

Misura di campi magnetici a bassa frequenza con forma d'onda semi-rettangolare

Giordano D., Crotti G.

Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica, Strada delle Cacce 91, 10135 Torino, d.giordano@inrim.it

RIASSUNTO

Il lavoro analizza la distorsione introdotta dai misuratori di induzione magnetica in presenza di forme d'onda pulsate o periodiche semi-rettangolari, come quelle riscontrabili in prossimità di dispositivi industriali per saldatura o in vicinanza di macchine a risonanza magnetica nucleare. Con l'obiettivo di comprendere le ragioni delle distorsioni osservate è stato messo a punto un modello circuitale in grado di riprodurre il comportamento del filtro passa alto, inserito nel misuratore per eliminare le oscillazioni lente della tensione indotta ai capi delle sonde. La tipologia di filtro è stata definita misurando la risposta in frequenza del misuratore preso in considerazione, ottenuta mediante un sistema di generazione di campi di riferimento a frequenze sino a 100 kHz. Sulla base del modello messo a punto, viene proposta una procedura che permette la ricostruzione dell'effettiva forma d'onda di induzione a partire dagli andamenti misurati, noto il comportamento del misuratore nel dominio della frequenza.

INTRODUZIONE

La valutazione dell'esposizione umana ai campi magnetici bassa frequenza è di norma effettuata, in prima istanza, mediante misure di induzione magnetica (densità di flusso magnetico). Nel caso di andamenti di campo puramente sinusoidali, la valutazione della conformità all'esposizione prescritta può essere condotta confrontando direttamente i valori misurati con i limiti prescritti in termini di livelli di riferimento, espressi in funzione della frequenza [1]. Più complesso è il caso in cui l'andamento temporale del campo sia distorto o pulsato. In questo caso, il confronto con i livelli di riferimento può essere effettuato considerando i contributi delle diverse componenti nel dominio della frequenza, o, con un approccio meno cautelativo, facendo uso di opportune funzioni peso complesse [2, 3]. Qualunque sia il metodo adottato, la corretta valutazione dell'esposizione è legata alle capacità del misuratore di rivelare e riprodurre fedelmente la reale forma d'onda del campo.

Gli strumenti oggi utilizzati per la misura sono equipaggiati con sonde a induzione triassiali. Alcuni misuratori di campo tra quelli disponibili sul mercato dispongono di uscite analogiche e permettono quindi di visualizzare e analizzare le forme d'onda delle tre componenti di campo misurate. Rilievi condotti con questo tipo di strumenti mettono in evidenza l'introduzione di distorsioni, in presenza di forme d'onda periodiche con forma semi-rettangolare o trapezoidale. Nel seguito si analizza la risposta di un misuratore di campo a questo tipo di stimolo, facendo riferimento a forme d'onda che si riscontrano effettivamente in sito. Analizzando la risposta del misuratore a segnali di frequenza estremamente bassa, generati da un sistema a bobine di Helmholtz, sono messi a punto modelli circuitali che riproducono il comportamento distorto attribuito al filtro passa-alto, posto a valle dell'avvolgimento sensore. Facendo uso del modello di filtro implementato, si elabora e sperimenta una procedura che consente la ricostruzione dell'andamento di campo reale a partire dalla forma d'onda misurata.

FORME D'ONDA SEMI-RETTANGOLARI

Si definiscono segnali con forme d'onda semi-rettangolari andamenti temporali di campo magnetico caratterizzati da fronti di salita e di discesa con durate sino a qualche centinaia di microsecondi, intervallati da livelli di campo costante la cui durata può raggiungere parecchie centinaia di millisecondi. Campi periodici e/o pulsati con forme d'onda semi-rettangolari e contenuto spettrale sino alle decine di kilohertz sono riscontrabili in ambienti lavorativo, ad esempio in prossimità di dispositivi per la diagnostica a risonanza magnetica nucleare (MRI) o di impianti e dispositivi per saldatura. In quest'ultimo caso, la corrente di saldatura viene ciclicamente interrotta e poi nuovamente applicata. La forma d'onda che ne risulta è caratterizzata da fronti ripetuti di salita e discesa aventi andamento esponenziale, intervallati da periodi a corrente costante o senza carico.

