

MODELLAZIONE ELETTROMAGNETICA DELLE PROVE DI QUALIFICAZIONE DEI CAVI SUPERCONDUTTORI PER ITER

Fabrizio Bellina¹, Marco Breschi², Pier Luigi Ribani²

1: Dipartimento di Ingegneria Elettrica,
Gestionale e Meccanica,
Università di Udine,
Via delle Scienze 208, 33100 Udine.

2: Dipartimento di Ingegneria Elettrica,
Università di Bologna,
Viale Risorgimento, 2, 40136 Bologna.

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) sarà il prototipo di reattore nucleare a fusione basato sul confinamento magnetico del plasma. Esso sta per essere costruito presso il sito francese di Cadarache.

L'intenso campo magnetico necessario a confinare la corrente di plasma sarà generato da una serie di avvolgimenti formati da bobine realizzate con un cavo superconduttivo del tipo CIC (Cable in Conduit) [1]. Tale cavo viene realizzato per mezzo di torsioni successive di fili e trefoli di dimensioni via via crescenti, fino a superare il migliaio di fili. Ciascun filo, a sua volta, consiste in una matrice di rame che incorpora migliaia di filamenti elementari di materiale superconduttore (NbTi o Nb₃Sn) aventi pochi micron di diametro. Il condotto in acciaio che circonda il cavo ha funzione sia strutturale, trasferendo le intense forze elettrodinamiche alla struttura meccanica della macchina, che termica, costituendo un canale in cui viene fatto scorrere l'elio liquido per il raffreddamento.

Per il livello di prestazioni e l'affidabilità della macchina risulta cruciale garantire la qualità del cavo superconduttivo mediante prove di accettazione effettuate su campioni ottenuti dalla linea di produzione. Obiettivo di queste prove è verificare l'assenza di transizione resistiva nel cavo nelle condizioni di lavoro, convenzionalmente stabilita quando lungo il cavo si sviluppa un campo elettrico superiore ad un prefissato valore critico, pari a 10 $\mu\text{V/m}$.

Il tipico campione di cavo è formato da due tratti rettilinei, lunghi ciascuno circa 3 metri, affiancati e collegati in serie mediante una giunzione intermedia non superconduttiva. Opportune terminazioni collegano poi questo campione al circuito di alimentazione. Le prove vengono effettuate con l'impianto SULTAN, in funzione presso il Paul Scherrer Institut di Villigen (Svizzera) [2].

Le principali prove elettriche a cui viene sottoposto il cavo sono quelle di *corrente critica* (I_c) e di *temperatura di current-sharing* (T_{cs}), entrambe effettuate alimentando il campione in presenza di un intenso campo magnetico. Nel caso della misura di I_c il cavo si trova a temperatura costante mentre la sua corrente viene fatta crescere a rampa fino allo raggiungimento del campo critico. Nel caso della misura di T_{cs} il cavo è alimentato da una corrente costante mentre la sua temperatura viene fatta crescere riscaldando l'elio.

Durante queste prove è impossibile eseguire misurazioni di corrente e di tensione nei fili all'interno dell'armatura e gli unici dati misurabili sono, oltre alla corrente di prova ed alla tensione ai morsetti del campione, una serie di segnali di tensione e di temperatura prelevati in punti opportuni della superficie esterna del condotto. E' sulla base di questi segnali che si deve stabilire il livello di prestazioni del cavo e capire le eventuali ragioni del suo malfunzionamento.

Un modello elettromagnetico dettagliato del campione, che descriva non solo il comportamento del cavo ma anche del condotto è quindi estremamente utile per predire i segnali misurati sia in condizioni normali che in presenza di difetti. Attualmente esistono un

certo numero di codici di calcolo che trattano il cavo in modo più o meno dettagliato. Tra essi il codice THELMA, che è stato sviluppato congiuntamente dalle Università di Bologna ed Udine e dal Politecnico di Torino, tratta i problemi elettromagnetico e termoidraulico accoppiati e modella dettagliatamente anche le giunzioni resistive tra cavi, fonte di disuniformità di corrente tra i fili del cavo [3] [4]. THELMA è stato estesamente utilizzato per l'analisi dei risultati sperimentali finora ottenuti da campioni di cavo. Poiché in alcuni casi si è dimostrata una notevole influenza del condotto sui segnali di tensione [5], il codice è stato recentemente potenziato con un modello elettromagnetico che descrive il condotto in acciaio [6]. Tale modello ha consentito di interpretare correttamente tutta una serie di caratteristiche dei segnali, inizialmente attribuite al superconduttore e rivelatisi invece conseguenza della configurazione delle misure adottata. L'applicazione del modello indica che nel condotto non sono presenti forti correnti, ma l'elevata resistività del materiale, la distribuzione complessa dei contatti tra i fili superconduttori ed il condotto e la eventuale presenza di tensioni indotte fa sì che la distribuzione delle tensioni sulla superficie esterna del condotto possa essere notevolmente diversa da quella lungo i fili del cavo.

Attualmente è in corso un'estesa attività di modellazione dei vari campioni, con un confronto con i risultati sperimentali.

- [1] N. Mitchell, "Quality control in the design, fabrication and operation of the ITER magnets", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 81, pp. 2325-2339, (2006).
- [2] A.M. Fuchs, B. Blau, P. Bruzzone, G. Vecsey, M. Vogel, "Facility status and results on ITER full-size conductor tests in SULTAN", *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, Vol. 11, pp. 2022-2025, (2001).
- [3] R. Zanino, M. Bagnasco, F. Bellina, P. Gislou, P.L. Ribani and L. Savoldi Richard, "Modeling AC losses in the ITER NbTi poloidal field full size joint sample (PF-FSJS) using the THELMA code", *Fusion Engineering and Design*, Vol. 75-79, pp. 23(27), (2005).
- [4] F. Bellina, P. Bettini, and F. Trevisan, "Electromagnetic analysis of superconducting cables and joints in transient regime", *IEEE Trans Appl. Supercond.*, Vol. 14, no. 2, pp. 1356-1359, (2004).
- [5] Y. Ilyin, A. Nijhuis and H.H.J. Ten Kate, "Interpretation of conduit voltage measurements on the poloidal field insert sample using the CUDI-CICC numerical code", *Cryogenics*, Vol. 46, pp. 517-529, (2006).
- [6] M. Breschi and P.L. Ribani, "Electromagnetic Modeling of the Jacket in Cable-in-Conduit Conductors", *IEEE Trans Appl. Supercond.*, Vol. 18, no. 1, pp. 18-28, (2008).