

Generazione di campi elettrici e magnetici di riferimento a frequenza industriale e a radiofrequenza per la taratura di sensori di campo

M. Borsero, G. Crotti, V. Giusio, G. Vizio

IEN Galileo Ferraris, Strada delle Cacce 91, 10135 Torino

borsero@ien.it

***Abstract** – Accuracy and equivalence of measurement results are assured by the adoption of suitable and common measurement procedures and by the traceability of the measurement systems. In the specific case, for the calibration of the field meters reference electromagnetic fields are needed, whose measurement value and uncertainty are known with reference to national standards. In the paper, the main characteristics and traceability levels of the systems for the generation of reference fields in the low, intermediate and high frequency range set up at IEN are briefly described.*

Introduzione

L'equivalenza e la ripetibilità dei rilievi di campo elettromagnetico sono assicurate dalla riferibilità della strumentazione di misura utilizzata. In accordo con la norma UNI 4546, *Misure e misurazioni. Termini e definizioni fondamentali*, la riferibilità è definita come la proprietà che uno strumento acquisisce quando viene sottoposto a taratura applicando grandezze le cui misure sono state assegnate con riferimento a campioni riconosciuti a livello nazionale o internazionale. Nel caso specifico, per effettuare la taratura della strumentazione si deve disporre di campi elettromagnetici di riferimento, dei quali siano stati determinati il valore e l'incertezza di misura associata. La taratura di un sensore di campo elettromagnetico consiste nel determinare il cosiddetto fattore di taratura K del misuratore in esame al variare di alcuni parametri, quali la frequenza, l'intensità del campo e l'orientamento spaziale del sensore. Il fattore di taratura è ottenuto dal rapporto tra il valore del campo di riferimento e la lettura del misuratore. La grandezza "intensità di campo elettromagnetico" non ha una riferibilità diretta alle unità SI fondamentali e non può d'altra parte essere realizzata come campione materiale. Pertanto si devono impiegare tecniche che permettano di determinare il campo di riferimento per mezzo di misure o valutazioni teoriche o una combinazione di entrambe. In questo modo l'intensità di campo viene posta in stretta relazione con altre grandezze misurabili come, ad esempio, la potenza, l'impedenza e l'attenuazione. Sulla base di queste considerazioni sono in fase di realizzazione presso l'Istituto Elettrotecnico Nazionale Galileo Ferraris (IEN) sistemi di generazione di campi di riferimento a bassa frequenza e a radiofrequenza, le cui principali caratteristiche sono descritte nel seguito.

Sistema di generazione di campi magnetici di riferimento da 20 Hz a 1 kHz

La taratura dei misuratori di campo magnetico con un'incertezza relativa di qualche unità percentuale necessita di un sistema in grado di generare un campo di riferimento, il cui valore sia noto con un'incertezza di alcune parti per mille. Il sistema realizzato presso l'IEN è costituito da quattro avvolgimenti di 300 spire ciascuno, disposti come mostrato in Figura 1. Il valore di induzione magnetica B_0 generato nel centro del sistema è proporzionale alla corrente I negli avvolgimenti secondo la relazione:

$$B_0 = \beta \cdot I \quad (1)$$

in cui la costante β dipende da dimensioni e posizione di ciascuna delle N spire alimentate. L'incertezza di misura di B_0 è stimata a partire dall'incertezza con cui sono note le grandezze che compaiono nella (1), considerando cioè la componente u_I dovuta a stabilità e misura della corrente I e la componente u_β , funzione dell'incertezza di misura della distanza tra gli avvolgimenti e della dimensione e posizione di ciascuna spira. Si introduce poi una

componente u_s per tener conto del grado di non uniformità del campo nel volume centrale tra gli avvolgimenti. Per valori di induzione inferiori a 100 μT si considera un'ulteriore componente u_f dovuta al campo di fondo. La Tabella I riassume il bilancio d'incertezza per campi generati a 50 Hz nella gamma di valori di induzione da 0,1 μT a 3 mT, calcolato in accordo con la pubblicazione UNI CEI ENV 13005.

