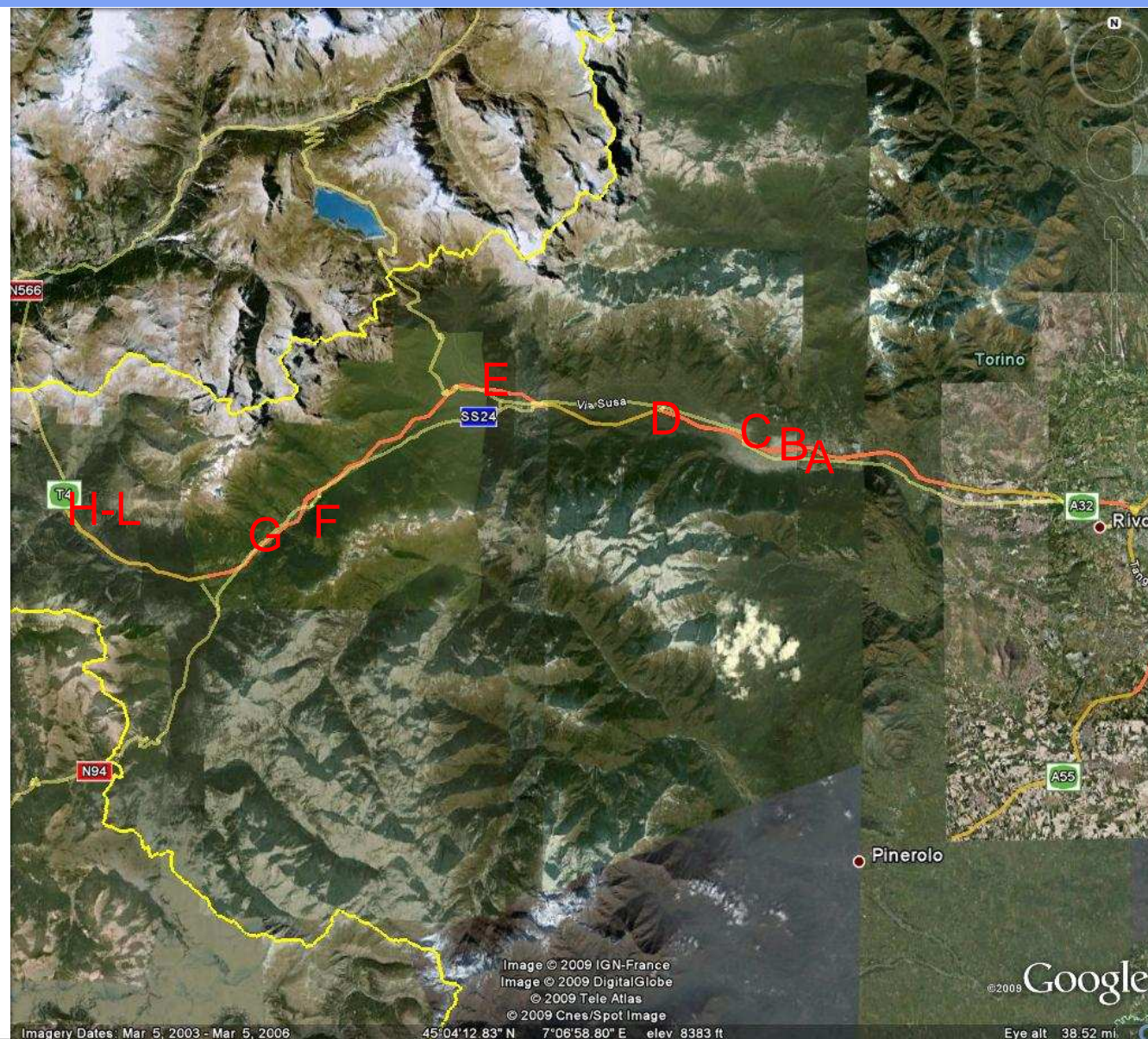
- **Sopralluogo e localizzazione della sorgenti**

