

# ANALISI ELETTROMAGNETICA DEI CAVI SUPERCONDUTTORI MULTIFILAMENTARI PER LE MACCHINE DA FUSIONE

*F. Bellina<sup>(1)</sup>, M. Breschi<sup>(2)</sup>, P. L. Ribani<sup>(2)</sup>*

(1) Università di Udine, Dipartimento di Ingegneria Elettrica, Gestionale e Meccanica  
Via Delle Scienze, 108, Udine

(2) Università di Bologna, Dipartimento di Ingegneria Elettrica  
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

Le attività descritte nella presente memoria si inquadrano in una pluriennale collaborazione tra ricercatori delle Unità di Bologna e di Udine. Questa collaborazione ha portato allo sviluppo di alcuni modelli elettromagnetici dei cavi superconduttori armati utilizzati per la realizzazione dei magneti per la fusione nucleare a confinamento magnetico. Tali modelli sono stati, tra l'altro, punto di partenza per lo sviluppo del codice THELMA. Caratteristica comune a queste attività è il forte collegamento con le attività sperimentali portate avanti in diversi laboratori in sede internazionale. Il confronto con i dati sperimentali consente una continua verifica dei modelli e permette interpretazioni innovative dei risultati stessi. Nel seguito si riporta una breve descrizione di tali attività, che spaziano dall'analisi a livello dei magneti e dei campioni di cavo, ai loro componenti, fino a livello dei singoli fili che formano i cavi. In tali analisi si risolve prevalentemente il problema elettromagnetico diretto in regime variabile quasi-stazionario non lineare, considerando spesso il problema accoppiato con il problema termoidraulico.

Un importante settore di ricerca attualmente in corso riguarda la diagnostica elettromagnetica sulle giunzioni dei magneti in  $Nb_3Sn$ , che si prevede siano formati da strati indipendenti di spire individualmente completati e successivamente assemblati per mezzo di giunzioni resistive. Ogni terminazione, che porta una corrente dai 30 ai 70 kA, è tipicamente formata da una cuffia in rame in contatto con i fili del cavo e saldata a tenuta di vuoto all'armatura del cavo. Per unire i vari strati del magnete, queste terminazioni vengono brasate tra loro mediante elementi in rame intermedi. L'affidabilità di tali giunzioni deve essere massima, anche per evitare eccessive dissipazioni resistive che comporterebbero un sovraccarico inaccettabile per il sistema criogenico. E' pertanto essenziale controllare in modo non distruttivo le terminazioni dei vari strati e le loro giunzioni, che potrebbero essere compromesse da contaminazioni locali delle superfici da brasare o errori geometrici. Per questo sono stati proposti diversi metodi di controllo basati sugli ultrasuoni o su tecniche termografiche. Tuttavia, la natura e la composizione degli oggetti da verificare rende molto difficile applicare direttamente tali metodi e prevederne in dettaglio il funzionamento.

Mediante un modello dettagliato di una terminazione sottoposta ad un campo magnetico sinusoidale a bassa frequenza, si è dimostrato che alcuni tipi di difetti delle superfici di contatto, anche se non comportano cambiamenti apprezzabili di campo fuori della terminazione, possono alterare in modo significativo il campo misurato lungo il canale di raffreddamento interno alla giunzione stessa. Nelle terminazioni reali tali misurazioni potrebbero essere effettuate mediante micro sonde di Hall che scandiscono automaticamente il canale di raffreddamento e forniscono la distribuzione delle tre componenti del campo.