Tabella I - Campo magnetico a 50 Hz: bilancio d'incertezza

grandezza X_i	incertezza tipo relativa $u_i(x_i)$	distrib. di probabilità	coeff. di sensibilità c_i	Contributo all'incertezza $u_{ri}(y)$
u_l	$1,2 \cdot 10^{-3}$	rettang.	1	$1,0 \cdot 10^{-3}$
u_β	$4,4 \cdot 10^{-3}$	rettang.	1	$3,3 \cdot 10^{-3}$
u_s	$0,55 \cdot 10^{-3}$	rettang.	1	$0,55 \cdot 10^{-3}$
u_f	$2,9 \cdot 10^{-3}/B_o(*)$	rettang.	1	$2,9 \cdot 10^{-3}/B_o(*)$
Incertezza estesa (livello di fiducia 95%)		$1,96 \cdot \sqrt{(3,5 \cdot 10^{-3})^2 + \left(\frac{2,9 \cdot 10^{-3}}{B_o}\right)^2}$		

(*) valore di B_o espresso in μT

L'incertezza estesa U_{B0} è ottenuta sommando in quadratura i contributi riportati in Tabella I, con il fattore di copertura $k=1,96$ che corrisponde a un livello di fiducia pari al 95%.

L'adozione di un alimentatore a frequenze superiori a quella di rete ha reso possibile l'estensione in frequenza del sistema.

Per valutare l'effetto delle capacità distribuite tra le spire è stato rilevato l'andamento in frequenza del modulo dell'impedenza del sistema. La Figura 2, relativa alla configurazione con 30 spire alimentate per avvolgimento, mostra come la frequenza di risonanza del sistema sia compresa tra 7825 Hz e 7900 Hz. Noto il valore dell'induttanza si ottiene per la capacità del sistema un valore limite di 36 nF. Per frequenze superiori ai 100 Hz, si introduce quindi un'ulteriore componente d'incertezza, il cui peso aumenta con la frequenza: l'incertezza estesa con cui è noto il campo generato alla frequenza di 1 kHz è stimata pari a $2 \cdot 10^{-2}$, per valori di induzione sino a 1 mT.

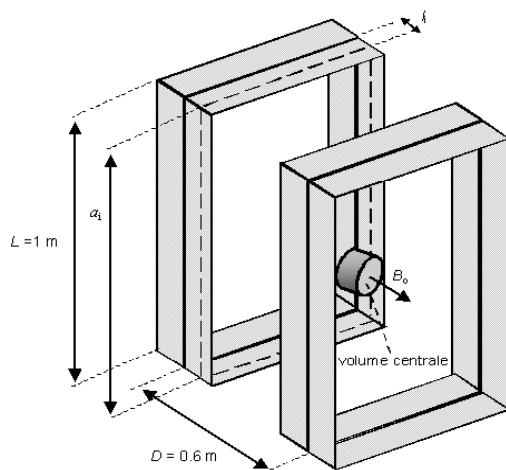


Figura 1. Schema del sistema di generazione di campo magnetico di riferimento

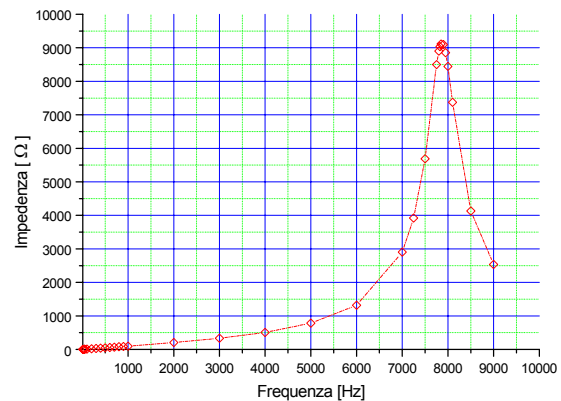


Figura 2. Modulo dell'impedenza del sistema in funzione della frequenza

Generazione di campi magnetici con frequenza compresa tra 1 kHz e 30 kHz

Apparecchiature operanti a frequenza superiore al kilohertz sono utilizzate in ambiente industriale e sempre più diffuso è l'uso di strumenti di misura con banda passante superiore alla decina di kilohertz. Per assicurare anche in questo caso la riferibilità della strumentazione è in fase di realizzazione un sistema per generare campi magnetici di riferimento nell'intervallo di frequenze tra 1 kHz e 30 kHz. Mediante analisi numerica è stata identificata