— corrente
—○— induzione magnetica misurata

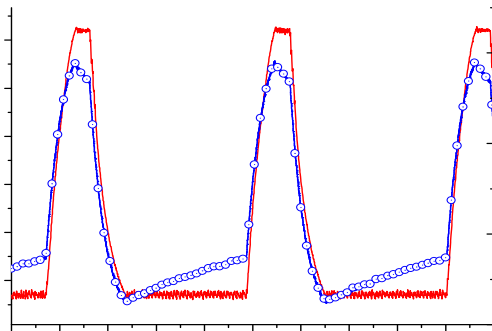


Figura 1 - Confronto tra andamenti temporali di corrente e campo magnetico misurati durante un'operazione di saldatura.

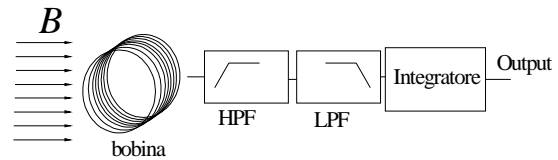


Figura 2 – Schema semplificato di un misuratore di induzione magnetica con sonda a induzione e circuito di processamento del segnale indotto ai campi della bobina che include un filtro passa alto (HPF) e un filtro passa basso (LPF).

La figura 1 mostra un esempio di corrente e campo magnetico da essa generato misurati contemporaneamente durante una sequenza di saldatura. Per la misura di corrente si è utilizzata una bobina di Rogowski, mentre l'andamento temporale dell'induzione magnetica è ottenuto da un misuratore commerciale con uscite analogiche dei segnali misurati. Il confronto tra le forme d'onda mostra come esse differiscano significativamente durante gli intervalli di tempo in cui la corrente si mantiene costante.

Correnti con andamento analogo fluiscono nelle bobine di gradiente dei tomografi MRI, utilizzate per produrre gradienti lineari e controllati di campo statico, per la selezione di sezioni di analisi e la codifica fase/frequenza [4, 5]. In questo caso, il campo magnetico misurato può differire in modo ancora più significativo da quello di corrente, poiché prodotto dalla somma dei contributi generati da diversi gruppi di bobine, in cui fluiscono correnti che possono essere o non essere tra loro in fase [6].

ANALISI DELLE DISTORSIONI INTRODOTTE DAL MISURATORE

I campi magnetici ambientali a bassa frequenza sono misurati, nella quasi totalità dei casi, facendo uso di strumenti la cui sonda di campo è costituita da tre avvolgimenti tra loro ortogonali, ai capi dei quali è indotto un segnale di tensione proporzionale alla derivata temporale del flusso magnetico ad essi concatenato. Le componenti di campo magnetico sono ottenute mediante integrazione del segnale indotto. La frequenza di taglio superiore della banda passante di questi dispositivi è di norma compresa tra le decine e le centinaia di kilohertz. All'uscita della bobina e prima dello stadio di integrazione è inserito un filtro passa alto (HPF), con frequenza di taglio molto bassa. La presenza di questo filtro permette sia di eliminare la componente continua introdotta da segnali di condizionamento, sia di limitare i segnali spuri indotti ai capi dalla bobina da eventuali vibrazioni e movimenti non intenzionali della sonda.

MODELLIZZAZIONE MEDIANTE FILTRO DEL PRIM'ORDINE

La non fedele riproduzione della forma d'onda può essere attribuita alla presenza del filtro HPF nella catena di trattamento del segnale. Per verificare la validità di questa affermazione si implementa un semplice modello circuitale in ambiente Matlab_simulink che include la bobina sensore e il filtro passa-alto, inserito prima dell'integratore (figura 2). La presenza del filtro basso (LPF), che determina la frequenza di taglio superiore è trascurata, poiché la gamma di frequenza di interesse è significativamente inferiore a quella dello strumento considerato.

La validità del modello adottato per il filtro HPF è verificata sperimentalmente. Allo scopo di generare e misurare in laboratorio forme d'onda che riproducano quelle reali si utilizza un sistema costituito da una coppia di bobine di Helmholtz per la generazione di campi magnetici di riferimento sino a 100 kHz [7], da un sistema di alimentazione composto da un generatore di forme d'onda arbitrarie e amplificatore di potenza e da un misuratore di campi magnetici con uscita analogica associato a un oscilloscopio digitale.

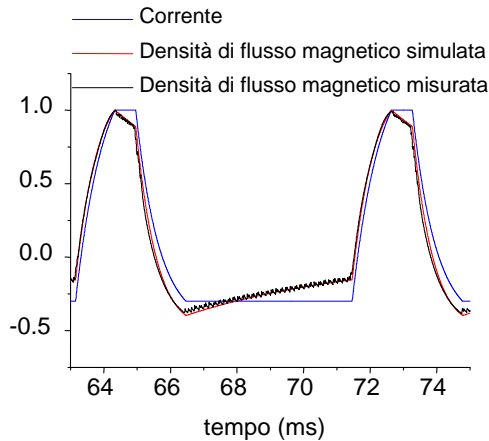


Figura 3 – Densità di flusso magnetico simulata e andamento generato dalle bobine di Helmholtz alimentate da una corrente semi-rettangolare (valori normalizzati al picco).