- **Scelta delle postazioni di misura**

- **Rilievi sul campo**

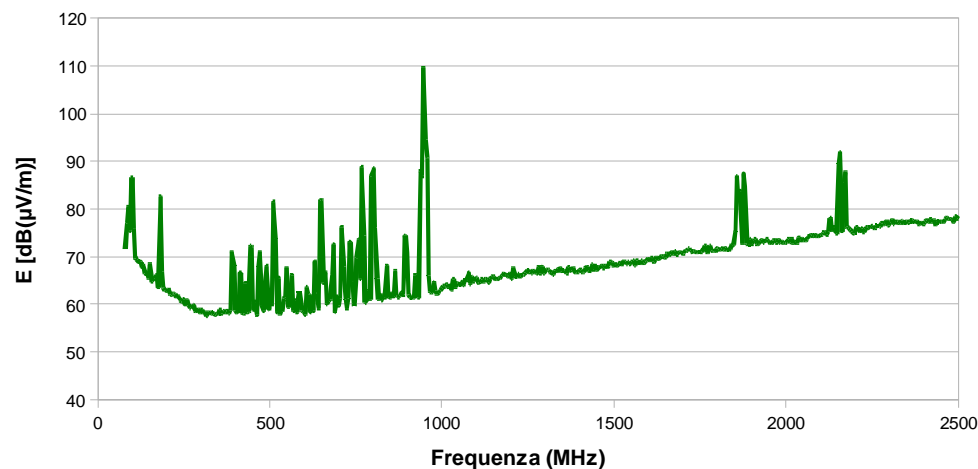
Autostrada A32: Postazioni di misura

	Postazione km/direzione
A	km 20.3 - Carreggiata /Torino
B	km 22.35 – Carreggiata /Frejus
C	km 24 - piazzola/Frejus
D	km 30 - galleria /Frejus
E	km 36 - Galleria Mompantero/Torino
F	km 54 - area sosta Salbertrand/Frejus
G	km 58 - Barriera Salbertrand/Frejus
H	piazzale barriera Frejus/Torino
L	imbocco Tunnel Frejus/Francia

