

INTERCONNECTOR SVIZZERA - ITALIA

“All’Acqua-Pallanzeno-Baggio”

STAZIONE ELETTRICA DI CONVERSIONE DI PALLANZENO (VB)

PIANO TECNICO DELLE OPERE

CAMPI ELETTRICI E MAGNETICI

MISURE DI CAMPO MAGNETICO ED ELETTRICO A FREQUENZA

INDUSTRIALE E DI CAMPO ELETTROMAGNETICO A

RADIOFREQUENZA PER LA CARATTERIZZAZIONE DI UNA

STAZIONE DI COVERSIONE, ASSERVITA AD UNA LINEA IN CAVO

SOTTOMARINO, FINALIZZATA ALLA VALUTAZIONE

DELL’ESPOSIZIONE DEI LAVORATORI

Stato delle revisioni

| <i>Stato delle revisioni</i> | | |
|------------------------------|----------|-------------------|
| Rev.01 | 31/01/14 | AGGIORNAMENTO PTO |
| Rev.00 | 06/02/12 | EMISSIONE PER PTO |

| Redatto | Verificato | Approvato |
|------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| F.PEDE ING-REA-APRI CC.PS | M.PAZIENZA ING-REA-APRI CC.PS | R.DE ZAN ING-REA-APRI CC. PS |

| | |
|----------------|--|
| Cliente | TERNA SpA |
| Oggetto | Misure di campo magnetico ed elettrico a frequenza industriale e di campo elettromagnetico a radiofrequenza per la caratterizzazione di una stazione di conversione, asservita ad una linea in cavo sottomarino, finalizzata alla valutazione dell'esposizione dei lavoratori. |
| Ordine | Contratto per la fornitura di servizi di ricerca tra TERNA SpA e CESI SpA (2004) |
| Note | SCHEDA– TERNA- RIS 05 - CEM-TRASM-2004- Attività 6850J |

La parziale riproduzione di questo documento è permessa solo con l'autorizzazione scritta del CESI.

| | | | |
|------------------|-----------|------------------------------|----|
| N. pagine | 29 | N. pagine fuori testo | // |
| Data | 16/122004 | | |

| | | |
|-------------------|---------|-------------------------------------|
| Elaborato | STA-EMF | Daniela Heltai Giampaolo Pollini |
| Verificato | STA | Renato Conti |
| Approvato | STA | Antonio Nicola Negri |

Indice

| | |
|--|-----------|
| SOMMARIO | 3 |
| 1 INTRODUZIONE | 3 |
| 1.1 DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO | 3 |
| 2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | 5 |
| 2.1 LIMITI DI RIFERIMENTO PER L'ESPOSIZIONE PROFESSIONALE | 5 |
| 3 MISURE DI INDUZIONE MAGNETICA E DI CAMPO ELETTRICO..... | 8 |
| 3.1 STRUMENTI UTILIZZATI..... | 8 |
| 3.1.1 <i>Induzione magnetica a frequenza industriale</i> | 8 |
| 3.1.2 <i>Analisi del contenuto armonico</i> | 8 |
| 3.1.3 <i>Induzione magnetica statica</i> | 8 |
| 3.1.4 <i>Campo elettrico</i> | 8 |
| 3.1.5 <i>Standard di misura</i> | 8 |
| 3.2 INDUZIONE MAGNETICA A FREQUENZA INDUSTRIALE | 9 |
| 3.2.1 <i>Sala di comando convertitore</i> | 9 |
| 3.2.2 <i>Cavedio</i> | 9 |
| 3.2.3 <i>Sala quadri distribuzione F.M.</i> | 10 |
| 3.2.4 <i>Sala quadri BTI</i> | 10 |
| 3.2.5 <i>Mappatura dell'induzione magnetica nell'area filtri AT 400 kVca</i> | 10 |
| 3.2.6 <i>Misure di induzione magnetica intorno ai filtri</i> | 11 |
| 3.2.7 <i>Misure di induzione magnetica intorno ai trasformatori di conversione</i> | 12 |
| 3.2.8 <i>Misure di induzione magnetica a contatto</i> | 15 |
| 3.3 ANALISI DEL CONTENUTO ARMONICO DEL CAMPO MAGNETICO | 15 |
| 3.4 INDUZIONE MAGNETICA STATICA..... | 17 |
| 3.4.1 <i>Misura a contatto dei cavi in corrente continua</i> | 17 |
| 3.4.2 <i>Misure nella zona d'interramento dei cavi in corrente continua</i> | 17 |
| 3.5 MISURE DI CAMPO ELETTRICO A FREQUENZA INDUSTRIALE..... | 17 |
| 3.5.1 <i>Mappatura del campo elettrico nell'area filtri AT 400 kVca</i> | 18 |
| 3.6 ANALISI DEL CONTENUTO ARMONICO DEL CAMPO ELETTRICO..... | 18 |
| 4 CONCLUSIONI | 19 |
| 5 FOTOGRAFIE..... | 20 |

STORIA DELLE REVISIONI

| Numero revisione | Data | Protocollo | Lista delle modifiche e/o dei paragrafi modificati |
|------------------|------------|------------|--|
| 0 | 16/12/2004 | A4523450 | Prima emissione |

SOMMARIO

Sono presentati i risultati di una campagna di rilievi sperimentali effettuata per caratterizzare, dal punto di vista dei campi elettromagnetici, la stazione di conversione “Galatina - HVDC”, situata sul territorio comunale di Galatina in provincia di Lecce.

I risultati delle misure effettuate costituiscono una base per la valutazione dei livelli di esposizione professionale dei lavoratori addetti alle operazioni di esercizio e manutenzione e consentono, laddove necessario, di individuare le opportune azioni mitigative per ridurre l’esposizione stessa.

Inoltre, poiché la stazione di conversione di Galatina rappresenta, allo stato attuale, lo schema standard per questo tipo di impianti, la sua caratterizzazione rispetto ai campi elettrici e magnetici è estrapolabile ad altri futuri impianti relativi a collegamenti HVDC in cavo sottomarino dello stesso tipo.

1 INTRODUZIONE

La campagna di rilievi sperimentali, illustrata e documentata nel presente rapporto, riguarda prevalentemente la misura del campo elettrico e dell’induzione magnetica a frequenza industriale (fondamentale ed armoniche) e dell’induzione magnetica statica, associati alla stazione di conversione di Galatina (LE) per la linea in cavo sottomarino HVDC Italia – Grecia.

Per completare il quadro delle informazioni necessarie ai fini di un’esauriente valutazione delle possibili esposizioni professionali, si è inoltre provveduto ad effettuare misure di campo elettromagnetico a radiofrequenza (100 kHz ÷ 3 GHz). Tali misure sono state eseguite in alcuni punti della stazione situati all’aperto, tenendo presente che le uniche fonti di radiofrequenza esistenti all’interno della stazione elettrica sono gli apparati e le antenne paraboliche di un ponte radio.

La stazione è costituita da una sezione convenzionale di trasformazione 400/150 kVca e da una sezione di conversione 400 kVca / 400 kVcc.

Le misure descritte nel presente rapporto riguardano esclusivamente quest’ultima sezione, essendo già disponibili i risultati di campagne di misura condotte in passato su analoghe stazioni elettriche di trasformazione.

1.1 Descrizione dell’impianto

La planimetria della stazione elettrica, situata in un territorio ad uso agricolo, è mostrata in Figura 1.

La sezione di conversione in esame è composta essenzialmente come segue:

- ◆ una stazione elettrica convenzionale di trasformazione 400/150 kV (Foto 1, Foto 2 e Foto 3), dotata di doppio sistema di sbarre da 400 kV (Foto 4 e Foto 5);
- ◆ n. 2 linee entra-esce da 400 kV a singola terna (visibili sullo sfondo nelle foto 1, 2 e 3);
- ◆ n. 7 linee da 150 kV a singola terna (visibili in primo piano nelle foto 1, 2 e 3);
- ◆ n. 1 montante AT 400 kVca di alimentazione della sezione di conversione (Foto 6) con stalli di alimentazione dei filtri armoniche (Foto 7 e Foto 8), collegato al doppio sistema di sbarre della stazione di trasformazione;
- ◆ n. 2 sistemi di filtro di armoniche 400 kVca, aventi anche funzione di batterie di rifasamento del convertitore (Foto 9, Foto 10 e Foto 11);

- ◆ n. 3 trasformatori monofasi di conversione da 240 kV, potenza 199 MVA ciascuno (Foto 12);
- ◆ n. 1 convertitore dodecafase (raddrizzatore/invertitore) da 400 kVcc / 1250 Acc, completo di sistema di raffreddamento, installato nella sala valvole (edificio di conversione, a destra sullo sfondo nella Foto 13);
- ◆ n. 1 edificio di controllo, adiacente alla sala valvole, ospitante i sistemi di controllo e protezione, i sistemi alimentazioni ausiliarie MT/BT, gli impianti tecnologici e i servizi (a sinistra sullo sfondo nella Foto 13);
- ◆ n. 1 montante ATcc, in due sezioni: sezione 400 kVcc (in primo piano nella Foto 13), con reattore di spianamento (Foto 14) e terminale AT del cavo terrestre (Foto 15 e Foto 16); sezione di elettrodo, con terminale cavi di neutro MT a basso potenziale (Foto 17 e Foto 18).

