

# MAPPE DI STABILITA' ELETTRO-TERMICA DEI MAGNETI SUPERCONDUTTORI PER IL PROGETTO LHC

M. Breschi

Dipartimento di Ingegneria dell'Energia Elettrica e dell'Informazione  
Università di Bologna  
Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

**Parole chiave: magneti superconduttori, quench, progetto LHC**

Il fascio di protoni in moto nella camera da vuoto dell'acceleratore circolare denominato Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra viene mantenuto sulla traiettoria nominale da magneti superconduttori in NbTi funzionanti alla temperatura dell'elio superfluido (1.9 K). Il campo di induzione magnetica generato all'interno di tali magneti presenta solitamente distorsioni (errori di campo), dovute principalmente a difetti geometrici e alle correnti indotte nei cavi superconduttori durante le fasi di carica e scarica degli stessi, caratterizzate da elevate costanti di tempo (dell'ordine di diverse ore) a causa della bassa resistenza del percorso di richiusura delle correnti. Tali errori di campo, unitamente a effetti dinamici del fascio di particelle circolanti nella macchina, determinano il distacco di alcune particelle dalla traiettoria nominale con conseguente urto delle stesse contro le pareti della camera da vuoto (beam losses). In tale urto si generano ulteriori fasci di particelle (particle shower, fenomeno illustrato in Fig. 1) che diffondendo all'interno del magnete depositano calore sui cavi superconduttori. Tale deposito può comportare un aumento di temperatura con conseguente riduzione della corrente critica del cavo al di sotto della corrente di trasporto, e la transizione del cavo dallo stato superconduttivo allo stato normale. Il calore dissipato per effetto Joule nella zona normale può determinare un'ulteriore espansione di tale regione che può arrestarsi in presenza di una refrigerazione adeguata che consenta di ripristinare lo stato superconduttivo (*recovery*) o proseguire indefinitamente in caso contrario, fino a rendere necessario l'intervento del sistema di protezione e la de-energizzazione del magnete (*quench*). La minima energia depositata capace di determinare una transizione irreversibile allo stato normale viene definita *Minimum Quench Energy (MQE)*; la velocità di propagazione della zona normale all'interno del magnete è indicata come *Normal Zone Propagation Velocity (NZPV)*.

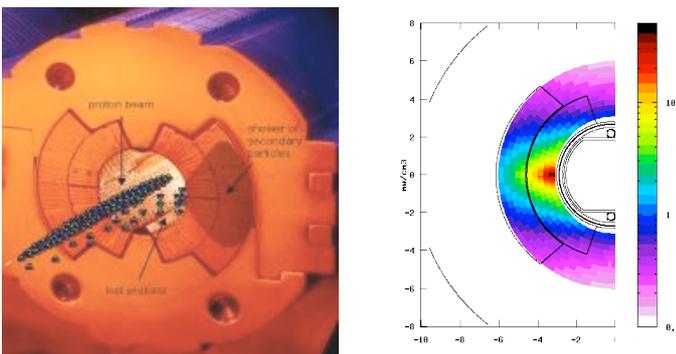


Fig. 1. Illustrazione delle perdite dal fascio di particelle e energia depositata per unità di volume sulla sezione del magnete.

Per evitare il quench dovuto alle perdite del fascio, di grave detrimento per il funzionamento della macchina, sono stati installati attorno all'acceleratore i Beam Loss Monitors (BLM), in grado di misurare l'andamento temporale delle perdite del fascio. L'efficienza dei BLM richiede una precisa conoscenza del massimo deposito di calore che i magneti possono sopportare senza transire allo stato normale.

In questa ricerca sono stati sviluppati dei modelli numerici 0-D e 1-D per indagare il comportamento elettrico e la termoidraulica dei cavi superconduttori sottoposti ad un impulso di energia. I meccanismi di scambio di calore che si verificano nel conduttore e tra il conduttore e il bagno di elio sono descritti considerando le diverse fasi del refrigerante, tramite un modello sviluppato sulla base di precedenti analisi sperimentali.