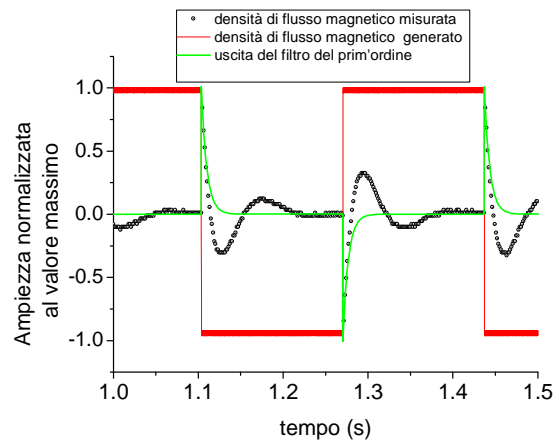


Figura 4 – Andamenti simulati e misurati dell'uscita del misuratore in presenza di un campo magnetico rettangolare con frequenza 3 Hz (valori normalizzati al picco).

Il sistema di alimentazione è regolato in modo da far fluire nelle bobine una corrente che riproduca in modo il più possibile accurato, la forma d'onda assorbita da un dispositivo per saldatura [8]. La forma d'onda ottenuta è caratterizzata da fronti d'onda di salita e discesa esponenziali raccordati da un tratto a corrente costante di durata pari a 1 ms. Il filtro del misuratore, selezionabile dall'operatore, è posto a 10 Hz.

La figura 3 mostra come corrente riprodotta in laboratorio riproduca in modo più che soddisfacente quella misurata in sito (figura 1) e che il modello del misuratore (figura 2) permetta di ottenere l'andamento di campo misurato. Il modello non risulta però in grado di riprodurre la situazione reale nel caso in cui il tratto a corrente costante sia più lungo della costante di tempo del filtro RC ($\tau=6.5$ ms), come mostrato in figura 4, dove il confronto tra campo misurato e campo applicato è effettuato con un segnale avente frequenza di ripetizione 3 Hz.

DETERMINAZIONE DEL COMPORTAMENTO REALE DEL FILTRO

Al fine di implementare un modello circuitale del filtro FPA che permetta di riprodurre in modo più accurato il comportamento reale dello strumento si effettua un'analisi della sua risposta in frequenza, determinandone sperimentalmente la funzione di trasferimento nella gamma da 5 Hz a 100 Hz. Il circuito di alimentazione e misura è lo stesso utilizzato per valutare se il comportamento del misuratore possa essere ascrivito alla presenza di un semplice filtro del prim'ordine. Il ritardo tra campo applicato e risposta dello strumento è ottenuto rilevando mediante un opportuno misuratore la differenza di fase tra andamento della corrente nelle bobine, ottenuto dalla misura della tensione ai capi di un derivatore campione non-induttivo posto in serie alle bobine stesse, e il segnale analogico di tensione, proporzionale al campo magnetico, fornito dal misuratore. L'andamento in frequenza del guadagno e della fase della funzione di trasferimento misurata sono riportati nella figura 5. Poiché l'effetto derivativo dovuto all'interazione campo-avvolgimento sensore viene compensato dallo stadio di integrazione (figura 2) e il filtro FPB agisce a frequenze molto più elevate, la funzione di trasferimento misurata può essere considerata equivalente a quella del solo filtro HPF. Dall'esame degli andamenti riportati si possono evincere alcune considerazioni: 1) la costanza dell'ampiezza della funzione di trasferimento a partire da frequenze dell'ordine del centinaio di hertz porta a escludere l'utilizzo di un filtro di Cauer o di Chebyshev; 2) la frequenza di taglio f_c è leggermente differente da quella nominale impostata (10 Hz); 3) l'andamento del guadagno, che cresce con una pendenza di 60 dB/decade a bassa frequenza, e la variazione totale della fase (270°) fanno ritenere che si tratti di un filtro del terz'ordine.