la configurazione del sistema che consenta la generazione di campi con un soddisfacente grado di uniformità in un volume tale da contenere le sonde dei misuratori utilizzati per i rilievi di campo ambientale. Sulla base dei risultati ottenuti è in corso di realizzazione un prototipo del sistema, costituito da una coppia di bobine di Helmholtz avente lato pari a 0,6 m, per la generazione di campi sino a 100 μ T per frequenze sino a 20 kHz e di intensità decrescente per frequenze superiori.

Campi elettromagnetici di riferimento a radiofrequenza

Il campo di riferimento è ottenuto normalmente, a seconda delle gamme di frequenza, all'interno di strutture ad onda guidata (celle TEM e G-TEM) o nella cosiddetta "zona quieta" all'interno di una camera completamente anecoica utilizzando un'antenna trasmittente dalle caratteristiche note.

L'attività condotta all'IEN ha seguito due linee: la prima prevedeva il completamento del banco di misura che utilizza la cella TEM tradizionale e che permette di generare un campo elettromagnetico di riferimento nella gamma da 100 kHz a 250 MHz (per livelli di intensità di campo compresi tra 1 V/m e 60 V/m); la seconda prevedeva la caratterizzazione della cella GTEM in vista del suo impiego in un banco di misura complementare al precedente per quel che riguarda la frequenza del campo generato (da 200 MHz ad almeno 1 GHz).

Per quanto riguarda la cella TEM, il fattore di taratura K_E è dato dalla seguente espressione, valida per la componente elettrica del campo elettromagnetico [1]:

$$K_E = \frac{\sqrt{P \cdot Z_0}}{b \cdot E_m} \quad (2)$$

dove: P è la potenza netta fornita alla cella, ottenuta dalla differenza tra la potenza incidente e la potenza riflessa alla porta di ingresso della cella, Z_0 è la parte reale dell'impedenza caratteristica della cella (circa 50 Ω) nella sezione di interesse, b è la distanza tra il setto e la parete inferiore o superiore ed E_m è il livello di campo indicato dallo strumento in taratura.

L'incertezza relativa composta sulla stima del fattore di taratura, sviluppata a partire dal modello matematico della misura definito con l'equazione (2), è descritta dalla seguente formula:

$$\frac{u_c(K_E)}{K_E} = u_r(K_E) = \sqrt{\frac{u_r^2(P) + u_r^2(Z_0)}{4} + u_r^2(b) + u_r^2(E_m) + u_r^2(D)} \quad (3)$$

dove le $u_r(x_i)$ sono le stime delle incertezze relative delle diverse grandezze di ingresso e $u_r(D)$ è l'incertezza dovuta alla non perfetta omogeneità del campo all'interno del volume di prova.

Nella Tabella II è riassunto il calcolo che permette di stimare l'incertezza relativa associata al fattore di taratura di un sensore di campo misurato nella cella TEM utilizzata all'IEN.

Tabella II - Incertezza associata al fattore di taratura

Contributo X_i	Incertezza tipo relativa $u(x_i)$	Distribuzione di probabilità	Coefficiente di sensibilità c_i	Componente di incertezza relativa $u_i(Y) = c_i u(X_i)$
P	0,024	Normale $k=1$	0,5	0,012
Z_0	0,083	Rettangolare	0,5	0,024
b	0,017	Rettangolare	1	0,0098
E_m	$u(E_m)$	Normale	1	
D	0,07	Rettangolare	1	0,04
K_E				$u_c = 0,05$

Fattore di copertura k (95%)	2
Incertezza relativa estesa U (95%)	0,1

Tale valore rappresenta lo “stato dell’arte” in materia ed è stato, peraltro, confermato dai risultati del confronto internazionale CCEM.RF-K7.a.F, organizzato dal BIPM e coordinato dal NIST (USA), al quale l’IEN ha partecipato [2].