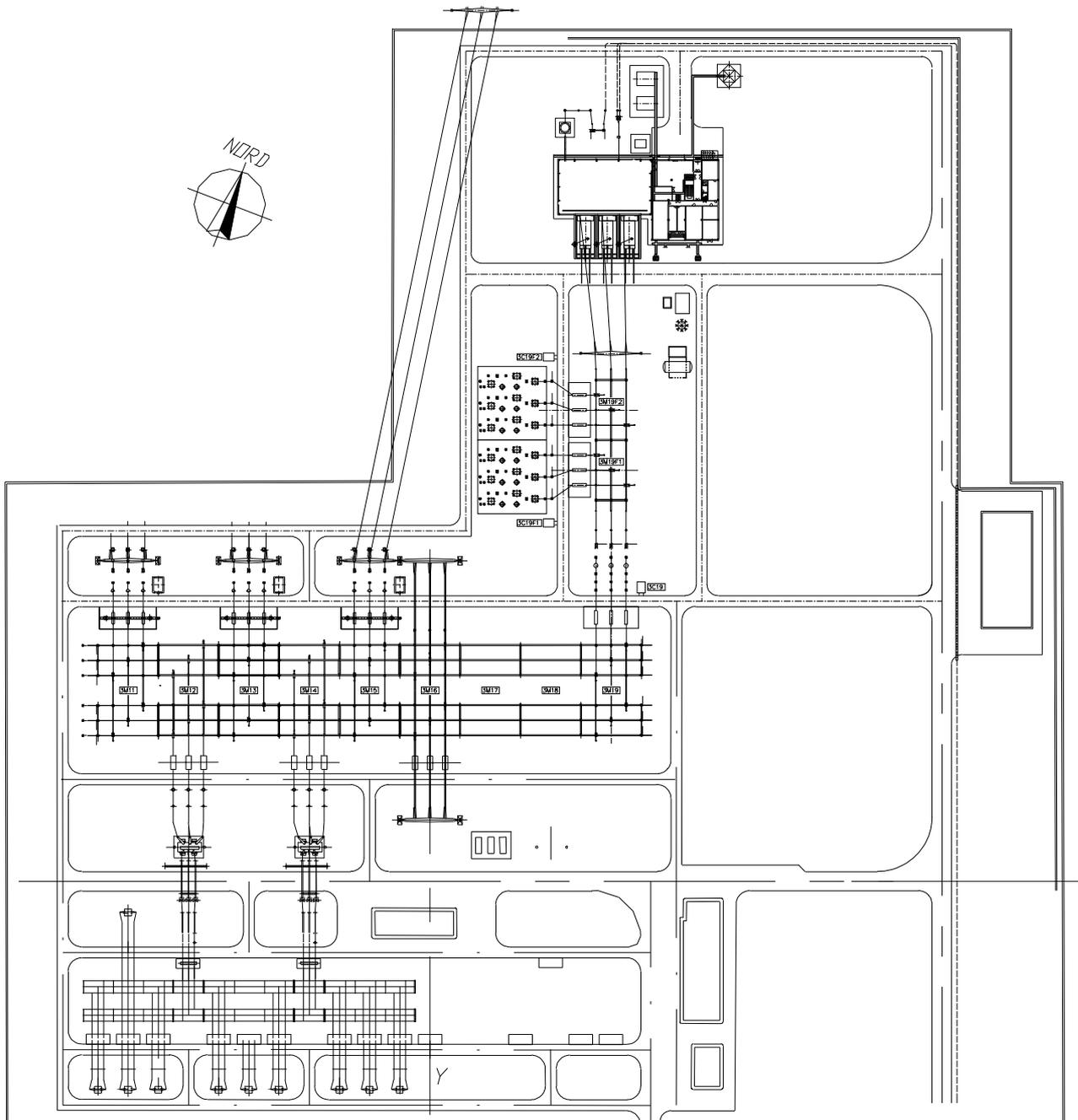


Figura 1 *Planimetria della stazione elettrica*

2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

- ◆ ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys*, 1998, vol. 74, p.494-522. (Disponibile sul sito: www.icnirp.org).
- ◆ Legge n. 36 del 22 Febbraio 2001: “Legge quadro sulla protezione dalle esposizioni a campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici” Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, serie generale n. 55 del 7 Marzo 2001.
- ◆ Direttiva 2004/40/CE del 29 aprile 2004: “Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio sulle prescrizioni minime di sicurezza e di salute relative all'esposizione dei lavoratori ai rischi derivanti dagli agenti fisici (campi elettromagnetici)”.
- ◆ Norma CEI 211-6:2001 “Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz÷100 kHz, con riferimento all'esposizione umana”.
- ◆ Norma CEI 211-7: 2001 “Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettromagnetici nell'intervallo di frequenza 10 kHz÷300 GHz, con riferimento all'esposizione umana”.

2.1 Limiti di riferimento per l'esposizione professionale.

I limiti a cui si fa riferimento nella presente relazione sono quelli della Direttiva 2004/40/CE, che a sua volta recepisce i suggerimenti delle linee guida ICNIRP del 1998 basati su un'attenta valutazione di tutta la documentazione scientifica esistente sui possibili effetti sanitari acuti. In particolare, nella direttiva vengono individuati due livelli:

- Limiti di esposizione (coincidenti con i limiti di base ICNIRP): ovvero limitazioni all'esposizione ai campi elettromagnetici variabili nel tempo che si fondano direttamente su effetti accertati sulla salute e su considerazioni di ordine biologico. Vengono espressi tramite grandezze fisiche strettamente correlate agli effetti sanitari (che nel caso delle basse frequenze sono rappresentate dalla densità di corrente indotta nel corpo umano, $[mA/m^2]$).
- Valori di azione (coincidenti con i livelli di riferimento ICNIRP): questi valori sono indicati a fini pratici di valutazione dell'esposizione in modo da determinare se siano probabili superamenti dei limiti di base. Alcuni sono derivati dai limiti di base attraverso misurazioni e/o tecniche informatiche; altri si riferiscono alla percezione e agli effetti nocivi indiretti dell'esposizione. Sono definiti mediante identificazione di livelli di campi elettrici, magnetici ed elettromagnetici misurabili con una strumentazione adeguata.

I valori delle grandezze suddette sono riportati, in funzione della frequenza, nelle seguenti tabelle tratte dalla direttiva.

Tabella 1:

Valori limite di esposizione (articolo 3, paragrafo 1). Tutte le condizioni devono essere rispettate.

| Intervallo di frequenza | Densità di corrente per capo e tronco J (mA/m ²) (rms) | SAR mediato sul corpo intero (W/kg) | SAR localizzato (capo e tronco) (W/kg) | SAR localizzato (arti) (W/kg) | Densità di potenza (W/m ²) |
|-------------------------|--|-------------------------------------|--|-------------------------------|--|
| fino a 1 Hz | 40 | - | - | - | - |
| 1 — 4 Hz | 40/f | - | - | - | - |
| 4 — 1 000 Hz | 10 | - | - | - | - |
| 1 000 Hz-100 kHz | f/100 | - | - | - | - |
| 100 kHz — 10 MHz | f/100 | 0,4 | 10 | 20 | - |
| 10 MHz — 10 GHz | - | 0,4 | 10 | 20 | - |
| 10 — 300 GHz | - | - | - | - | 50 |

Note:

