IDENTIFICAZIONE DI DIFETTI IN MEZZI CONDUTTORI TRAMITE ISPEZIONE MULTI-FREQUENZA A CORRENTI INDOTTE

P. Burrascano[1], *E. Cardelli*[1], *A. Faba*[1], *A. Pirani*[1], *M. Ricci*[1], *R. Specogna*[2], *A. Tamburrino*[3], *F. Trevisan*[2], *S. Ventre*[3]

[1] Dipartimento di Ingegneria Industriale, Polo Scientifico Didattico di Terni
Università degli Studi di Perugia
Via Pentima Bassa 21, Terni 05100

[2] Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Gestionale e Meccanica
Università degli Studi di Udine
Via delle Scienze 208, Udine 33100

[3] Ass EURATOM/ENEA/CREATE, DAEIMI
Università degli Studi di Cassino,
Via G Di Biasio 43, Cassino 03043

Le tecniche di diagnostica elettromagnetica non distruttiva a correnti indotte sono al giorno d'oggi comunemente applicate in varie branche dell'ingegneria allo scopo di rilevare difetti superficiali e sub-superficiali in materiali conduttori. In questo contesto le Unità di Cassino, Perugia e Udine hanno sviluppato una procedura di inversione deterministica che permette l'identificazione della distribuzione di conducibilità elettrica della struttura in esame attraverso l'elaborazione di dati sperimentali e di dati numerici ottenuti tramite simulazioni al calcolatore. La ricostruzione del profilo di conducibilità di un campione consente poi di valutare la natura di eventuali difetti e la loro rilevanza nel funzionamento dell'oggetto stesso. Tale procedura di inversione è stata testata su dati sintetici corrotti da rumore, come prova preliminare in vista di un'applicazione sperimentale diretta.

La struttura metallica in esame viene modellata con un'opportuna griglia di "cubetti" elementari, detti voxel: all'interno del singolo voxel la conducibilità elettrica è considerata costante (ed incognita). Fissata una griglia regolare di posizioni di misura disposte sulla superficie accessibile dell'oggetto, si procede all'eccitazione di una bobina con una corrente sinusoidale nota e quindi alla misura della tensione ai suoi capi. La scansione viene ripetuta per un determinato numero di frequenze di eccitazione, così da incrementare il numero di dati da invertire e allo stesso tempo aumentare la risoluzione nella direzione perpendicolare al piano di scansione. Il problema inverso consiste nella stima della distribuzione della conducibilità dei voxel, a partire dalla conoscenza di opportune misure sperimentali della tensione indotta ai capi della bobina nelle varie posizioni ed a varie frequenze. Questo problema è intrinsecamente non lineare e mal posto; la procedura di risoluzione proposta consiste nel combinare il metodo iterativo di Gauss-Newton (GN) [1] con una regolarizzazione di tipo Total Variation (TV) [2]. In particolare la regolarizzazione TV viene applicata ad ogni iterazione GN e non al funzionale di errore complessivo come di consueto [3]. Il metodo GN comporta l'aggiornamento della soluzione per linearizzazioni successive, effettuate nell'intorno della stima precedente. La procedura di inversione è dunque di tipo deterministico, e si basa sul calcolo della matrice di Sensitività, i cui termini indicano come varia la tensione ai capi della bobina al variare della conducibilità del singolo voxel nelle varie posizioni di misura. La regolarizzazione TV è invece basata sul calcolo della norma L^1 delle derivate, quindi risulta particolarmente adatta per la ricostruzione di immagini costanti a

tratti ("blocky"), come nel nostro caso in cui eventuali difetti sono approssimati da un numero definito di voxel. Una volta individuata la procedura d'inversione più adatta al problema in studio, l'attività di ricerca si è in particolare focalizzata su due problematiche principali [3]:

1. l'ottimizzazione della velocità e dell'accuratezza del solutore numerico impiegato ad ogni iterazione GN per risolvere il corrispondente problema diretto (i.e. stima della risposta del sistema, nota la distribuzione di conducibilità aggiornata);
2. la scelta ottimale del valore del parametro di regolarizzazione α.