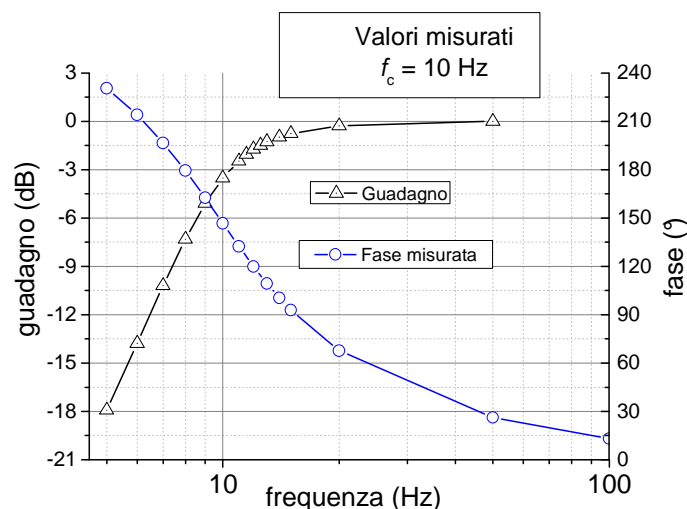


Figura 5 – Valori misurati (guadagno e fase) della funzione di trasferimento del misuratore di campo magnetico.

MODELLO DEL FILTRO PASSA ALTO

Come primo tentativo, sulla base degli andamenti ottenuti sperimentalmente si adotta per il filtro HPF l'architettura del filtro Butterworth. In figura 6 è schematizzato il circuito elettrico associato, connesso al carico resistivo R_L .

Come noto, l'induttanza L_2 e le capacità C_1 e C_3 sono normalizzate alla frequenza angolare $\omega=1$ rad/s e a un carico $R_L=1\ \Omega$. Per ottenere una funzione di trasferimento con frequenza di taglio $f_c=10$ Hz, i valori dei parametri devono essere divisi per $\omega_c=2\pi f_c$. In tabella I sono indicati i valori di capacità e induttanza per un filtro Butterworth con frequenza di taglio 10 Hz e 30 Hz. Chiaramente, anche se i valori di questi parametri non possono essere quelli del circuito reale, essi permettono comunque una buona approssimazione della risposta in frequenza come mostrato in figura 7a e 7b. Con riferimento agli andamenti ottenuti con $f_c=10$ Hz, il filtro considerato permette una buona riproducibilità degli andamenti misurati sia per il guadagno, sia per la fase, anche se la frequenza di taglio effettiva è superiore a quella nominale. Le differenze più elevate tra fase misurata e calcolata, circa 20° , si riscontrano a frequenze molto basse, ma si riducono a 3° a 50 Hz. Queste discrepanze possono essere attribuite alla difficoltà di misurare il ritardo di fase a frequenze estremamente basse, laddove l'ampiezza del segnale risulta fortemente ridotta dalla presenza del filtro. La stessa procedura di confronto è applicata al filtro con frequenza di taglio 30 Hz. In questo caso gli scarti a bassa frequenza appaiono maggiori. E' necessario, per spiegare queste discrepanze, considerare il fatto che i valori dei parametri del filtro effettivamente implementato nello strumento non sono noti e possono quindi differire leggermente da quelli nominali del filtro Butterworth.

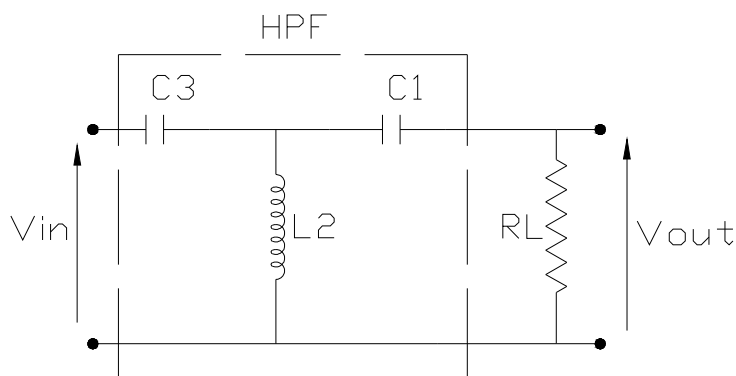


Figura 6 – Schema del modello circuitale del filtro HPF con il carico R_L .

