

Sviluppo e analisi di sensori e metodi di misura della corrente indotta nel corpo umano da campi elettromagnetici a radiofrequenza

S. Adda, L. Anglesio, G. d'Amore

(*) ARPA Piemonte – Dipartimento Subprovinciale di Ivrea, Via Jervis, 30, 10015 Ivrea (TO)
g.d'amore@arpa.piemonte.it

Abstract – In order to limit the Specific Absorption Rate in the ankles of a person exposed to an electric field at frequencies below 100 MHz, induced current limits are prescribed in international standards, such as ICNIRP guidelines. This paper analyses instruments and methods for RF induced foot current measurement, particularly pointing attention on testing a stand-on, foot-current meter realised in our laboratories and comparing its performances with a clamp-on commercial current probe. This was done by means of a measurement campaign with eight subjects exposed to electric fields generated by antennas in the FM broadcast band and by dielectric heaters at 27.12 MHz. We observed the influence of different parameters on the two measurement methods, finding that results from the two meters are comparable when the stand-on meter is used with an additional copper sheet (that improves grounding effect) and when the subject is bare-footed. In this situation, the clamp-on measurement/stand-on measurement rate is about 0.99 for FM frequencies and 0.84 for 27.12 MHz frequency, with a stronger agreement for lower field (and current) levels. The main difference between the meters response was found when the subject wore shoes, because of the impedance variation introduced by rubber soles.

Introduzione

La misura della corrente indotta nel corpo umano da campi elettromagnetici a radiofrequenza è un importante mezzo di valutazione dell'esposizione in quanto le correnti indotte che fluiscono verso i piedi sono correlate al SAR locale nelle caviglie (ove esso è più elevato che nel resto del corpo), ovvero al parametro che descrive l'assorbimento di energia nei tessuti. Per questi motivi alcuni standard radioprotezionistici, come le linee guida ICNIRP dell'aprile 1998 [1], definiscono livelli limite di corrente negli arti.

Il lavoro svolto è stato orientato allo sviluppo e caratterizzazione di un sensore di tipo stand-on per la misura delle correnti indotte, e al confronto delle sue prestazioni con quelle di un misuratore di tipo clamp-on. Tale confronto è stato svolto nell'ambito di una campagna di misure in ambiente esterno (siti radio-TV) e lavorativo con diverse tipologie di sorgenti di campo elettromagnetico nell'intervallo di frequenze da 30MHz a 110MHz circa. Questa attività ha inoltre permesso di analizzare i parametri che influiscono sulla rilevazione della corrente, anche nell'ottica di una standardizzazione dei metodi di misura.

Materiali e metodi

La strumentazione utilizzata per la misura delle correnti indotte è costituita da 2 misuratori: uno di tipo stand-on messo a punto presso il nostro laboratorio e un sensore commerciale di tipo clamp-on. Essi utilizzano due differenti metodi di rilevazione della corrente che fluisce attraverso le caviglie: lo stand-on misura la corrente che si scarica, attraverso i piedi, sul sensore, mentre il clamp-on misura la corrente indotta nella spira dalla corrente che fluisce attraverso la caviglia.

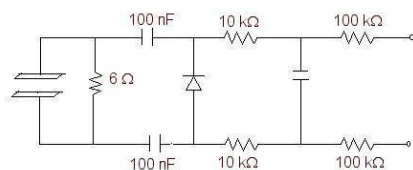


Figura 1. Rappresentazione schematica del circuito misuratore stand-on.

Il sensore di tipo stand-on è costituito da due piastre di rame (30X30) fatte aderire su uno strato di materiale plastico (polietilene); il circuito misuratore è costituito secondo lo schema seguente in figura 1: il carico inserito è una

resistenza di 6Ω e il circuito rivelatore utilizza un diodo per rilevare il picco del segnale generato.

Il sensore così costituito è stato calibrato in laboratorio iniettando sul circuito una corrente nota e rilevando la lettura effettuata dal sensore. Si è ottenuta una curva di calibrazione poi utilizzata per correggere i dati rilevati in campo.