1. f è la frequenza in Hertz.
2. I valori limite di esposizione per la densità di corrente si prefiggono di proteggere dagli effetti acuti, risultanti dall'esposizione, sui tessuti del sistema nervoso centrale nella testa e nel torace. I valori limite di esposizione nell'intervallo di frequenza compreso fra 1 Hz e 10 MHz sono basati sugli effetti nocivi accertati sul sistema nervoso centrale. Tali effetti acuti sono essenzialmente istantanei e non v'è alcuna giustificazione scientifica per modificare i valori limite di esposizione nel caso di esposizioni di breve durata. Tuttavia, poiché i valori limite di esposizione si riferiscono agli effetti nocivi sul sistema nervoso centrale, essi possono permettere densità di corrente più elevate in tessuti corporei diversi dal sistema nervoso centrale a parità di condizioni di esposizione.
3. Data la non omogeneità elettrica del corpo, le densità di corrente dovrebbero essere calcolate come medie su una sezione di 1 cm² perpendicolare alla direzione della corrente.
4. Per le frequenze fino a 100 kHz, i valori di picco della densità di corrente possono essere ottenuti moltiplicando il valore efficace rms per (2)^{1/2}.
5. Per le frequenze fino a 100 kHz e per i campi magnetici pulsati, la massima densità di corrente associata agli impulsi può essere calcolata in base ai tempi di salita/discesa e al tasso massimo di variazione dell'induzione magnetica. La densità di corrente indotta può essere confrontata con il corrispondente valore limite di esposizione. Per gli impulsi di durata t_p, la frequenza equivalente per l'applicazione dei limiti di esposizione va calcolata come $f = 1/(2t_p)$.
6. Tutti i valori di SAR devono essere ottenuti come media su un qualsiasi periodo di 6 minuti.
7. La massa adottata per mediare il SAR localizzato è pari a ogni 10 g di tessuto contiguo. Il SAR massimo ottenuto in tal modo costituisce il valore impiegato per la stima dell'esposizione. Si intende che i suddetti 10 g di tessuto devono essere una massa di tessuto contiguo con proprietà elettriche quasi omogenee. Nello specificare una massa contigua di tessuto, si riconosce che tale concetto può essere utilizzato nella dosimetria numerica ma che può presentare difficoltà per le misurazioni fisiche dirette. Può essere utilizzata una geometria semplice quale una massa cubica di tessuto, purché le grandezze dosimetriche calcolate assumano valori conservativi rispetto alle linee guida in materia di esposizione.
8. Per esposizioni pulsate nella gamma di frequenza compresa fra 0,3 e 10 GHz e per esposizioni localizzate del capo, allo scopo di limitare ed evitare effetti uditivi causati da espansione termoelastica, si raccomanda un ulteriore valore limite di esposizione. Tale limite è rappresentato dall'assorbimento specifico (SA) che non dovrebbe superare 10 mJ/kg calcolato come media su 10 g di tessuto.
9. Le densità di potenza sono ottenute come media su una qualsiasi superficie esposta di 20 cm² e su un qualsiasi periodo di $68f^{-0,5}$ minuti (f in GHz) per compensare la graduale diminuzione della profondità di penetrazione con l'aumento della frequenza. Le massime densità di potenza nello spazio, mediate su una superficie di 1 cm², non dovrebbero superare 20 volte il valore di 50 W/m².
10. Per quanto riguarda i campi elettromagnetici pulsati o transitori o in generale per quanto riguarda l'esposizione simultanea a campi di frequenza diversa, è necessario adottare metodi appropriati di valutazione, misurazione e/o calcolo in grado di analizzare le caratteristiche delle forme d'onda e la natura delle interazioni biologiche, tenendo conto delle norme armonizzate europee elaborate dal Cenelec.

Tabella 2:

Valori di azione (articolo 3, paragrafo 2) [valori efficaci (rms)imperturbati]

| Intervallo di frequenza | Intensità di campo elettrico E (V/m) | Intensità di campo magnetico H (A/m) | Induzione magnetica B (μT) | Densità di potenza di onda piana equivalente S_{eq} (W/m ²) | Corrente di contatto, IC (mA) | Corrente indotta attraverso gli arti, I_L (mA) |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------|---|-------------------------------|--|
| 0 - 1Hz | - | $1,63 \times 10^5$ | 2×10^5 | - | 1,0 | - |
| 1 - 8 Hz | 20 000 | $1,63 \times 10^5 / f^2$ | $2 \times 10^5 / f^2$ | - | 1,0 | - |
| 8 - 25 Hz | 20 000 | $2 \times 10^4 / f$ | $2,5 \times 10^4 / f$ | - | 1,0 | - |
| 0,025 - 0,82kHz | $500 / f$ | $20 / f$ | $25 / f$ | - | 1,0 | - |
| 0,82 — 2,5 kHz | 610 | 24,4 | 30,7 | - | 1,0 | - |
| 2,5 - 65 kHz | 610 | 24,4 | 30,7 | - | 0,4 f | - |
| 65 - 100 kHz | 610 | $1\ 600 / f$ | $2\ 000 / f$ | - | 0,4 f | - |
| 0,1 - 1 MHz | 610 | $1,6 / f$ | $2 / f$ | - | 40 | - |
| 1 - 10 MHz | $610 / f$ | $1,6 / f$ | $2 / f$ | - | 40 | - |
| 10 — 110 MHz | 61 | 0,16 | 0,2 | 10 | 40 | 100 |
| 110 - 400 MHz | 61 | 0,16 | 0,2 | 10 | - | - |
| 400 — 2 000 MHz | $3f^a$ | $0,008f^a$ | $0,01f^a$ | $f/40$ | - | - |
| 2 - 300 GHz | 137 | 0,36 | 0,45 | 50 | - | - |

Note:

1. f è la frequenza espressa nelle unità indicate nella colonna relativa all'intervallo di frequenza.
2. Per le frequenze comprese fra 100 kHz e 10 GHz, S_{eq} , E, H, Be I_L devono essere calcolati come medie su un qualsiasi periodo di 6 minuti.
3. Per le frequenze che superano 10 GHz, S_{eq} , E, He B devono essere calcolati come medie su un qualsiasi periodo di $68/f^{1,05}$ minuti (f in GHz).
4. Per le frequenze fino a 100 kHz, i valori di azione di picco per le intensità di campo possono essere ottenuti moltiplicando il valore efficace rms per $(2)^a$. Per gli impulsi di durata t_p la frequenza equivalente da applicare per i valori di azione va calcolata come $f = 1/(2t_p)$.
 Per le frequenze comprese tra 100 kHz e 10 MHz, i valori di azione di picco per le intensità di campo sono calcolati moltiplicando i pertinenti valori efficaci (rms) per 10, dove $a = (0,665 \log (f/10) + 0,176)$, f in Hz.
 Per le frequenze comprese tra 10 MHz e 300 GHz, i valori di azione di picco sono calcolati moltiplicando i valori efficaci (rms) corrispondenti per 32 nel caso delle intensità di campo e per 1 000 nel caso della densità di potenza di onda piana equivalente.
5. Per quanto riguarda i campi elettromagnetici pulsati o transitori o in generale l'esposizione simultanea a campi di frequenza diversa, è necessario adottare metodi appropriati di valutazione, misurazione e/o calcolo in grado di analizzare le caratteristiche delle forme d'onda e la natura delle interazioni biologiche, tenendo conto delle norme armonizzate europee elaborate dal Cenelec.
6. Per i valori di picco di campi elettromagnetici pulsati modulati si propone inoltre che, per le frequenze portanti che superano 10 MHz, S_{eq} valutato come media sulla durata dell'impulso non superi di 1 000 volte i valori di azione per S_{eq} o che l'intensità di campo non superi di 32 volte i valori di azione dell'intensità di campo alla frequenza portante.

3 MISURE DI INDUZIONE MAGNETICA E DI CAMPO ELETTRICO

3.1 Strumenti utilizzati

3.1.1 Induzione magnetica a frequenza industriale

Le misure di induzione magnetica a frequenza industriale sono state effettuate utilizzando misuratori Emdex II. Questo tipo di strumento misura i valori efficaci delle tre componenti ortogonali del vettore induzione magnetica, chiamato anche densità di flusso magnetico, e ne ricava il valore efficace del corrispondente campo ellittico B (espresso in Tesla o suoi sottomultipli μ Tesla). L'induzione magnetica è una grandezza di uso più comune del campo magnetico H (espresso in A/m) ed è direttamente correlata a quest'ultimo attraverso la relazione $B=\mu H$ dove μ rappresenta la permeabilità magnetica del mezzo (per l'aria μ assume il valore di $4\pi \cdot 10^{-7}$ henry/m).

L'Emdex II determina il valore dell'induzione magnetica per frequenze comprese tra 40 Hz e 800 Hz.

3.1.2 Analisi del contenuto armonico

È stato utilizzato lo strumento EFA-200 della WANDEL & GOLTERMANN, con sonda isotropa da 100 cm², che può essere utilizzato in due modalità: la prima fornisce direttamente in percentuale le componenti spettrali del campo magnetico, dalla frequenza fondamentale fino alla 9^a armonica; la seconda esegue e memorizza i risultati dell'analisi di Fourier (FFT) dalla frequenza fondamentale fino a 32 kHz.

3.1.3 Induzione magnetica statica

Le misure di induzione magnetica statica sono state condotte con lo strumento del tipo a sonda di Hall isotropa ETM-1 Hall Teslameter della Metrolab Instruments SA, in grado di determinare valori di induzione magnetica nel range 0÷1999 mT (milliTesla) con una risoluzione di 0.01 mT nel range 0÷19.99 mT.

3.1.4 Campo elettrico

Le misure di campo elettrico sono state condotte tramite misuratore EFA-3 della Wandel & Goltermann collegato mediante fibra ottica ad una sonda triassiale, posta su apposito cavalletto realizzato in materiale isolante, che fornisce, in accordo con la normativa tecnica di riferimento, la misura del valore efficace del campo elettrico E espresso come:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2 + E_z^2}$$

dove E_x , E_y ed E_z sono i valori efficaci delle tre componenti ortogonali del campo.

