

# ANALISI DI SENSITIVITÀ SUI PARAMETRI DEL PROCESSO DI MAGNETIZZAZIONE DEL CAMPO INTRAPPOLATO DA MAGNETI PERMANENTI SUPERCONDUTTIVI

*M. Fabbri, G. Mariani, A. Morandi, F. Negrini, P. L. Ribani*

Dipartimento di Ingegneria Elettrica - DIE  
Università di Bologna, Viale Risorgimento 2, 40136 Bologna

I recenti progressi nelle tecnologia di fabbricazione hanno consentito lo sviluppo di superconduttori massicci monocristallini di grandi dimensioni dotati di elevata corrente critica, in grado dunque di intrappolare, in modo quasi permanente, un campo magnetico di molto superiore a quello dei magneti permanenti convenzionali. La loro applicazione nel settore delle macchine elettriche è in grado di apportare considerevoli vantaggi. Tuttavia, affinché questi materiali possano trovare un largo utilizzo, è necessario mettere a punto un opportuno processo di magnetizzazione. Attualmente sono in uso tre tecniche per la magnetizzazione degli elementi superconduttori massicci: il raffreddamento sotto campo (field cooling, FC), la magnetizzazione lenta (zero field cooling, ZFC) e la magnetizzazione impulsata (pulsed field magnetization, PFM). Questa ultima tecnica risulta favorevole perché può essere ottenuta mediante piccoli avvolgimenti in rame, alimentati dalla scarica di un banco di condensatori, e può essere applicata quando il corpo da magnetizzare è già nella sua sede, facilitando così le operazioni di assemblaggio del dispositivo finale e il recupero di smagnetizzazioni indesiderate che possono verificarsi a causa del funzionamento anomalo del dispositivo. Tuttavia, a causa degli effetti termici, il campo intrappolabile mediante magnetizzazione impulsata è minore di quello ottenibile tramite le altre tecniche (a parità di campo applicato).

Il profilo e il valore massimo del campo intrappolato nonché la sua stabilità nel tempo, sono caratteristiche cruciali del magnete permanente superconduttivo perché possono condizionare le prestazioni del dispositivo a cui è destinato. Tali fattori dipendono molto dalla tecnica di magnetizzazione e dalla forma e la durata dell'impulso di campo applicato. In questa memoria si presentano i risultati dello studio della sensitività del campo intrappolato sui parametri del processo di magnetizzazione. I risultati presentati sono stati ottenuti attraverso un modello numerico la cui peculiarità è l'uso di una caratteristica **E-J** del superconduttore ottenuta combinando le relazioni tipicamente adoperate per lo studio dei regimi di *flux creep* e *flux flow* in modo da ottenere una caratteristica valida in tutto il range di valori che si verificano durante il processo analizzato. L'elemento superconduttivo considerato è una pastiglia di YBCO le cui dimensioni (diametro 300 mm e altezza 15 mm) sono di interesse per lo sviluppo del rotore di un motore sincrono a magneti permanenti superconduttivi.

Come termine di confronto si è calcolato innanzitutto il campo intrappolato mediante raffreddamento sotto campo che costituisce il massimo valore intrappolabile dall'elemento considerato. Tale campo risulta pari a 1.13 T per una temperatura di 77 K e 4.04 T per una temperatura di 65 K. Da questi valori si deduce che, alla temperatura di esercizio di 77 K, l'elemento superconduttivo non è competitivo rispetto ai magneti permanenti convenzionali in NdFeB delle stesse dimensioni, in grado di intrappolare campi pari a 1.2 T. Al contrario una notevole convenienza si riscontra alla temperatura di esercizio di 65 K. Per lo studio del campo intrappolato mediante magnetizzazione sotto campo e magnetizzazione impulsata si è considerato un impulso di campo applicato crescente con legge sinusoidale fino al valore di