Tabella I Valori dei parametri elettrici del filtro per $RL = 1 \Omega$

f_c	C1	L2	C3
10 Hz	32 mF	12 mH	10.6 mF
30 Hz	10.6 mF	3.98 mH	3.54 mF

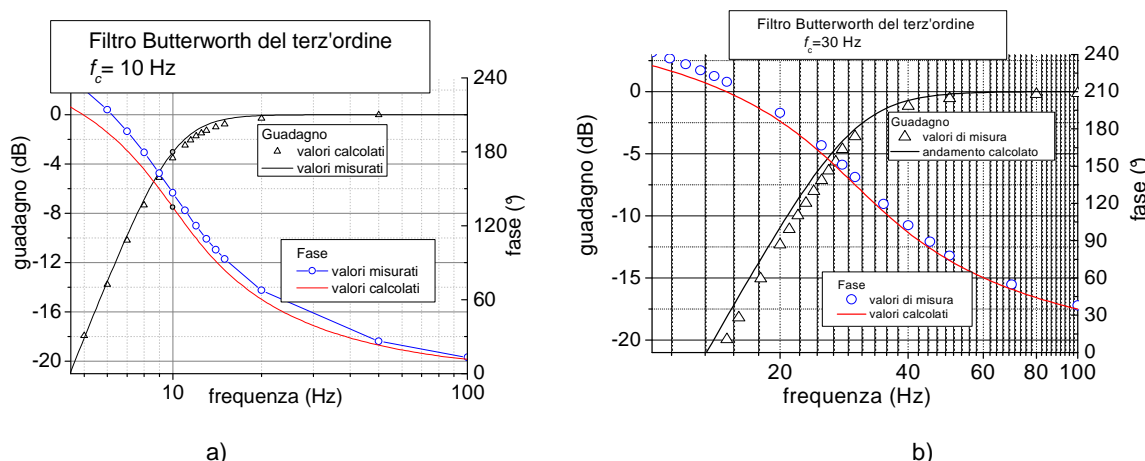


Figura 7 Confronto tra valori misurati e valori calcolati del guadagno e della fase del misuratore nel caso di frequenza di taglio a) 10 Hz e b) 30 Hz.

VERIFICA DELL'EFFICACIA DEL FILTRO

La validità del modello adottato per il filtro è verificata sperimentalmente nel dominio del tempo, facendo ancora uso del sistema di generazione a bobine di Helmholtz. La tensione fornita in uscita dal misuratore in presenza di un campo magnetico rettangolare con frequenza di ripetizione pari a 3 Hz, 12 Hz e 50 Hz è confrontata con quella fornita dal modello in presenza dello stesso stimolo in ingresso. Tenuto conto delle caratteristiche del sistema di generazione, cioè induttanza relativamente bassa degli avvolgimenti e basse frequenze in gioco, la corrente che fluisce nel sistema potrebbe essere considerata semi-rettangolare. Tuttavia, al fine di effettuare il confronto tra misura e calcolo nelle stesse condizioni, si introduce un semplice modello circuitale del sistema di generazione di campi magnetici. In figura 8 sono confrontati i risultati ottenuti nel caso di un filtro con frequenza di taglio 10 Hz per le tre frequenze di ripetizione considerate. L'affidabilità del modello scelto è confermata dal buon accordo tra andamento calcolato e misurato. La non perfetta sovrapposizione tra le due curve è ancora imputabile all'effettivo e non noto valore dei parametri del filtro reale.

Il modello del filtro è ulteriormente verificato generando un segnale di ingresso proporzionale al campo magnetico prodotto dalla corrente che fluisce in un dispositivo per saldatura a resistenza. L'andamento di campo magnetico è stato misurato a 10 cm dalla maniglia. La corrente, mostrata in figura 9, ha un andamento quasi rettangolare e una durata di 0.7 secondi. Al valore di corrente si sovrappone un'oscillazione (*ripple*), non mostrata in figura. L'uscita del misuratore mostra la presenza di due oscillazioni smorzate, la seconda delle quali è la risposta libera del filtro, generata dallo spegnimento della corrente. La figura 10 riporta il confronto tra la forma d'onda misurata e quella calcolata. In questo caso, la discrepanza tra i due andamenti appare significativa sia per l'ampiezza, sia per la frequenza di oscillazione, anche se lo stimolo applicato appare analogo a quello di figura 8, con fronti di salita e discesa simili. Questo fatto può essere spiegato ipotizzando una non-linearità del filtro induttivo, poiché nel caso reale il campo magnetico generato da un dispositivo per saldatura è dell'ordine di parecchie centinaia di microtesla, mentre quello riprodotto in laboratorio è di due ordini di grandezza inferiore.