Lo strumento impiegato misura il campo elettrico con frequenza compresa nel range 5 Hz ÷ 30 kHz e di intensità tra 0.1 V/m e 100 kV/m con un'incertezza del 5 %.

Si rammenta come le misure di campo elettrico a frequenza industriale siano fortemente influenzate dalla presenza di oggetti conduttori (compreso il corpo umano) e da costruzioni, vegetazione, ecc.

3.1.5 Standard di misura

Le misure sono state eseguite in accordo con i seguenti standard nazionali ed internazionali:

- ◆ CEI 211-6 (2001): "Guida per la misura e per la valutazione dei campi elettrici e magnetici nell'intervallo di frequenza 0 Hz - 10 kHz, con riferimento all'esposizione umana";
- ◆ IEC 61786 (1998): "Measurements of low frequency magnetic and electric fields with regard to exposure of human beings - Special requirements for instruments and guidance for measurements".

I certificati di verifica di taratura della strumentazione utilizzata sono archiviati presso il laboratorio metrologico CESI.

3.2 Induzione magnetica a frequenza industriale

Al fine della caratterizzazione dell'esposizione professionale, il monitoraggio dell'induzione magnetica è stato effettuato (con frequenza di campionamento pari a 1.5 secondi) secondo diverse modalità, in funzione degli obiettivi prefissati. In particolare, sono state condotte:

- ◆ *misure esplorative* – lo strumento viene usato come monitor dell'esposizione personale, spostandosi in tutte le zone accessibili all'interno di ogni ambiente;
- ◆ *misure lungo percorsi* – lo strumento viene montato su apposita ruota metrica, alla quota di 1 m dal suolo; i risultati sono visualizzati mediante grafico {x,y} (distanza/induzione magnetica), segnalando i punti di cambiamento di direzione;
- ◆ *mappatura isolinee* – le misure vengono effettuate sui punti di una griglia opportunamente individuata, alla quota di 1 m dal suolo, al fine di elaborare mappe con curve isolivello di induzione magnetica.

3.2.1 Sala di comando convertitore

In questa sala, il 26/10/2004 alle 10.15 è stata eseguita una misura esplorativa, spostando manualmente lo strumento in tutte le zone accessibili al personale; nella Tabella 1 sono riportati i risultati delle misure. Visti i livelli di induzione magnetica misurati, non è stato ritenuto necessario approfondire lo studio di questo ambiente.

Tabella 1 *Dati riassuntivi delle misure di induzione magnetica all'interno della sala comando convertitore*

| Zona esaminata | Induzione magnetica B_{eff} [μT] | | | |
|---------------------------|--|------|-------|-----------|
| | min | max | media | dev. std. |
| Sala comando convertitore | 0.10 | 1.53 | 0.32 | 0.18 |

3.2.2 Cavedio

Il locale raggruppa i cavi di collegamento tra la sala di comando e il convertitore (sala valvole); nella Tabella 2 sono riportati i risultati delle misure esplorative, eseguite il 26/10/2004 alle 10.18.

Visti i bassi valori misurati, non è stato ritenuto necessario approfondire lo studio di questo ambiente.

Tabella 2 *Dati riassuntivi delle misure di induzione magnetica all'interno del cavedio*

| Zona esaminata | Induzione magnetica B_{eff} [μT] | | | |
|----------------|--|------|-------|-----------|
| | min | max | media | dev. std. |
| Cavedio | 0.14 | 0.29 | 0.21 | 0.04 |

3.2.3 Sala quadri distribuzione F.M.

Il locale ospita i quadri di distribuzione della forza motrice per tutto l'edificio di conversione; nella Tabella 3 sono riportati i risultati delle misure esplorative, eseguite il 26/10/2004 alle 10.20.

Visti i bassi valori misurati, non è stato ritenuto necessario approfondire lo studio di questo ambiente.

Tabella 3 *Dati riassuntivi delle misure di induzione magnetica all'interno della sala quadri distribuzione F.M.*

| Zona esaminata | Induzione magnetica B_{eff} [μT] | | | |
|--------------------------------|--|------|-------|-----------|
| | min | max | media | dev. std. |
| Sala quadri distribuzione F.M. | 0.15 | 0.23 | 0.20 | 0.03 |

3.2.4 Sala quadri BT1

La sala ospita i quadri di bassa tensione per i servizi ausiliari; nella Tabella 4 sono riportati i risultati delle misure, eseguite il 27/10/2004 alle 13.00.

Come per i casi precedenti, non è stato ritenuto necessario approfondire lo studio di questo ambiente.

Tabella 4 *Dati riassuntivi delle misure di induzione magnetica nella sala quadri BT1*

| Zona esaminata | Induzione magnetica B_{eff} [μT] | | | |
|-----------------|--|-------|-------|-----------|
| | min | max | media | dev. std. |
| Sala quadri BT1 | 0.33 | 16.43 | 2.50 | 3.47 |

3.2.5 Mappatura dell'induzione magnetica nell'area filtri AT 400 kVca

Il giorno 27/10/2004 dalle 11.00 alle 11.45 circa, sono stati eseguiti i rilievi nell'area esterna, sottostante ai conduttori del montante AT 400 kVca e agli stelli d'alimentazione del filtro n. 2, rilievi dai quali si è ricavata la relativa "mappatura" dell'induzione magnetica. Per quanto riguarda la zona del filtro n. 1 non si è effettuato il rilievo, potendosi ritenere l'ambiente assai simile al precedente.

Le rilevazioni sono state effettuate all'altezza di 1 m dal suolo: la Figura 2 mostra la mappa con le curve isolivello del campo magnetico.

Si osserva che le configurazioni delle aree filtri e dei relativi conduttori d'alimentazione differiscono, nella realtà, dalla planimetria originaria; la geometria dell'impianto in Figura 2, quindi, è stata aggiornata secondo i rilievi eseguiti durante le misure di induzione magnetica.

Le misure della corrente media nel montante AT al convertitore, fornite dal Centro Tecnico di Bari della società TERNA, sono riportate nella Tabella 5.

L'esame dei valori di corrente ha permesso di ritenere che l'induzione magnetica sia rimasta sostanzialmente costante durante l'esecuzione delle misure.

Tabella 5 *Andamento della corrente nel montante del gruppo di conversione*

| Data - ora | Corrente linea CA [A] |
|--------------------|-----------------------|
| 26/10/2004 – 10.45 | 416 |
| 26/10/2004 – 17.00 | 418 |
| 27/10/2004 – 11.00 | 419 |
| 27/10/2004 – 13.00 | 416 |