picco  $B_p$  al tempo  $t_p$ . Successivamente il campo diminuisce seguendo la stessa legge fino al 95% del valore di picco e dopo decade seguendo un andamento esponenziale con costante di tempo pari a  $2t_p$ . attraverso tale forma d'onda si possono riprodurre, a seconda dei valori di  $t_p$ , gli andamenti del campo applicato tipici dei processi ZFC e PFM. La figura 1 mostra il profilo del campo intrappolato dopo due settimane per  $t_p = 250$  ms e diversi valori di  $B_p$ . Da essa si deduce che, per il dato  $t_p$ , il campo intrappolato è pari a quello (massimo) ottenibile mediante la tecnica FC per un valore di  $B_p$  del campo pari a 8.6 T. Valori inferiori di  $B_p$  danno luogo a campi intrappolati inferiori. La figura 2 mostra il profilo del campo intrappolato dopo due settimane per  $B_p = 7.6$  T e diversi valori di  $t_p$ . Dalle figure 1-2 si deduce che la combinazione di valori  $7.6 \text{ T} < B_p < 8.6 \text{ T}$  e  $250 \text{ ms} < t_p < 500 \text{ ms}$  consente il miglior utilizzo della pastiglia superconduttiva; tuttavia da esse non si deduce nessuna informazione sui comportamenti a lungo termine del profilo di campo intrappolato. La figura 3 mostra l'andamento nel tempo del profilo di campo intrappolato. Da essa si deduce che il campo intrappolato, inizialmente elevato, decade rapidamente subito dopo l'estinzione dell'impulso. Tuttavia dopo circa un'ora il profilo diviene stabile e non cambia sostanzialmente per tempi nell'ordine dell'anno. La figura 4 mostra l'andamento nel tempo del picco del campo intrappolato e del flusso magnetico sulla superficie della pastiglia. Dal confronto della figura 3 si osserva un cambio nel rate di decadimento del flusso che avviene quando il picco del campo raggiunge il centro della pastiglia (dopo circa 2 settimane) dando luogo ad un profilo conico simile a quello che si osserva nel caso di magnetizzazione in assenza di campo.

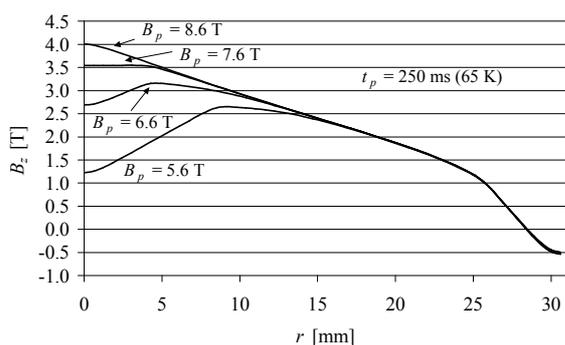


Fig. 1. Profilo di campo intrappolato dopo due settimane per  $t_p = 250$  ms a diversi valori di  $B_p$ .

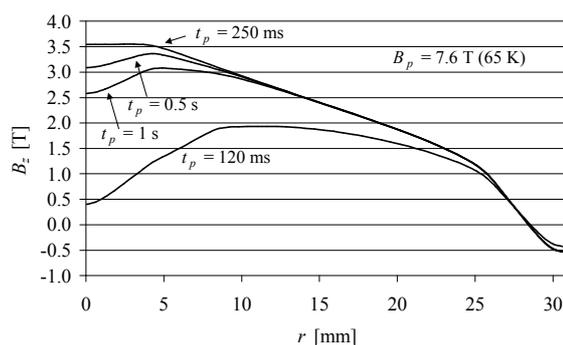


Fig. 2. Profilo di campo intrappolato dopo due settimane per  $B_p = 7.6$  T a diversi valori di  $t_p$ .

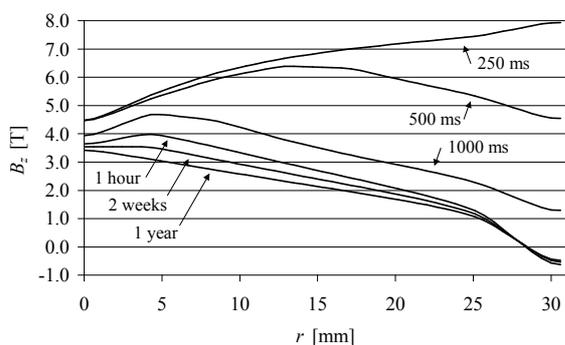


Fig. 3 Profilo di campo intrappolato per  $t_p = 250$  ms e  $B_p = 7.6$  T in funzione del tempo

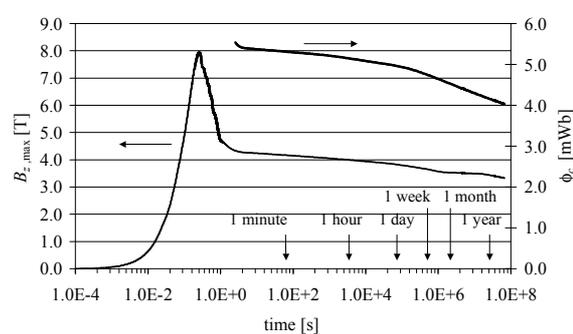


Fig. 4 andamento del picco di campo e del flusso intrappolato sulla superficie della pastiglia per  $t_p = 250$  ms e  $B_p = 7.6$  T.