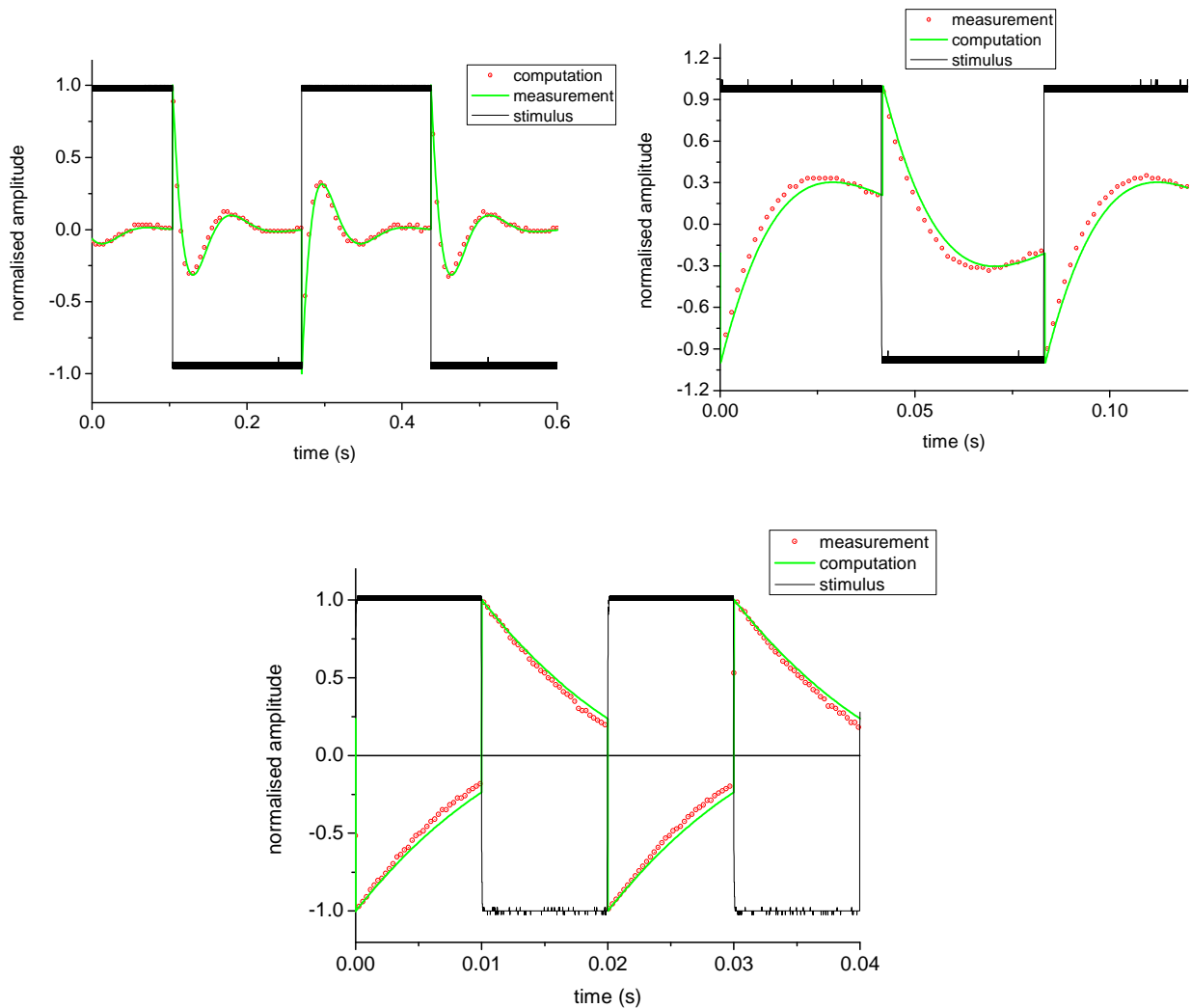


Figura 8 – Valori calcolati e misurati del segnale di uscita del misuratore (normalizzati al valore di picco), in presenza di un campo quasi rettangolare con frequenza 3 Hz (a), 12 Hz (b) e 50 Hz (c).

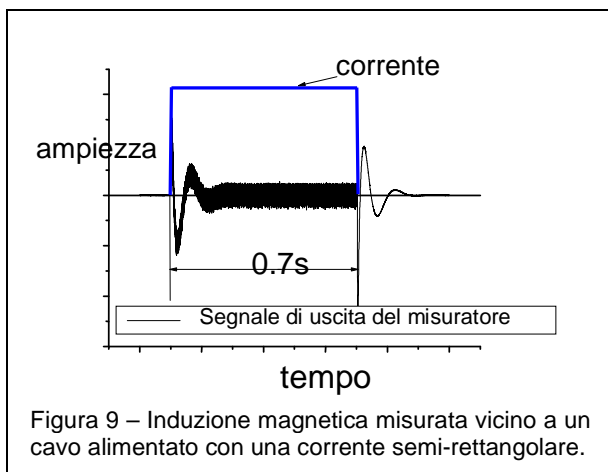


Figura 9 – Induzione magnetica misurata vicino a un cavo alimentato con una corrente semi-rettangolare.