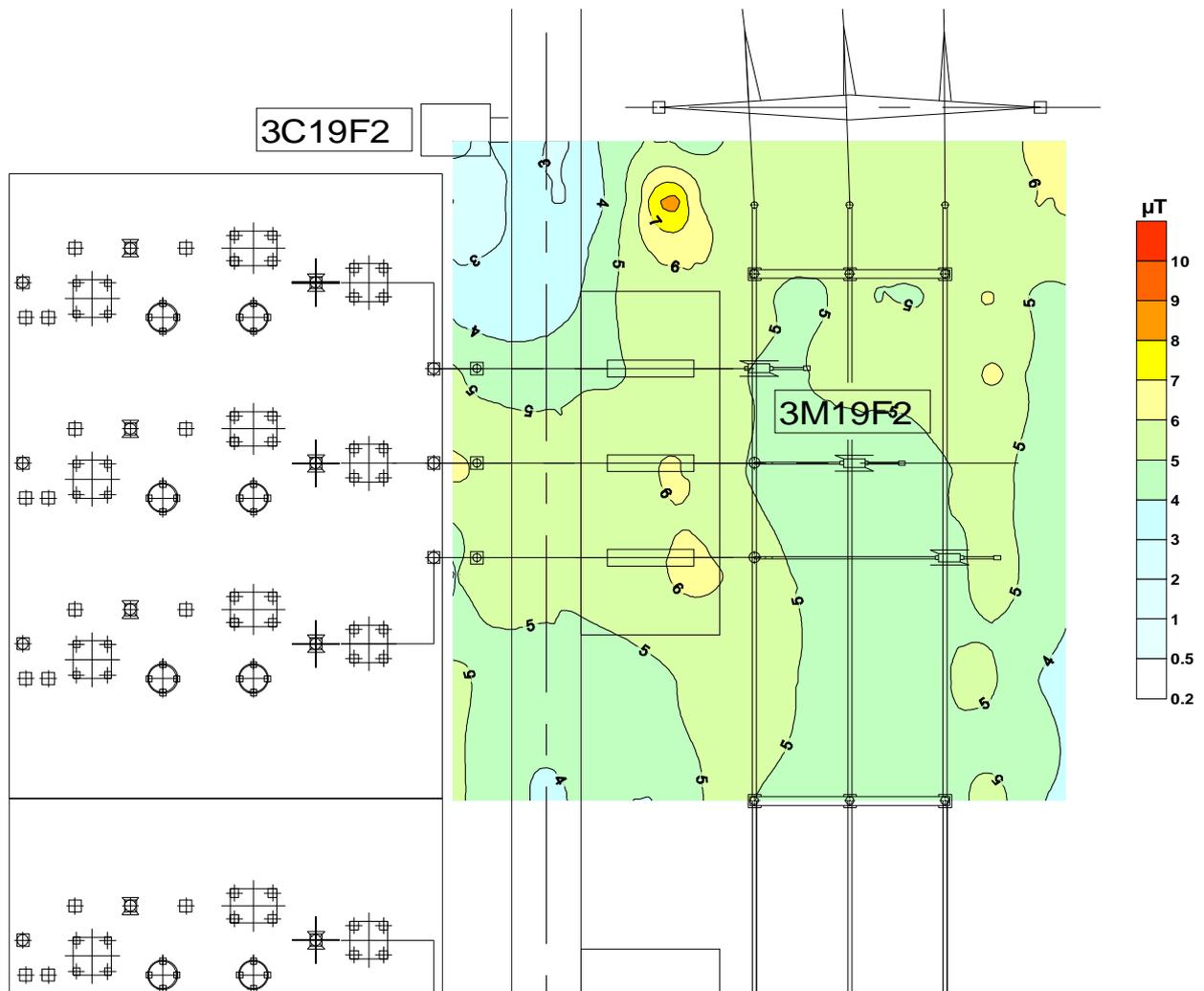


Figura 2 *Mappa con curve isolivello dell'induzione magnetica ad 1 metro d'altezza*

3.2.6 Misure di induzione magnetica intorno ai filtri

Il giorno 27/10/2004 dalle 11.55 alle 12.10 circa, è stata misurata l'induzione magnetica lungo il percorso intorno alla recinzione dei filtri, illustrato nella Figura 3; i risultati delle misure sono riportati nel grafico di Figura 4.

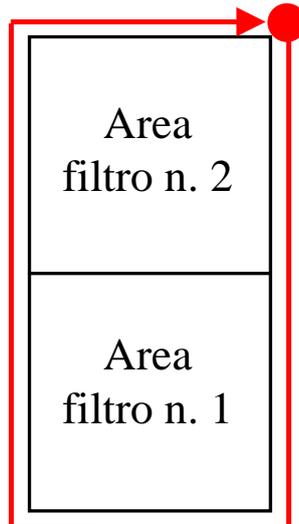


Figura 3 Schema del percorso di misura intorno alla recinzione dei filtri

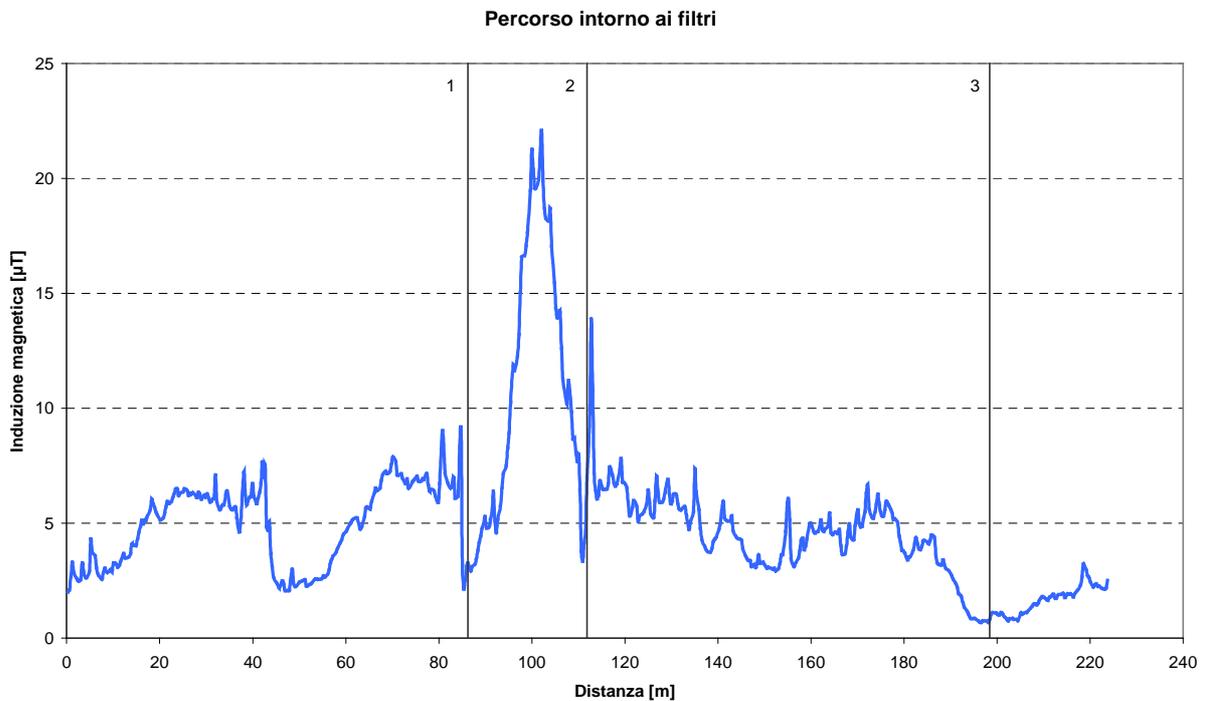


Figura 4 Risultati delle misure di induzione magnetica lungo il percorso intorno alla recinzione dei filtri

3.2.7 Misure di induzione magnetica intorno ai trasformatori di conversione

Il giorno 27/10/2004 dalle 12.20 alle 12.35 circa, è stata misurata l'induzione magnetica lungo un percorso intorno a ciascuno dei tre trasformatori monofase del gruppo di conversione, come illustrato nella Figura 5.

I risultati delle misure sono riportati nei rispettivi grafici di Figura 6, Figura 7 e Figura 8.