Un altro settore dell'analisi riguarda le prestazioni dei cavi superconduttori per gli avvolgimenti di campo toroidale e poloidale di ITER. A tale scopo, il codice THELMA viene

utilizzato per la modellazione degli esperimenti svolti con campioni di cavo, svolgendo un confronto dettagliato tra risultati del modello e misure. La valutazione riguarda innanzitutto i parametri nominali del cavo, quali la temperatura di *current sharing*, la potenza dissipata in regime variabile e la minima energia che determina il *quench*. I modelli sviluppati comprendono per questo non solo gli aspetti elettromagnetici, ma anche termofluidodinamici. Tra i risultati di particolare interesse di quest'analisi figura la spiegazione della presenza di tensioni misurate lungo l'armatura esterna del cavo quando esso si trova ancora nello stato superconduttivo. Apparentemente, tali tensioni sarebbero indice dello sviluppo di una resistenza longitudinale nel cavo. Le analisi effettuate hanno invece dimostrato come esse siano l'effetto della ripartizione resistiva delle tensioni tra i fili superconduttivi del cavo ed hanno consentito di escludere altri fenomeni proposti in letteratura.

Sempre a livello del cavo, un altro aspetto riguarda gli effetti della distribuzione non uniforme della deformazione all'interno dei cavi superconduttori di Nb<sub>3</sub>Sn, materiale fragile e fortemente sensibile alla deformazione meccanica. Per queste analisi si usa il codice THELMA che ha in ingresso, oltre ai dati elettromagnetici, le mappe delle deformazioni dei fili del cavo, fornite da un codice appositamente sviluppato per lo studio meccanico dei cavi superconduttori presso il centro ECP (Ecole Centrale Polytechnique) di Parigi. Nel modello, ogni filo è soggetto a trazione e deformazione variabili lungo il cavo, con zone in cui si raggiungono valori di elevata compressione longitudinale (attorno a -0.9%). In tali regioni la deformazione del reticolo cristallino determina un notevole calo delle proprietà superconduttive locali, che causa il trasferimento della corrente ai fili adiacenti.

A livello del filo, l'attività di ricerca in corso riguarda ancora il Nb<sub>3</sub>Sn, in cui si è sperimentalmente evidenziata la rottura progressiva dei filamenti superconduttivi quando i fili sono sottoposti a trazione dovuta alla fabbricazione, a deformazione termica ed alle forze di Lorentz. Sono in corso studi sull'impatto che tale rottura ha sulle prestazioni del filo. Punto di partenza per tali analisi sono i valori di conduttanza elettrica tra i diversi filamenti o gruppi di gruppi di filamenti del filo, misurate presso i laboratori dell'ENEA di Frascati. Tali esperimenti sono modellati con uno specifico codice che considera il filo composto da sotto-elementi (filamenti elementari o gruppi di filamenti), creando un modello circuitale non lineare a parametri concentrati che fornisce i valori delle conduttanze tra i diversi sotto-elementi. Il modello rappresenta le rotture dei fili mediante alterazioni locali delle proprietà elettriche, per le quali viene assunta una distribuzione statistica con densità pari a quella misurata mediante indagini al microscopio elettronico effettuate presso i laboratori del NHMFL (National High Magnetic Field Laboratory).

## Bibliografia

- 1) M. Breschi, P. L. Ribani, F. Bellina, "Electromagnetic Analysis of the Voltage-Temperature Characteristics of the ITER TF Conductor Samples", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19 (3), 2009, pp. 1512-1515.
- 2) M. Breschi, V. Corato, C. Fiamozzi Zignani, P. L. Ribani, "Analysis of Transverse Resistance Measurements in Superconducting Wires", *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2010 (pubblicato in forma elettronica, in via di pubblicazione cartacea).
- 3) L. Savoldi Richard, F. Bellina, M. Breschi, P. L. Ribani, F. Subba, R. Zanino, "Effects of Mass Flow Rate Imbalance Among Petals During Measurements of ITER TF Short Samples in SULTAN", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2010 (pubblicato in forma elettronica, in via di pubblicazione cartacea).
- 4) M. Breschi, D. Bessette, A. Devred, "Evaluation of Effective Strain and n-Value of ITER TF Conductor Samples", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 2010 (pubblicato in forma elettronica, in via di pubblicazione cartacea).
- 5) H. Bajas, D. Durville, D. Ciazynski, A. Devred, "Numerical Simulation of the Mechanical Behavior of ITER Cable-In-Conduit Conductors", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 20 (3), pp. 1467-1470.