Lo studio ha condotto alla generazione di mappe di stabilità di quasi tutte le principali tipologie di magneti superconduttori di LHC. La dipendenza della MQE dalla corrente di trasporto e dal campo di induzione magnetica sulla sezione del magnete è stata analizzata in diverse condizioni operative, dalla fase di iniezione del fascio alle condizioni operative nominali. E' stato considerato un vasto spettro di disturbi, assumendo tempi di deposito di calore variabili dalla scala dei microsecondi fino al disturbo continuo, e lunghezze riscaldate variabili tra pochi millimetri e diversi metri di cavo. Un esempio di mappe di stabilità calcolate per diverse tipologie di magneti è presentato in Fig. 2 e Fig. 3 in corrispondenza di due diversi tempi di deposito del calore, rispettivamente 1  $\mu$ s e 1 s. Si può notare come la mappa di stabilità di modifichi al variare del tempo di disturbo. Ad esempio, per il quadrupolo principale, i cavi più sollecitati per disturbi brevi si trovano sullo strato interno del magnete, in cui il campo di induzione magnetica è più elevato (Fig. 2b), mentre per tempi lunghi i punti che presentano la più bassa energia di quench si trovano sullo strato esterno. Tale fenomeno è da attribuirsi al ruolo crescente assunto per tempi elevati dallo scambio termico con il bagno di elio superfluido, sito in prossimità dello strato esterno.

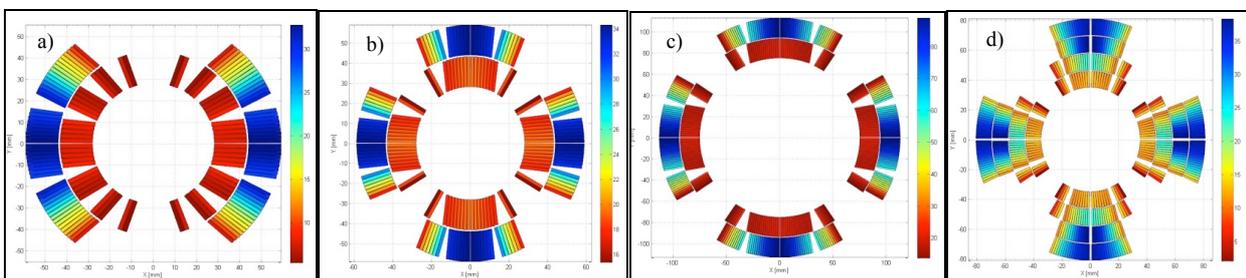


Fig. 2. Mappe della Minimum Quench Energy per un tempo di deposito di calore di 1  $\mu$ s per i magneti delle seguenti tipologie: Main Bending Dipoles MB (a), Main Quadrupoles MQ (b), MQXF (c) e MQXA (d).

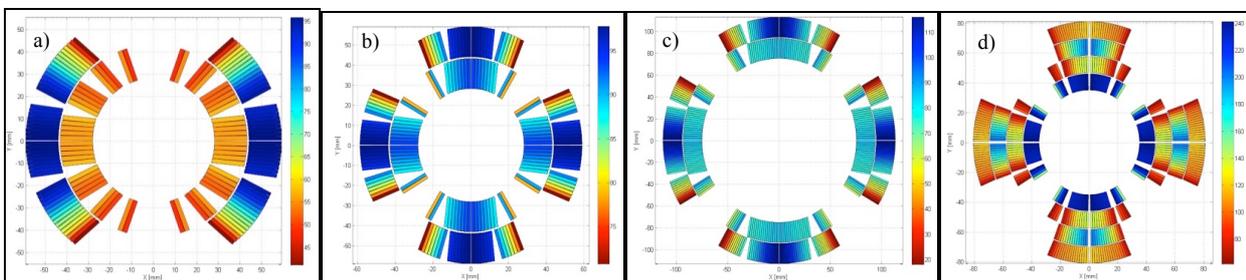


Fig. 3. Mappe della Minimum Quench Energy per un tempo di deposito di calore di 1 s per i magneti delle seguenti tipologie: Main Bending Dipoles MB (a), Main Quadrupoles MQ (b), MQXF (c) e MQXA (d).

I risultati ottenuti verranno utilizzati per migliorare il sistema di protezione della macchina LHC definendo soglie di intervento dei Beam Loss Monitors disposti sui diversi magneti che siano funzione dell'entità e della durata del disturbo termico dovuto alle perdite dal fascio di particelle.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] P. Granieri, E. Bergonzoni, L. Bottura, M. Breschi, L. S. Esposito, P. Galassi, M. Massimini, "Stability Maps of the LHC Superconducting Magnets", pubblicato nel libro degli abstract della Conferenza Internazionale sulla Magnet Technology, MT23, Boston, Stati Uniti, 2013.
- [2] P.P. Granieri, M. Calvi, D. Bocian, L. Bottura, M. Breschi, A. Siemko, "Stability Analysis of the LHC Cables for Transient Heat Depositions", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 18, n. 2, pp. 1257 – 1262, 2008.