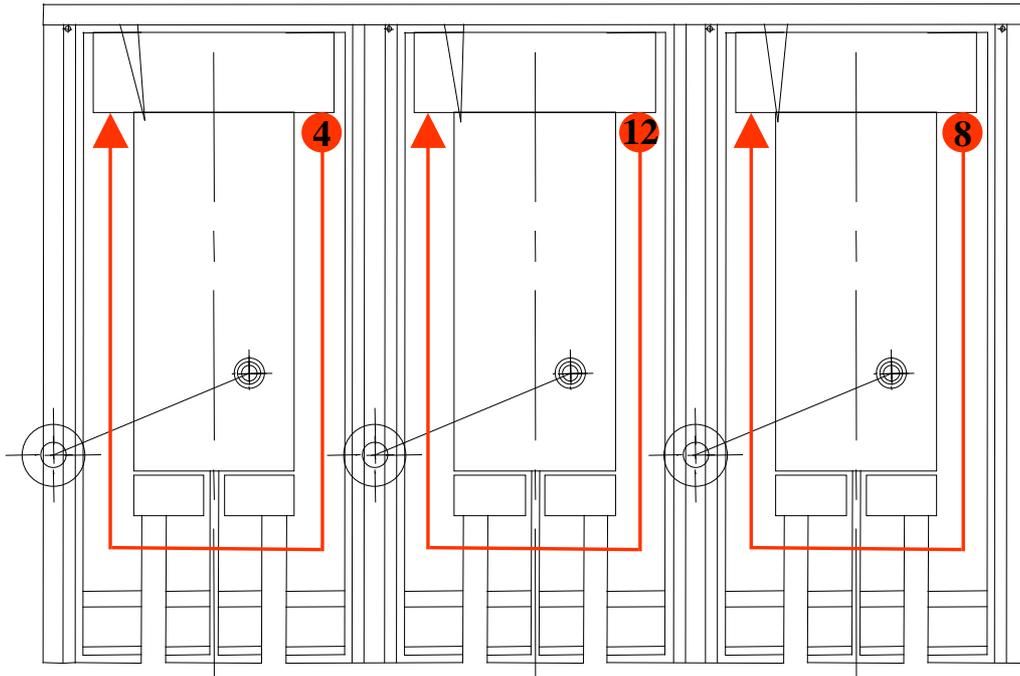


Figura 5 Schema dei percorsi di misura intorno ai trasformatori di conversione

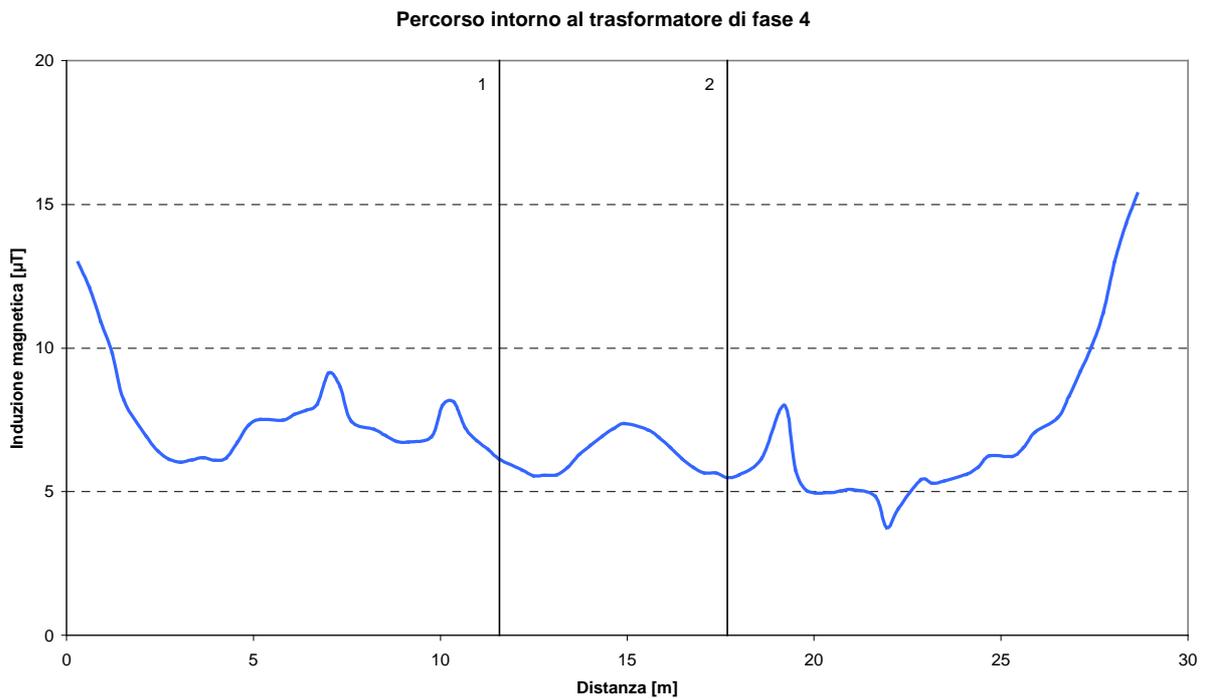


Figura 6 Risultati delle misure di induzione magnetica lungo il percorso intorno al trasformatore di fase 4

Percorso intorno al trasformatore di fase 12

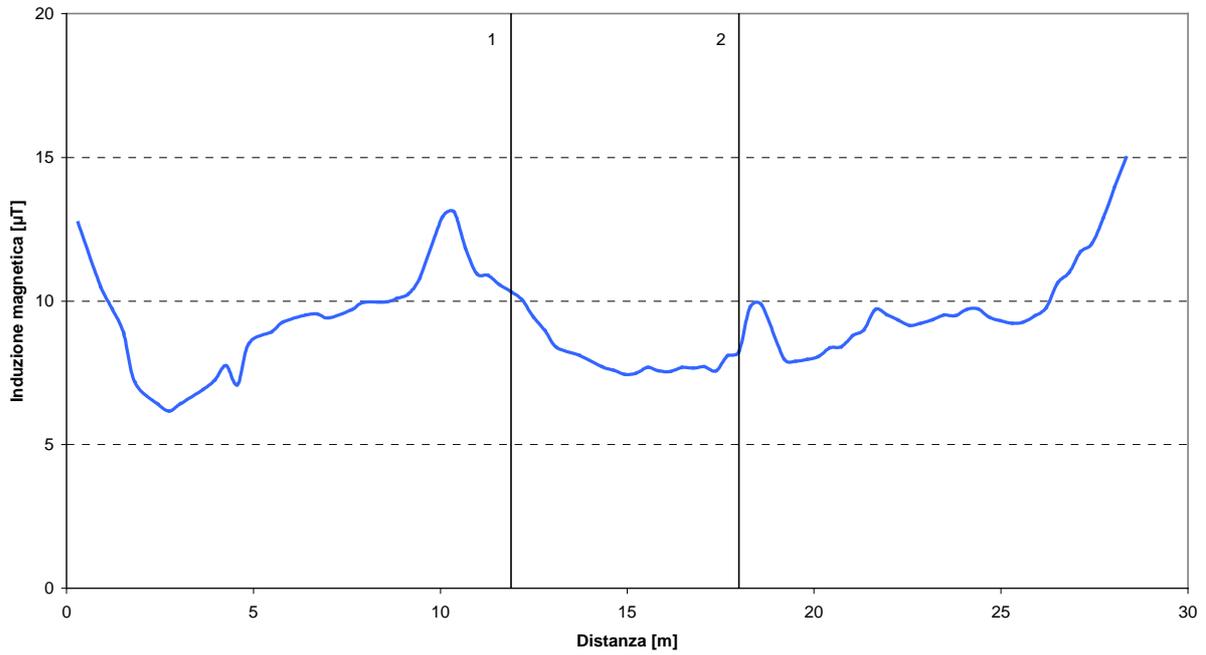


Figura 7 Risultati delle misure di induzione magnetica lungo il percorso intorno al trasformatore di fase 12

Percorso intorno al trasformatore di fase 8

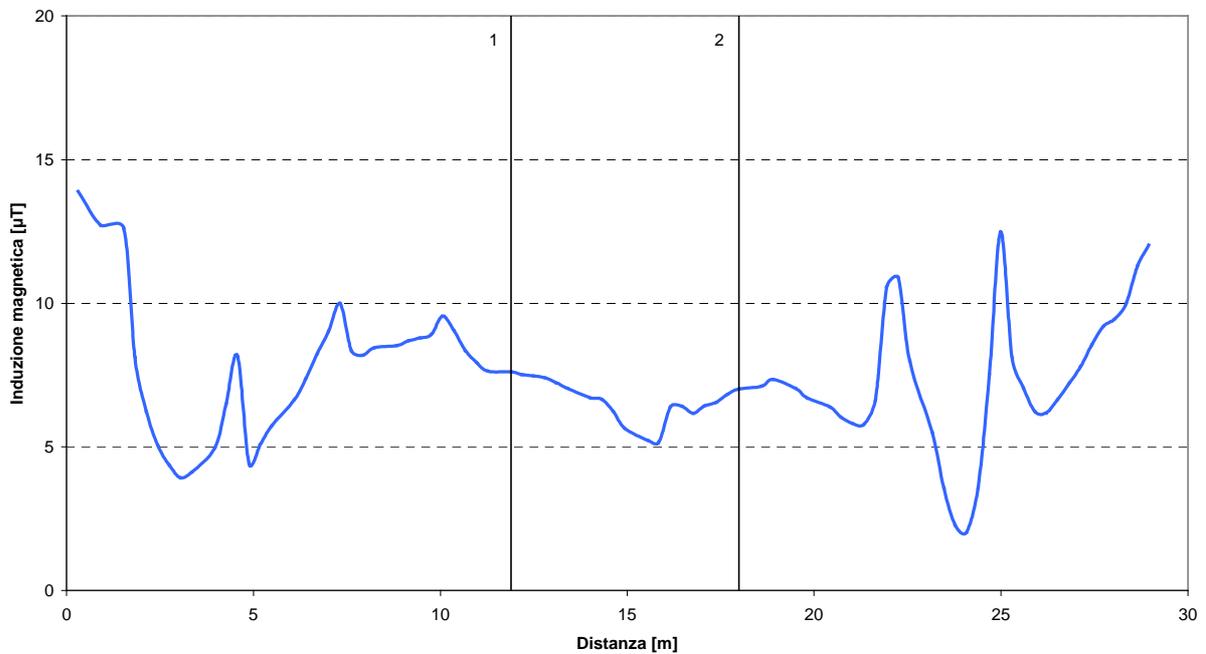


Figura 8 Risultati delle misure di induzione magnetica lungo il percorso intorno al trasformatore di fase 8

3.2.8 Misure di induzione magnetica a contatto

Sono state eseguite, per completezza, alcune misure di induzione magnetica a contatto degli organi di comando delle apparecchiature di manovra nell'area del filtro armoniche n. 2; i dati relativi a questa serie di rilevazioni sono presentati nella Tabella 6.