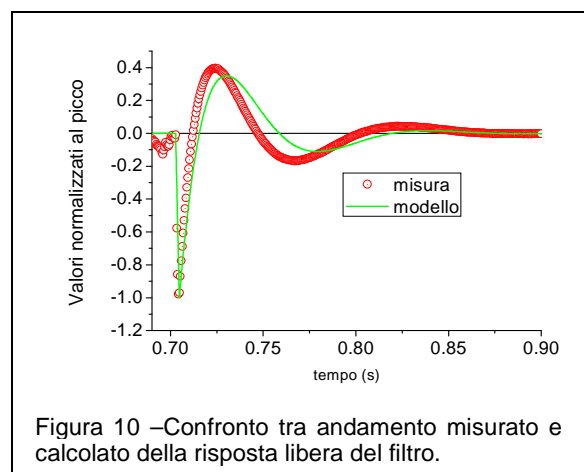


Figura 10 –Confronto tra andamento misurato e calcolato della risposta libera del filtro.

PROCEDURA DI RICOSTRUZIONE DELL'EFFETTIVO ANDAMENTO DI CAMPO

Al fine di correggere la distorsione introdotta dal filtro è necessario elaborare una procedura, che, a partire de segnale di tensione acquisito consenta di ricostruire la forma d'onda reale del campo. Si considera il circuito rappresentato in Figura 11, dove la grandezza nota è la tensione di

uscita $v_{out}(t)$ misurata ai capi della resistenza di valore unitario R_L , mentre la grandezza incognita è la tensione in ingresso $v_{in}(t)$, che è il segnale di tensione fornito dal misuratore.

La procedura di ricostruzione comporta la soluzione di equazioni che coinvolgono l'integrale della corrente che fluisce in R_L , l'induttanza L_2 e la capacità C_3 . La procedura, il cui schema a blocchi è mostrato in figura 12, è implementata in ambiente Matlab. Poiché le forma d'onda considerate sono a valor medio nullo, le costanti di integrazione sono implicitamente definite ponendo a zero la componente continua delle grandezze integrate.

Il primo test numerico della procedura di correzione elaborata secondo la schema di Figura 12 è condotto confrontando la forma d'onda rettangolare "imposta" con quella ricostruita facendo uso del circuito di figura 11. La ricostruzione del segnale di ingresso (figura 13) appare più che soddisfacente. Una seconda verifica è effettuata assumendo, come segnale di ingresso, l'andamento misurato dallo strumento in considerazione in presenza del campo magnetico generato dal sistema a bobine di Helmholtz. La figura 14 mostra come l'andamento ricostruito nel caso di forme d'onda quali quelli generate da dispositivi per saldatura riproduca l'effettivo campo magnetico applicato.

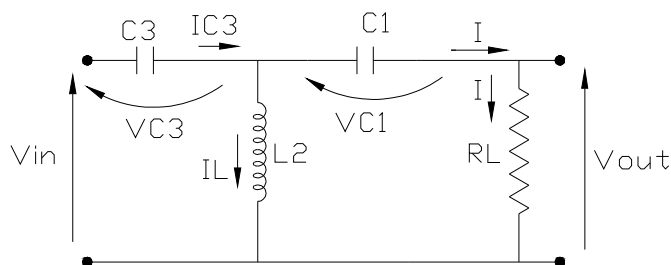


Figura 11 – Circuito elettrico per la ricostruzione del segnale di ingresso V_{in} .

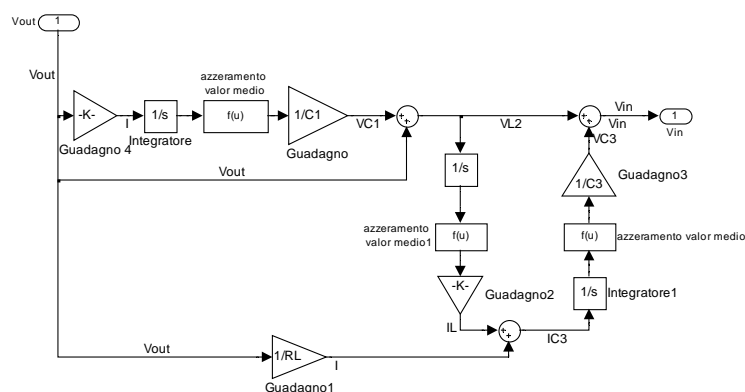


Figura 12 – Schema a blocchi per l'implementazione della procedura di ricostruzione.