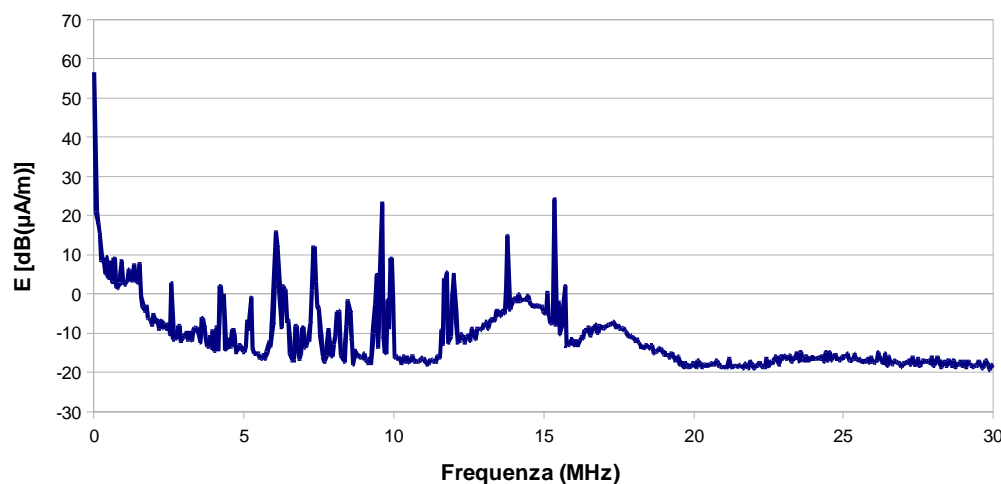


Postazione E - km 36 direzione TO: galleria Mompantero

Intensità del campo elettrico RF



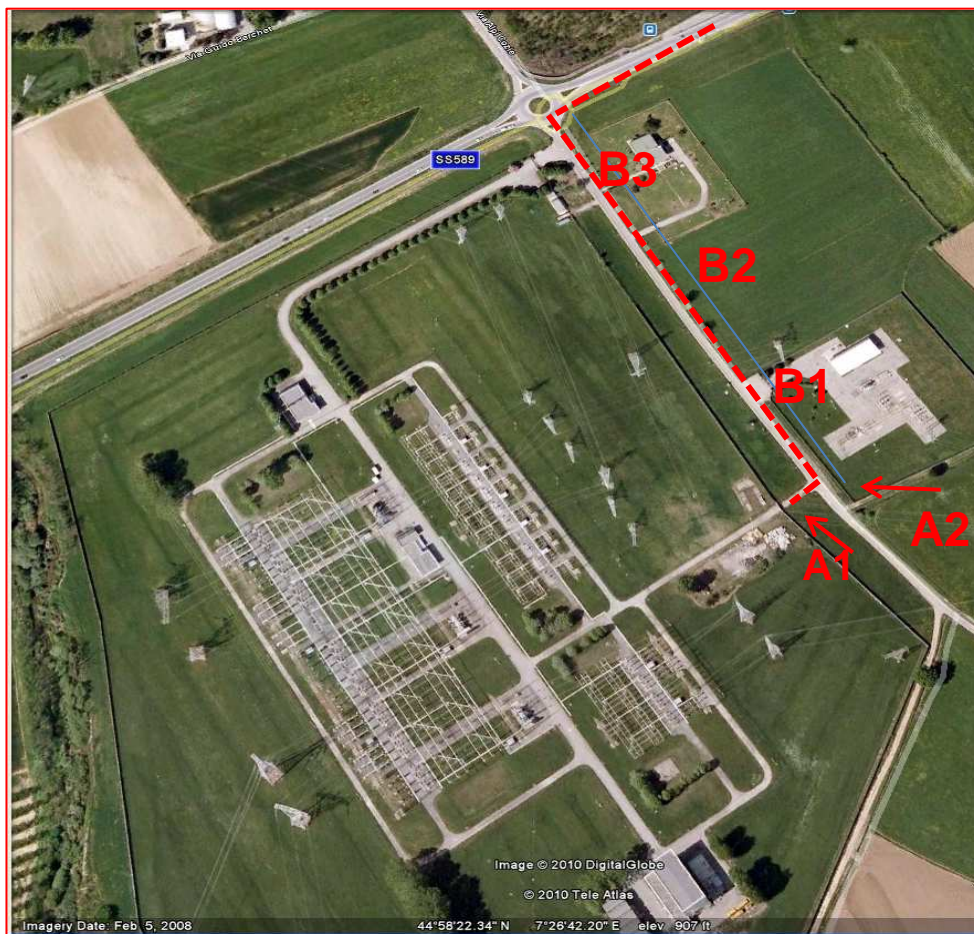
Intensità del campo magnetico RF



Induzione magnetica DC:
fronte ingresso cabina: 46 μT

Induzione magnetica AC:
fronte ingresso cabina: 50 nT
in corrispondenza del cavo, a
20 cm dal terreno: 220 nT

Arrivo cavo - Piosasco Sottostazione Terna



Punti di misura

A1 ingresso cavo – perimetro stazione

A2 – arrivo cavo in corrispondenza linea

B1 – in corrispondenza linea AC

B2 – in corrispondenza linea AC

B3 – ingresso sottostazione

Considerazioni conclusive

- **E' stata messa a punto e sperimentata una strategia per la valutazione ante-opera delle emissioni di linee HVDC**
- **La valutazione 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**
- **Con riferimento alle soluzioni di progetto considerato (posa del cavo prevalentemente al disotto del manto autostradale), si è riscontrata la compatibilità delle emissioni con i limiti indicati per l'esposizione della popolazione.**

Ringraziamenti

Si ringraziano la Terna S.p.A. e la SITAF S.p.A. per aver concesso l'accessibilità alle aeree di misura, per la disponibilità e il supporto fornito.