Per quanto riguarda l’impiego della GTEM si è iniziato a caratterizzare la cella concentrando l’attenzione nella gamma di frequenza complementare a quella precedente, in particolare tra 200 MHz ed 1 GHz. Precisamente si sono valutati la risposta in frequenza, il rapporto d’onda stazionaria (ROS) e l’omogeneità del campo nel volume di prova.

Il comportamento in frequenza è stato valutato misurando, con un analizzatore vettoriale di reti, il ROS della cella, considerata come un dispositivo ad una porta. Per frequenze superiori a 200 MHz circa l’adattamento della cella è buono e garantisce valori di ROS sempre inferiori od uguali a 1,2. L’altro “parametro” molto importante per una cella di tipo TEM è l’omogeneità del campo al suo interno.

A questo scopo sono state condotte molte misurazioni all’interno della GTEM dell’Istituto, utilizzando come rivelatore di campo un sensore commerciale di ridotte dimensioni. Si sono ottenute molte “mappe” che rappresentano, alle diverse frequenze, il livello relativo dell’intensità di campo rispetto al valore di riferimento al centro del volume di prova. In Figura 3 è riportato un esempio di queste mappe, relativo a due frequenze di lavoro. Ciascun grafico rappresenta una sezione verticale della cella perpendicolare all’asse di propagazione del campo: le ordinate riportano le distanze dal piano di base della cella, le ascisse lo scostamento dall’asse centrale. All’interno di una fascia con lo stesso colore la variazione del livello del campo è contenuta entro 1 dB.

Questo sistema, unitamente a quello basato sulla cella TEM, è stato impiegato per partecipare al progetto EUROMET n. 520 “Comparison of electrical field strength measurements”, coordinato dal METAS (istituto metrologico svizzero) e recentemente “promosso” a “key comparison” in ambito BIPM (progetto CCEM.RF-K20, tuttora in corso). Allo stato attuale l’incertezza dichiarata per le misure condotte all’interno della GTEM assume valori compresi tra il 10% ed il 12% (1 σ), in funzione della banda di frequenza di lavoro. Tali valori si ridurranno di alcune unità percentuali quando il progetto sarà completato, come previsto, migliorando la caratterizzazione della cella con l’impiego di un sensore di campo di precisione (“transfer standard”) e di una “micro-cella” TEM.

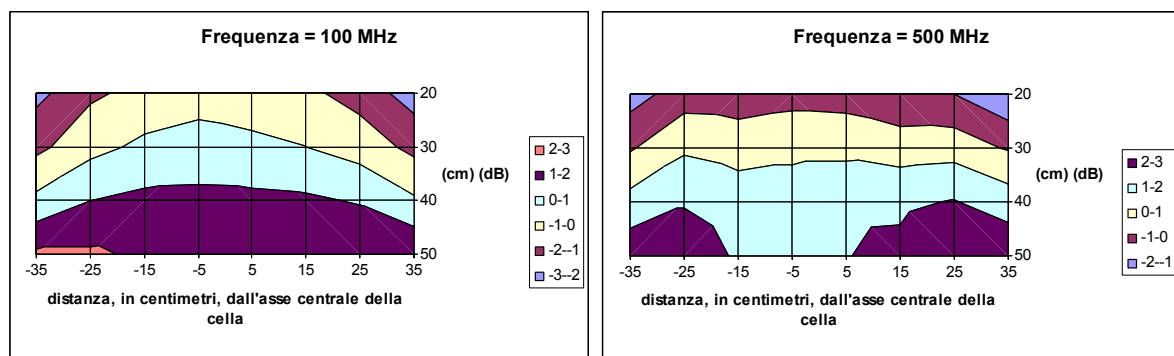


Figura 3. Andamento del campo in una sezione trasversale della cella GTEM

Bibliografia

- [1] L. Anglesio, G. Crotti, M. Borsero, G. Vizio, “Riferibilità e incertezze nella misura di campi elettromagnetici,” *Alta Frequenza*, **11**, 2, pp. 4-12, 1999.
- [2] M. Kanda, J. Achkar, M. Alexander, M. Borsero et al., “International Comparison GT/RF 86-1 Electric Field Strengths: 27 MHz to 10 GHz,” *IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility*, **42**, 2, pp. 190 – 205, May 2000