Tabella 6 Misure di induzione magnetica a contatto di organi di comando

| Denominazione apparecchiatura | Fase | Induzione [μ T] |
|---|------|----------------------|
| Armadio manovra interruttore linea filtro 2 | 4 | 4.8 |
| Armadio manovra interruttore linea filtro 2 | 12 | 5.4 |
| Armadio manovra interruttore linea filtro 2 | 8 | 7.2 |
| Armadio manovra sezionatore linea filtro 2 | 4 | 5.4 |
| Armadio manovra sezionatore linea filtro 2 | 12 | 4.5 |
| Armadio manovra sezionatore linea filtro 2 | 8 | 4.0 |
| Armadio manovra sezionatore di messa a terra filtro 2 | 4 | 5.5 |
| Armadio manovra sezionatore di messa a terra filtro 2 | 12 | 5.6 |
| Armadio manovra sezionatore di messa a terra filtro 2 | 8 | 5.8 |
| Armadio interfaccia filtro 2 | - | 5.2 |
| Comando interruttore filtro 2 | - | 4.6 |

3.3 Analisi del contenuto armonico del campo magnetico

Le misure sono state effettuate il giorno 26/10/2004 dalle 12.30 alle 13.15 circa, nell'area del montante AT 400 kVca e d'alimentazione dei filtri.

Lo strumento è stato posizionato sotto i conduttori AT, di volta in volta in 3 punti per ciascuna delle fasi:

- ◆ linea trasformatori di conversione, circa 3 m a monte del sostegno a portale;
- ◆ linea alimentazione filtro armoniche n. 2;
- ◆ sbarre montante AT, a valle dei filtri n. 1 e 2;

I risultati corrispondenti relativi alle tre fasi sono molto simili tra loro; pertanto, nel seguito si riporteranno solo quelli della fase 4, che ha dato valori leggermente superiori alle altre due fasi.

I punti di misura sono indicati nella Figura 9, mentre nella Tabella 7 sono riportati i risultati relativi alle sole armoniche significative.

Per ciascuna delle armoniche, nell'ultima colonna sono riportati i valori dei livelli d'azione definiti dalla Direttiva 2004/40/CE.

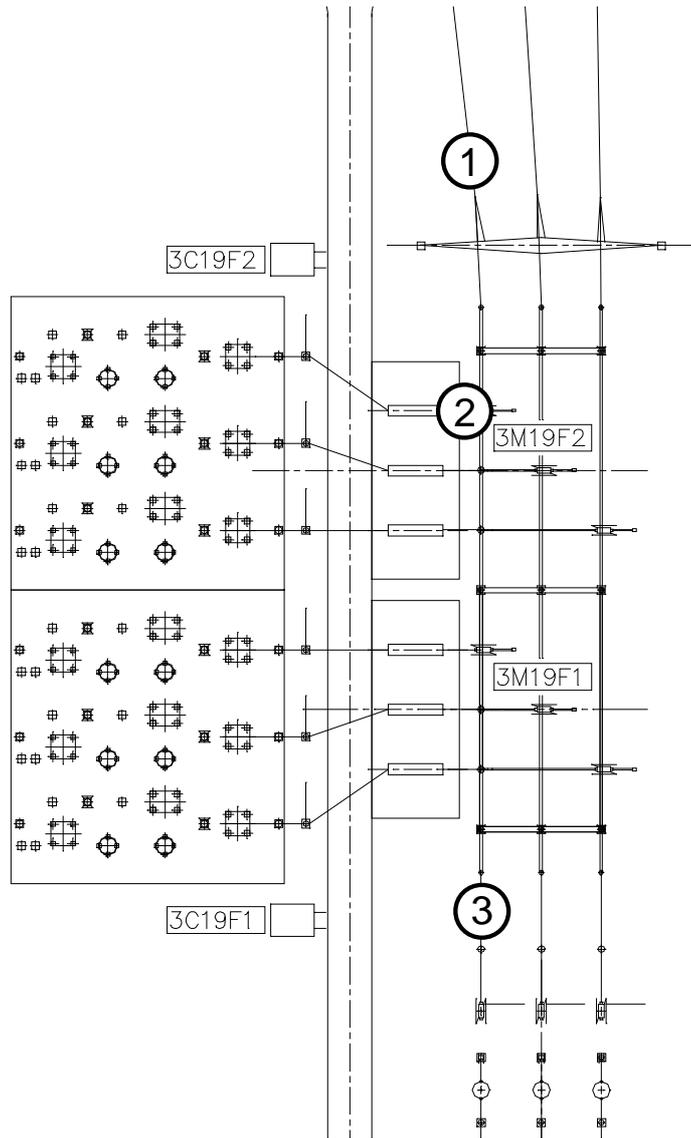


Figura 9 Ubicazione dei punti di misura del contenuto armonico

Tabella 7 Risultati dell'analisi del contenuto armonico

| f [Hz] | Induzione [μ T] | | | Livello d'azione [μ T] |
|-----------|----------------------|-------|--------|-----------------------------------|
| | 1 | 2 | 3 | |
| 50 | 5.814 | 5.570 | 12.373 | 500.0 |
| 150 | 0.066 | 0.079 | 0.086 | 166.7 |
| 250 | 0.042 | 0.256 | 0.581 | 100.0 |
| 350 | 0.037 | 0.229 | 0.561 | 71.4 |
| 550 | 0.482 | 0.592 | 0.572 | 45.5 |
| 650 | 0.299 | 0.301 | 0.220 | 38.5 |
| 1150 | 0.091 | 0.102 | 0.035 | 30.7 |
| 1250 | 0.088 | 0.096 | 0.052 | 30.7 |
| 1750 | 0.020 | 0.019 | 0.028 | 30.7 |
| 1850 | 0.015 | 0.016 | 0.010 | 30.7 |
| 2350 | 0.030 | 0.034 | 0.013 | 30.7 |
| 2450 | 0.028 | 0.030 | 0.013 | 30.7 |

3.4 Induzione magnetica statica

Gli ambienti accessibili in fase di esercizio, da caratterizzare rispetto all'induzione magnetica statica, si trovano esclusivamente all'esterno, nella zona del montante AT 400 kVcc e nella zona di interramento del cavo AT.

3.4.1 Misura a contatto dei cavi in corrente continua

Il giorno 26/10/2004 dalle 17 alle 17.15 circa, sono state effettuate misure di induzione magnetica statica a contatto dei cavi cc, nella parte accessibile del montante AT 400 kVcc (con corrente pari a 720 A circa). I risultati sono visibili nella Tabella 8.

Tabella 8 Misure di induzione magnetica a contatto dei cavi cc

| Zona esaminata | Induzione magnetica [mT] |
|----------------|--------------------------|
| Cavo AT | 2.93 |

3.4.2 Misure nella zona d'interramento dei cavi in corrente continua

Il giorno 26/10/2004 dalle 17.15 alle 17.30 circa, sono state effettuate misure di induzione magnetica statica nella zona circostante il punto d'interramento dei cavi, proseguendo per un breve tratto lungo la parte interrata.

I livelli di campo, misurati immediatamente all'esterno della protezione anti-intrusione che circonda il punto d'interramento, non si sono discostati in modo apprezzabile dal valore di fondo, rilevabile anche lontano dai cavi e riconducibile al campo magnetico terrestre.

3.5 Misure di campo elettrico a frequenza industriale

Le misure sono state condotte posizionando il cavalletto con la sonda ($h = 1$ m) in punti equispaziati su una griglia. L'operatore, posto a distanza appropriata per non alterare la misura, registra il valore indicato dal ricevitore, collegato alla sonda tramite fibra ottica.

I risultati delle misure sono presentati sotto forma di mappa isolivello.

3.5.1 Mappatura del campo elettrico nell'area filtri AT 400 kVca

Le misure di campo elettrico sono state eseguite il giorno 26/10/2004 nell'area esterna, sottostante ai conduttori del montante AT 400 kVca e agli stalli d'alimentazione del filtro n. 2; nella zona del filtro n.1, come già per l'induzione magnetica, non sono stati effettuati rilievi.

Le rilevazioni sono state effettuate all'altezza di 1 m dal suolo: la Figura 10 mostra la mappa con le curve di isolivello del campo elettrico.

Si osserva che le configurazioni delle aree filtri e dei relativi conduttori d'alimentazione differiscono, nella realtà, dalla planimetria originaria; la geometria dell'impianto in Figura 10, quindi, è stata aggiornata secondo i rilievi eseguiti durante le misure di induzione magnetica.