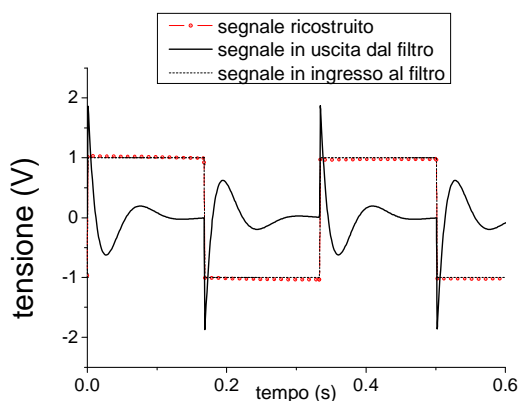


Figura 13 – Confronto tra segnale imposto in ingresso al filtro e segnale ricostruito.

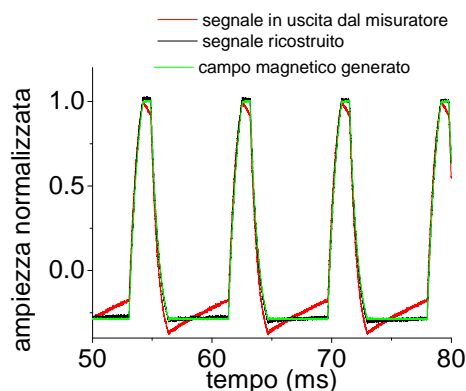


Figura 14 – Confronto tra effettiva densità di flusso magnetico in ingresso al misuratore e segnale ricostruito.

CONCLUSIONI

Criticità legate alla risposta del misuratore possono presentarsi nel rilievo di campi magnetici ambientali a bassa frequenza con forme d'onda semi-rettangolari. Verifiche in laboratorio su misuratori dotati di uscita analogica del segnale di campo, condotte riproducendo forme d'onda reali, evidenziano come tali distorsioni appaiano imputabili al filtro di ingresso passa alto. La risposta del misuratore può essere riprodotta introducendo modelli di filtro di complessità crescente. Con riferimento al misuratore analizzato, l'introduzione di un filtro *Butterworth* del terz'ordine consente di riprodurre la risposta dello strumento in presenza di campi quali quelli generati da saldatrici a resistenza. Nota la tipologia e le caratteristiche del filtro in ingresso, la procedura proposta permette di ricostruire la forma d'onda applicata a partire dal segnale effettivamente misurato. La validità dell'approccio seguito è dimostrata sperimentalmente confrontando l'andamento di campo applicato e quello ricostruito utilizzando il segnale misurato. Il modello adottato per il filtro verrà completato introducendo una non-linearità del parametro induttivo, per meglio riprodurre il comportamento del misuratore in presenza di elevati valori di induzione magnetica. L'approccio proposto può essere esteso ad altri misuratori di campo con differenti tipi di filtro di ingresso, purché sia determinata la funzione di trasferimento complessa del misuratore nella gamma di frequenza da qualche hertz al centinaio di hertz.

Bibliografia

- [1] ICNIRP "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)", Health Physics, December 2010, Volume 99, No 6.
- [2] ICNIRP Statement "Guidance on Determining Compliance of Exposure to Pulsed Fields and Complex Non-Sinusoidal Waveforms below 100 kHz with ICNIRP Guidelines", Health Physics 84 (3): 383-387; 2003.
- [3] Jokela K., "Restricting exposure to pulsed and broadband magnetic fields, "Health Physics, vol. 79, n. 4, pp. 373-388 (2000).
- [4] Guofa Shou et Al. "MRI coil design using Boundary element Method Technique: A numerical calculation study", IEEE Trans. on MAG, Vol. 46, no. 4, pp. 1052-1059, 2010.
- [5] M. Capstick et al. Report on Project VT/2007/017 "An Investigation into Occupational Exposure to Electr. Fields for Personnel Working With and Around Medical MRI Equipment", 4 April 2008.
- [6] D. Giordano, M. Borsero, G. Crotti, M. Zucca "Dispositivi MRI ed esposizione professionale ai campi elettromagnetici", Tutto_Misure, n. 2, vol. XIII, pp. 263-266, 2011.
- [7] 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. on IM, Vol. 564, no. 2, pp. 300-304, 2007.
- [8] P. Mair, "Assessment of EMF (Electromagnetic fields) and biological effects in ARC welding applications", International Institute of Welding, Commission XII, Intermediate Meeting, Fronius International, Feb. 2005.