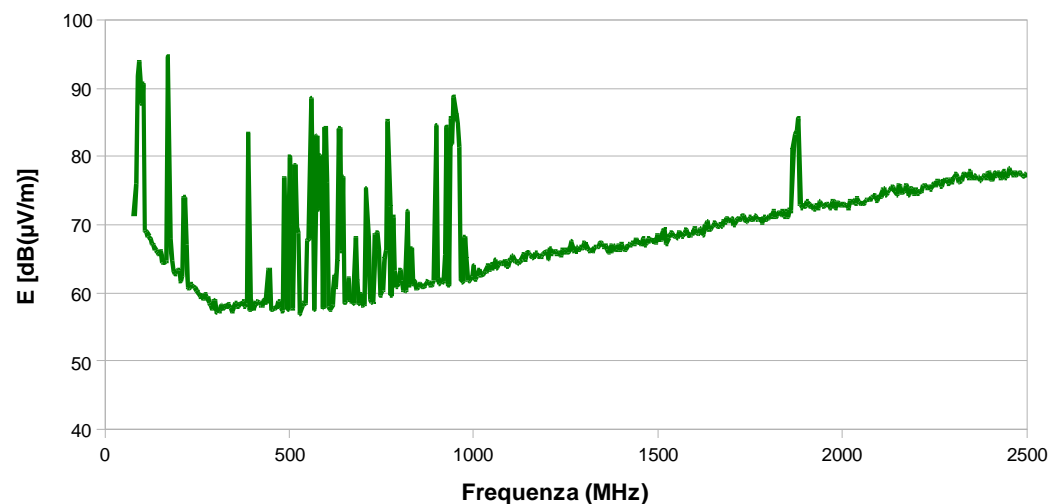
Postazione C - km 24 direzione Frejus: piazzola



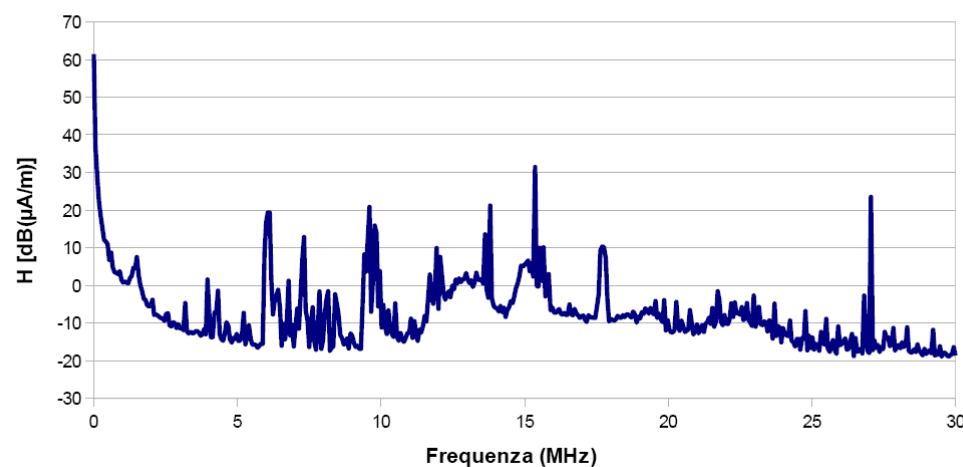
Induzione magnetica DC: da $58.0 \mu\text{T}$ (contatto torretta), a $46.0 \mu\text{T}$ (a 8 m)

Induzione magnetica AC: in prossimità della torretta SOS: 50 nT

Intensità del campo elettrico RF



Intensità del campo magnetico RF



Postazioni H-L, piazzale fronte barriera e ingresso tunnel