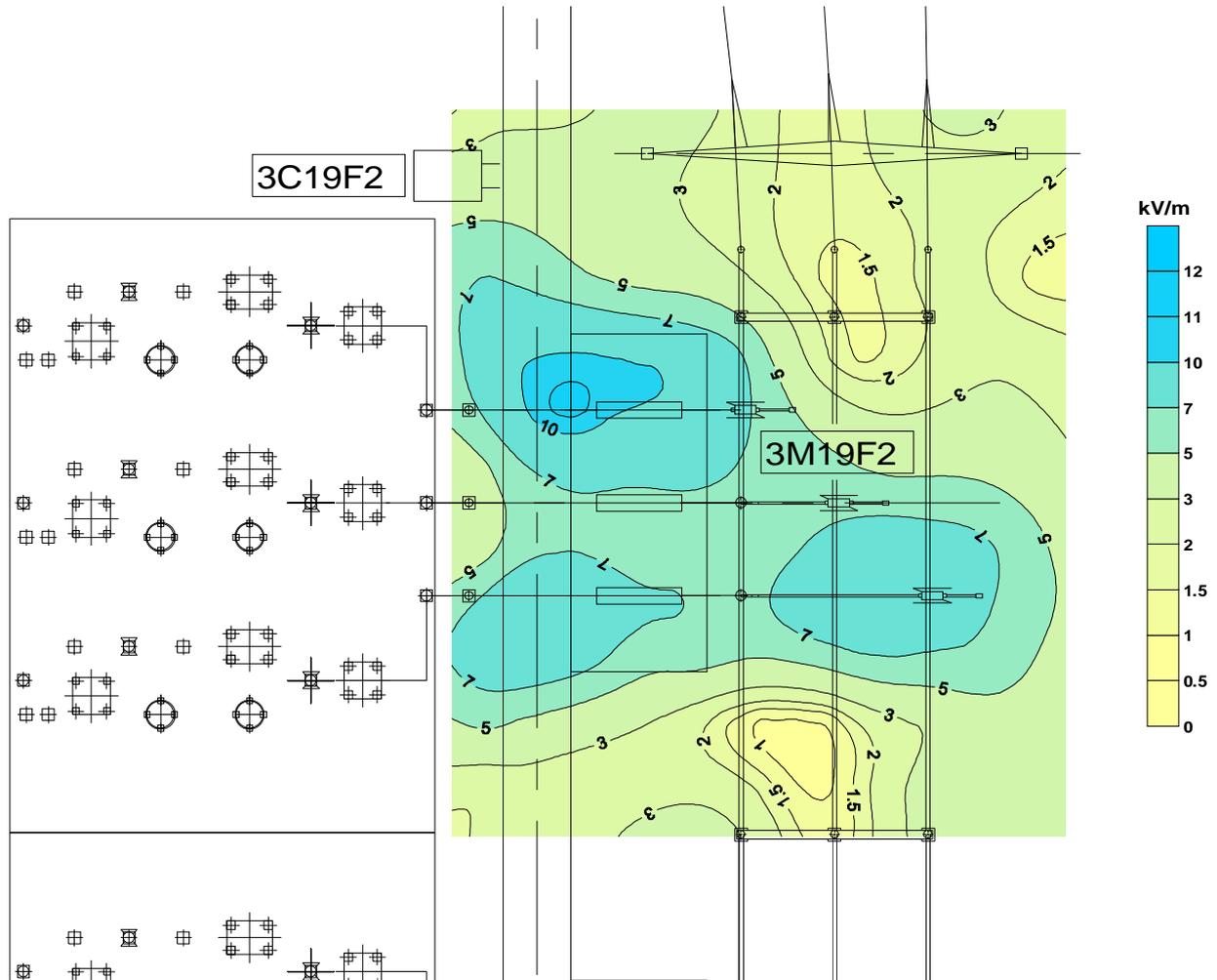


Figura 10 Mappa con curve isolivello in kV/m del campo elettrico ad 1 metro d'altezza

3.6 Analisi del contenuto armonico del campo elettrico

Al fine di valutare compiutamente l'esposizione professionale ai campi elettrici, è stata eseguita anche l'analisi armonica del campo elettrico.

I dati utilizzati sono stati ottenuti direttamente dal sistema di controllo del convertitore, il quale è in grado di fornire in continuazione i valori della tensione di fase, espressi in kV, sia per la frequenza fondamentale (50 Hz) sia per tutte le armoniche fino alla cinquantesima (2500 Hz).

I risultati, relativi alle sole armoniche di intensità significativa e rapportate al massimo valore di campo rilevato, sono mostrati nella Tabella 9, dove si può confrontare l'intensità di campo imputabile a ciascuna armonica con il relativo livello d'azione, come indicato nella Direttiva Europea.

Tabella 9 Risultati dell'analisi armonica del massimo campo elettrico rilevato

| f [Hz] | Tensione di fase [kV] | % | $E_{(h=1m)}$ [kV/m] | livello d'azione [kV/m] |
|-----------|-----------------------------|--------|------------------------|-------------------------------|
| 50 | 234.8 | 100.00 | 11.17 | 10.00 |
| 150 | 0.4 | 0.17 | 0.02 | 3.33 |
| 250 | 3.6 | 1.53 | 0.17 | 2.00 |
| 350 | 2.2 | 0.94 | 0.10 | 1.43 |
| 550 | 0.9 | 0.38 | 0.04 | 0.91 |
| 650 | 0.7 | 0.30 | 0.03 | 0.77 |
| 1150 | 0.2 | 0.09 | 0.01 | 0.61 |
| 1250 | 0.2 | 0.09 | 0.01 | 0.61 |
| 1750 | 0.1 | 0.04 | 0.00 | 0.61 |
| 1850 | 0.1 | 0.04 | 0.00 | 0.61 |
| 2350 | 0.2 | 0.09 | 0.01 | 0.61 |
| 2450 | 0.2 | 0.09 | 0.01 | 0.61 |

4 CONCLUSIONI

Le attività oggetto del presente rapporto hanno riguardato le misure dei campi magnetici ed elettrici tipicamente associati ai componenti della Stazione Elettrica HVDC di Galatina (LE).

Alla luce dei risultati ottenuti, nelle condizioni d'esercizio della stazione al momento delle misure (che si possono considerare rappresentative del normale funzionamento della stazione stessa), si può giungere alle conclusioni illustrate di seguito.

I livelli di campo magnetico a frequenza industriale, riscontrati nelle aree normalmente raggiungibili dal personale nelle operazioni di esercizio e manutenzione degli impianti, sono largamente al di sotto dei valori di azione prescritti dalla Direttiva Europea 2004/40/CE (500 μ T alla frequenza di 50 Hz). Date le condizioni di carico nel periodo delle misure (vedi Tabella 5), si può sostenere che anche nel caso di carico massimo (~ 850 A) i livelli di campo magnetico rimarrebbero ampiamente al di sotto del livello di azione della Direttiva Europea.

I livelli d'induzione magnetica statica, rilevati nella zona dei cavi in corrente continua, sono ampiamente inferiori al livello d'azione prescritto dalla Direttiva Europea (200 mT per il campo statico).

Il contenuto armonico del campo magnetico, rilevato nell'area del montante AT 400 kVca, si manifesta percentualmente apprezzabile, in particolare per la 5^a, 7^a, 11^a e 13^a armonica. In ogni caso, tenendo conto dei bassi livelli di induzione riscontrati alla frequenza fondamentale, i limiti di esposizione ai campi magnetici risultano ampiamente rispettati per tutte le frequenze analizzate.

Per quanto concerne il campo elettrico, sono stati riscontrati alcuni superamenti del limite di esposizione di 10 kV/m nella zona di alimentazione dei filtri armoniche, in particolare presso gli apparecchi di manovra per l'inserzione dei filtri stessi, laddove le parti in tensione si trovano ad un'altezza inferiore rispetto alle sbarre del montante del gruppo di conversione. Si sottolinea comunque che anche in presenza di campi elettrici di 14 kV/m non vengono superati¹ i limiti di base della Direttiva Europea per la densità di corrente indotta all'interno del corpo umano.

Per il contenuto armonico del campo elettrico, valgono considerazioni analoghe a quelle relative al campo magnetico.

¹ Cooper T.G. (2002): "Occupational Exposure to Electric and Magnetic Fields in the Context of the ICNIRP Guidelines" NRPB W-24.

Per quanto riguarda il campo magnetico statico, sono stati rilevati solo al contatto con il cavo dei valori misurabili ma in ogni caso ampiamente sotto il limite ICNIRP (200 mT).

5 FOTOGRAFIE



Foto 1 *Stazione di trasformazione*



Foto 2 *Stazione di trasformazione*



Foto 3 *Stazione di trasformazione*



Foto 4 Sistema di sbarre



Foto 5 Sistema di sbarre



Foto 6 *Montante AT 400 kV ca*



Foto 7 *Stalli di alimentazione dei filtri armoniche*



Foto 8 *Stalli di alimentazione dei filtri armoniche*



Foto 9 *Filtri armoniche*



Foto 10 *Filtri armoniche*



Foto 11 *Filtri armoniche*



Foto 12 *Trasformatori di conversione*



Foto 13 *Montante AT 400 kVcc*



Foto 14 *Montante AT 400 kVcc: sullo sfondo, il reattore di spianamento*



Foto 15 *Montante AT 400 kVcc: sullo sfondo, il terminale AT del cavo terrestre*



Foto 16 Montante AT 400 kVcc: particolare del terminale AT del cavo terrestre



Foto 17 Montante AT 400 kVcc: particolare dei terminali di ritorno MT del cavo terrestre



Foto 18 *Montante AT 400 kVcc: linea dei terminali di ritorno MT del cavo terrestre*