L'output dello strumento può essere la lettura complessiva in banda larga oppure, attraverso la connessione ad un analizzatore di spettro, l'analisi delle componenti in frequenza della corrente. In questa fase del lavoro è stata testata la risposta in banda larga dello strumento con misurazioni in campo.

Il misuratore di tipo clamp-on (Holaday HI-3702) è invece costituito da un sensore (trasformatore di corrente con un nucleo di ferrite) collegato ad un amplificatore e quindi ad una rivelatore a termocoppia del valore quadratico medio (true RMS). Questo strumento permette la sola misura in banda larga del livello globale di corrente indotta.

L'analisi della risposta in campo del misuratore stand-on e il confronto tra le risposte dei due strumenti sono stati effettuati con procedure volte a valutare il peso del maggior numero possibile di parametri che possono influenzare la misura, in base ai principi sui quali essa è basata: sono state quindi effettuate rilevazioni in diversi siti, su differenti tipi di terreno, con diversi livelli di campo nell'intervallo di frequenza delle radio FM e a frequenze più basse in ambiente di lavoro, con diversi gradi di isolamento del soggetto dal terreno, per diversi soggetti (altezza e tipologia fisica), in punti differenti lungo la gamba per quanto riguarda il misuratore clamp-on.

Tali misure sono state anche volte a capire in quali condizioni di utilizzo dei due strumenti i risultati sono confrontabili e ripetibili, ed eventuali differenze nella risposta legate ai due diversi principi di funzionamento.

A tale fine, si è svolta una campagna di misure su 8 soggetti con altezze e tipologie fisiche differenti in 4 diversi siti con emittenti radio e televisive e in una ditta che utilizza saldatrici a 27.12 MHz per la saldatura di teloni per tensostrutture.

Risultati

Vengono analizzate di seguito alcune tra le prove effettuate, in particolare per tre parametri che si sono rivelati importanti per evidenziare le problematiche legate alle due tipologie di misura: il tipo di terreno sul quale viene effettuata la misura, l'impedenza del soggetto verso terra e le caratteristiche morfologiche del soggetto.

Tipo di terreno

Nell'utilizzo del clamp-on con soggetto posizionato scalzo sul terreno, si è osservata una deviazione standard del 10% tra le misure su 6 tipi di fondo (erba, granito, ghiaietta, due tipi di asfalto, terra). Un risultato molto simile si ha utilizzando lo stand-on appoggiato su una piastra di rame secondaria di dimensioni 90cm X 90cm: la deviazione standard risulta pari al 12% circa. Questi risultati suggeriscono l'indipendenza della misura dal tipo di terreno su cui ci si trova, a patto che l'utilizzo dello stand-on sia associato a quello della piastra secondaria. Tale piastra garantisce infatti la messa a terra corretta della piastra inferiore del sensore, condizione fondamentale dato che lo stand-on ricava il valore della corrente valutando la differenza di potenziale che cade sull'impedenza nell'ipotesi che la piastra inferiore si trovi a terra. Se non viene utilizzata la piastra secondaria, la messa a terra del sensore varia, sostanzialmente al variare della rugosità del fondo su cui esso è appoggiato: ne deriva una variabilità di oltre l'80% della corrente misurata per i diversi terreni.

Impedenza del soggetto verso terra

Un altro fattore che può provocare discordanza nei risultati è l'impedenza del soggetto verso terra: al variare di tale parametro varia infatti l'accoppiamento del corpo con il campo, e

