

FORMULAZIONE CIRCUITALE DEL PROBLEMA ACCOPPIATO ELETTROMAGNETICO – TERMICO PER LA MODELLIZZAZIONE DI UN LIMITATORE DI CORRENTE SUPERCONDUTTIVO A NUCLEO SCHERMATO

Antonio Morandi, Massimo Fabbri, Francesco Negrini, Pier Luigi Ribani
Dipartimento di Ingegneria Elettrica - Università di Bologna

La crescente domanda di *power quality* nella fornitura di energia elettrica impone l'uso di reti di trasmissioni dotate di una ridotta impedenza interna ed un elevato grado di interconnessione e quindi caratterizzate da un elevato valore della corrente di corto circuito; tali reti risultano molto costose a causa del forte sovradimensionamento di tutti i componenti indispensabile per evitare danneggiamenti irreversibili in caso di guasto. La disponibilità di un dispositivo in grado di limitare efficacemente la corrente di corto circuito senza influenzare il sistema durante il funzionamento nominale riduce l'entità del sovradimensionamento necessario e rende possibile il compromesso tra la necessità tecnica di una rete forte (ad elevate potenza di corto circuito) e un costo sostenibile. Tra i dispositivi possibili, il limitatore di corrente superconduttivo (SFCL) a nucleo schermato risulta molto promettente perché presenta un'impedenza trascurabile in condizioni di normale funzionamento ed è in grado di transire immediatamente e affidabilmente verso uno stato ad alta impedenza in condizioni di guasto. Tale dispositivo è costituito da un avvolgimento in rame (posto in serie al circuito da proteggere) accoppiato con un anello superconduttivo attraverso un nucleo di materiale ferromagnetico

Un SFCL a nucleo schermato può essere inserito all'interno di una rete di potenza in numerose posizioni e a vari livelli di tensione. Le caratteristiche del dispositivo e i benefici da esso apportati dipendono fortemente dalla struttura del sistema e dal suo posizionamento. Uno studio completo dell'interazione limitatore/sistema può essere condotto mediante simulazione, introducendo, all'interno di un software dedicato all'analisi delle reti elettriche, un modello circuitale del dispositivo; tale modello può essere ottenuto a partire da una formulazione integrale del problema accoppiato elettromagnetico-termico che descrive lo SFCL. Una rete elettrica ed una rete termica vengono associate all'elemento superconduttivo dello SFCL e consentono il calcolo della distribuzione di corrente e della temperatura nel suo interno. Una rete magnetica viene associata al nucleo ferromagnetico per il calcolo degli effetti di magnetizzazione [1]. Le tre reti risultano accoppiate e la loro complessità dipende dal numero di elementi necessario per raggiungere la convergenza della soluzione numerica, che in genere è molto elevata. Tuttavia con riferimento solamente alla corrente e alla tensione ai capi del limitatore, che sono i parametri attraverso i quali il dispositivo "dialoga" col sistema nel quale è inserito, la convergenza si ottiene anche con discretizzazioni relativamente larghe, alle quali corrisponde un circuito equivalente sufficientemente semplice da poter essere esportato all'interno di un simulatore di sistema senza dover essere semplificato a spese della sua accuratezza. Un simile circuito, che non è basato su assunzioni *ad hoc* ma è derivato direttamente dalle equazioni che governano i fenomeni fisici all'interno del dispositivo, rappresenta un ragionevole compromesso tra la semplicità e l'accuratezza del modello del limitatore, e può essere impiegato nello studio della sua interazione col sistema, per valutare attendibilmente i benefici tecnici ed economici apportati ed ottenere indicazioni utili per la sua ottimizzazione.

La figura 1.a mostra (all'interno della linea tratteggiata) il circuito equivalente di un prototipo di SFCL a nucleo schermato disponibile presso il laboratorio di Superconduttività Applicata dell'Università di Bologna insieme con il circuito utilizzato per effettuare le prove di corto circuito. La rete magnetica non compare esplicitamente nel circuito equivalente in quanto si assume che durante il funzionamento il ferro operi nella regione lineare ed i suoi effetti sono incorporati all'interno dei coefficienti a auto e mutua induzione della rete elettrica; dato che il nucleo del limitatore considerato è costituito da una unica colonna, tale assunzione è giustificata e la sua validità è confermata dal confronto con i risultati sperimentali. I parametri del circuito equivalenti sono riportati nella tabella I.

La figura 2.a mostra l'andamento calcolato della corrente ai capi del limitatore durante una prova di corto circuito ed i valori sperimentali. La figura 2.b mostra l'andamento calcolato della temperatura all'interno dell'anello superconduttivo durante un guasto e nella successiva fase di recupero.