Per quanto riguarda il primo punto, le Unità di Cassino e di Udine hanno sviluppato in maniera indipendente due solutori numerici [4]. Il modello numerico dell'Unità di Cassino si basa su una formulazione integrale, che permette la discretizzazione del conduttore limitatamente alla regione prossima al difetto. Il modello numerico dell'Unità di Udine, invece, utilizza una formulazione geometrica discreta ("A-χ cell method"), che permette la costruzione di un sistema algebrico di equazioni che combina insieme le leggi fisiche dell'elettromagnetismo riformulate a partire da nozioni topologiche, e le relazioni costitutive che vengono approssimate in maniera geometrica sulla griglia specificata.

Per quanto riguarda invece il secondo punto, si è provveduto alla definizione di un criterio euristico per la scelta automatica del parametro di regolarizzazione, α, ad ogni iterazione del metodo GN: con riferimento alla grandezza α_{eq}, cioè al valore di α che bilancia il termine di discrepanza sui dati e il termine di regolarizzazione TV, viene definito un intervallo molto ristretto di valori di α su cui viene eseguita una ricerca di minimo globale del funzionale di errore corrente (Figura 1).

La Figura 2 illustra un esempio di identificazione, per una piastra di alluminio ($\sigma = 37.7 \cdot 10^7$ [S/m]) di spessore 3mm, con una griglia uniforme di $14 \times 14 \times 3$ voxel di lato 1mm. La prima colonna riporta la distribuzione esatta, le colonne successive le distribuzioni ricostruite con vari livelli di rumore ε (con: ε = rapporto fra l'ampiezza massima del rumore e il valore assoluto della tensione della bobina in aria).

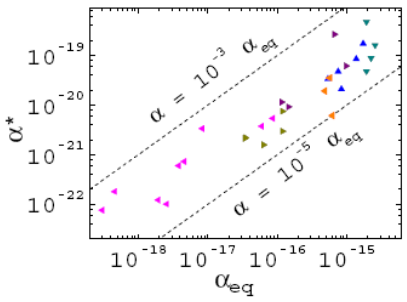

Fig.1 Grafico del valore ottimale α^* vs. α_{eq}: ogni colore di riferisce ad una differente configurazione (tipo di difetto, livello di rumore).

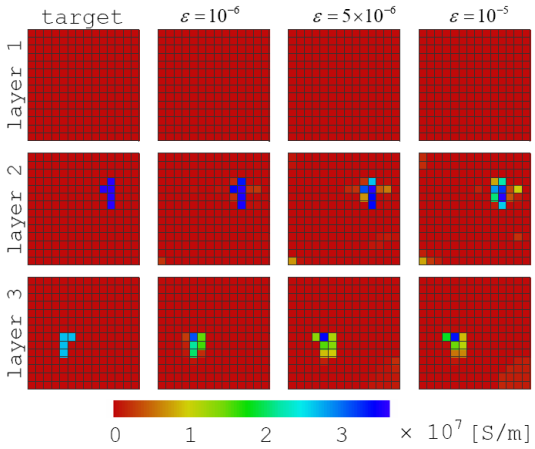

Fig.2 Esempio di distribuzioni di conducibilità ricostruite.

Bibliografia

[1] Qi-Nian J 2000, Math. Comput., vol. 69, pp. 1603–23

[2] Vogel C R 2002 *Computational Methods for Inverse Problems,* SIAM: Frontiers in Applied Mathematics vol 23.

[3] Pirani A, Ricci M, Specogna R, Tamburrino A, Trevisan F, *Inverse Problems* **24,** 035011 (2008).

[4] Cardelli E, Faba A, Specogna R, Tamburrino A, Trevisan F, Ventre S *IEEE Trans. Magn.* **41,** 1380–3 (2005).