quindi variano l'intensità e la distribuzione della corrente indotta [2] - [3]. Dato il diverso principio di funzionamento dei due strumenti, si è cercato di verificare se tale effetto fosse rilevabile con questi sistemi di misura e se venissero introdotte variazioni fittizie legate al sensore. La presenza di scarpe con soles in gomma ai piedi del soggetto introduce nel circuito equivalente una capacità piuttosto elevata (calcolando $C = \epsilon (S/d)$ con ϵ_{gomma} circa 3F/m si ottiene una capacità dell'ordine di qualche centesimo di Farad) che si viene a trovare a monte del sensore stand-on e a valle del clamp-on. Al fine di analizzare l'influenza di questo parametro sono state effettuate prove sui diversi soggetti a piedi nudi e con le scarpe con suola in gomma, utilizzando la piastra secondaria nel caso dello stand-on. Per quest'ultimo, si è osservata una variabilità media tra la misura a piedi nudi e la misura con scarpe che, a causa delle diverse tipologie di soles, varia dal 25% al 60%; per il misuratore clamp-on, si è trovata una variabilità decisamente inferiore, con valori tra il 3% e il 10%. Nella figura 2 si leggono i rapporti R tra i livelli misurati con e senza scarpe per entrambi gli strumenti in 6 diversi punti di misura. Si osserva come la risposta del clamp-on non sia sostanzialmente influenzata dalla variazione nella messa terra del soggetto, mentre un'influenza notevole si ha per lo stand-on.

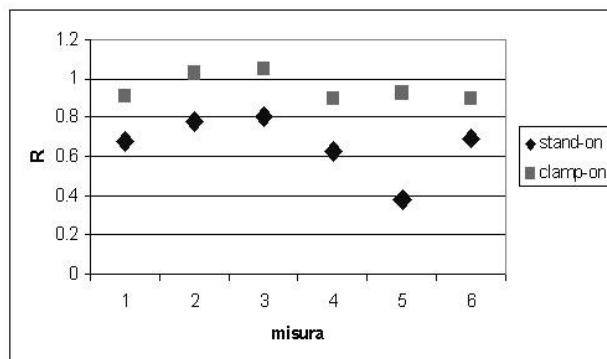


Figura 2. Rapporto tra le misure effettuate in presenza e in assenza delle scarpe con i due misuratori.

Il misuratore clamp-on si trova invece a rilevare, per induzione, la corrente che effettivamente fluisce attraverso la caviglia: se l'impedenza di carico del sensore è abbastanza elevata, esso si accoppia con il soggetto in modo quasi totalmente indipendente dalla sua impedenza verso terra.

Morfologia del soggetto

Si è osservata una forte dipendenza del valore di corrente misurato (con entrambi gli strumenti) dall'altezza dell'individuo in analisi. Avendo effettuato le rilevazioni su 7 soggetti di altezza tra 164 e 178 cm a parità di condizioni di esposizione (nello stesso punto) si è trovata una variabilità massima del 42% con il misuratore clamp-on e del 32% con lo stand-on.

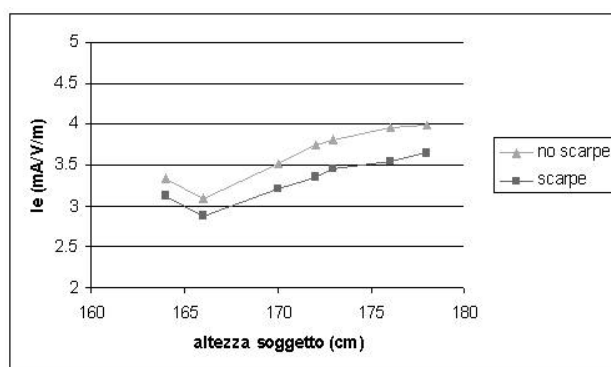


Figura 3. Variazione della corrente specifica con l'altezza del soggetto (misure con sensore clamp-on)

La diversa risposta dei due sensori a parità di impedenza del soggetto verso terra è presumibilmente legata al diverso meccanismo di rivelazione. Infatti il sensore stand-on si trova in serie alla capacità dovuta alla suola, la cui impedenza è molto maggiore di quella di carico del sensore: la generazione di correnti di spostamento non rivelate dal sensore è alla base della spiccata diminuzione del valore di corrente misurato. Il

clamp-on si trova invece a rilevare, per induzione, la corrente che effettivamente fluisce attraverso la caviglia: se l'impedenza di carico del sensore è abbastanza elevata, esso si accoppia con il soggetto in modo quasi totalmente indipendente dalla sua impedenza verso terra. Nell'effettuare le misurazioni su più punti, variando quindi le condizioni di esposizione, si è osservato che mediamente per le persone più basse il livello rilevato è effettivamente inferiore a quello dei soggetti più alti, ma il livello minimo non corrisponde in tutti i punti alla persona più bassa. Presumibilmente, entrano in gioco altri fattori morfologici [4], oltre al fatto che, variando le componenti in frequenza del campo, varia anche la lunghezza

di risonanza.