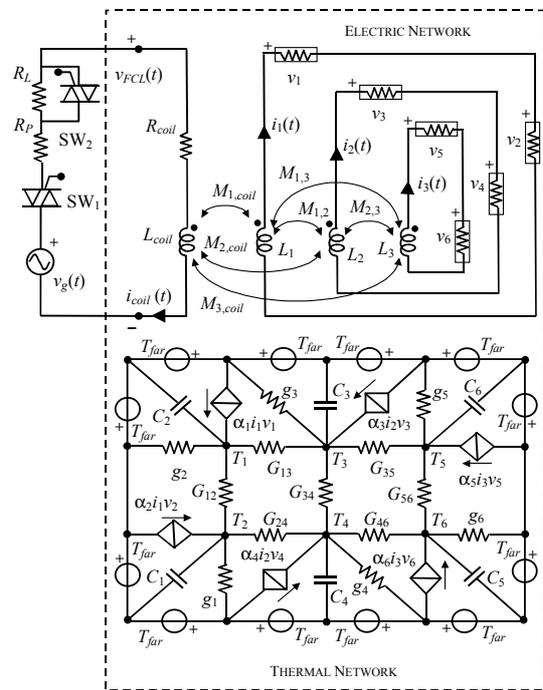


TABELLA I
RELAZIONI COSTITUTIVE DEI COMPONENTI DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

R_{coil}	0.3 Ω	T_{far}	77 K
$L_1 = L_3$	0.5224 μH	$g_1 = g_5$	223.2 mW/K
L_2	0.5254 μH	$g_2 = g_6$	203.5 mW/K
L_{coil}	28.00 mH	g_3	195.0 mW/K
$M_{1,2} = M_{2,3}$	0.4264 μH	g_4	177.7 mW/K
$M_{1,3}$	0.3670 μH	$G_{12} = G_{34} = G_{56}$	35.0 mW/K
$M_{1,coil} = M_{3,coil}$	-85.09 μH	$G_{13} = G_{35}$	2.96 mW/K
$M_{2,coil}$	-86.38 μH	$G_{24} = G_{46}$	2.70 mW/K
$v_k = \beta_k e(T_k) \cdot (\lambda i)^n(T_k)$		$C_k = a_k T - b_k$	
$\beta_1 = \beta_3 = \beta_5$	175.5 mm	$a_1 = a_3 = a_5$	570.9 $\mu\text{J}/\text{K}^2$
$\beta_2 = \beta_4 = \beta_6$	159.9 mm	$a_2 = a_4 = a_6$	520.4 $\mu\text{J}/\text{K}^2$
λ	1.2423 A^{-1}	$b_1 = b_3 = b_5$	2.6 mJ/K
$\alpha_1 = \alpha_3 = \alpha_5$	0.0833	$b_2 = b_4 = b_6$	2.4 mJ/K
$\alpha_2 = \alpha_4 = \alpha_6$	0.0834		

Figura 1.a - Circuito equivalente di un prototipo di SFCL a nucleo schermato

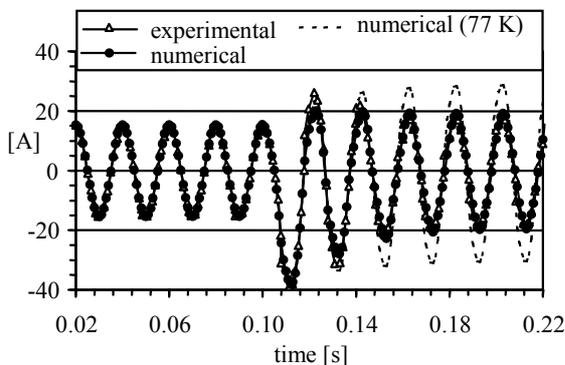


Figura 2.a

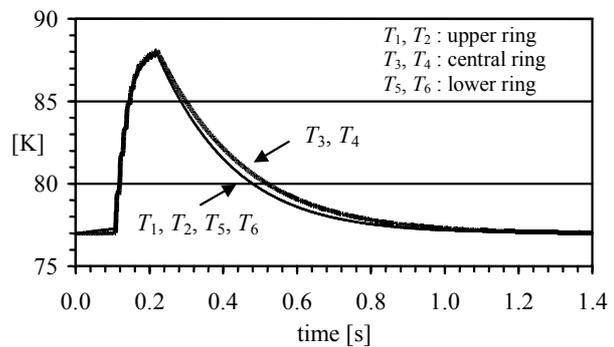


Figura 2.b

- [1] M. Fabbri, A. Morandi, F. Negrini, P.L. Ribani, "Temperature Dependent Equivalent Circuit of a Magnetic Shield Type Fault Current Limiter", accepted for publication on *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 2005.