Nella figura 3 sono riportati i valori per ciascun soggetto calcolati come media di misure in diversi punti con il sensore clamp-on. Si è voluto vedere se la variazione nell'impedenza del soggetto verso terra influisse sull'andamento della curva corrente-altezza, ma si può osservare come le due curve siano sovrapponibili, salvo per i livelli leggermente più bassi rilevati in presenza delle scarpe.

Oltre alla valutazione dei parametri sopra esposti, sono stati effettuati altri test sui due strumenti, per stabilire la ripetibilità e la confrontabilità delle misure nelle condizioni più stabili di utilizzo dello stand-on (soggetto scalzo e uso della piastra secondaria). Si è osservato innanzitutto che per uno stesso soggetto in condizioni diverse di esposizione a campi nella banda FM (6 punti di misura) il valore di corrente specifica non varia molto (clamp-on: deviazione standard circa 8%; stand-on: circa 10%); una stabilità simile si trova anche nel caso delle correnti indotte emissioni delle saldatrici a RF (27.12 MHz), per le quali la corrente specifica si attesta su valori più bassi che per le radio (circa il 60% in meno) [5]. In entrambe le situazioni si è osservata una buona concordanza dei dati rilevati dai due strumenti in particolare in presenza di livelli di campo elettrico non elevati (entro i 15 V/m per le frequenze FM, fino a 30 V/m per le saldatrici), mentre per livelli di campo più elevati si nota un aumento del disaccordo, che rimane, per i livelli testati, entro il 30%.

Conclusioni

Dalla valutazione dei due sistemi di misura effettuata durante questo lavoro è emerso che i valori di corrente misurati in diverse situazioni espositive sono confrontabili e ripetibili, anche se il misuratore stand-on è soggetto a maggiori instabilità nella risposta rispetto al clamp-on (con la precauzione di utilizzare quest'ultimo tenendolo perpendicolare alla caviglia). In particolare, affinché i dati possano essere confrontabili, lo stand-on deve essere utilizzato con una piastra di rame secondaria che garantisca una buona messa a terra e con i soggetti scalzi. Anche in questa situazione, rimane comunque una variabilità nella risposta leggermente superiore a quella del clamp-on, anche in relazione all'aderenza del piede alla piastra (e quindi alla postura tenuta dal soggetto durante la misura).

Lo stand-on verrà comunque utilizzato, con i criteri sopra stabiliti, per poter effettuare l'analisi in frequenza delle correnti, e insieme al clamp-on al fine di definire procedure per la standardizzazione della misura.

Bibliografia

- [1] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300GHz)", *Health Physics*, vol. 74, n. 4, pp. 494-522, 1998.
- [2] K. Jokela, L. Puranen, Om P. Gandhi: "Radio Frequency currents induced in the human body for medium-frequency/high-frequency broadcast antennas", *Health Physics*, vol. 66, n. 3, pp. 237-244, 1994.
- [3] V. Anderson, K.H. Joyner: "Measurement of RF induced ankle currents", *Proceedings of the 1992 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory*, pp. 327-329, 1992.
- [4] A.H.J. Fleming, V. Lubinas: "Differences in RFR induced ankle currents due to body shape", *Proceedings of the 1992 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory*, pp. 330-332, 1992
- [5] Om P. Gandhi, D. Wu, J-Y Chen, D.L. Conover: "Induced currents and SAR distributions for a worker model exposed to an RF dielectric heater under simulated workplace conditions", *Health Physics*, vol. 72, n. 2, pp. 236-242, 1997.