

SINTESI OTTIMA DI MOTORI RICONFIGURABILI PER LA TRAZIONE ELETTRICA

Paolo Di Barba, Roberto Galdi e Maria Evelina Mognaschi

Dip. di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Università degli Studi di Pavia, Pavia,
Italia, {paolo.dibarba, roberto.galdi, eve.mognaschi}@unipv.it

I dispositivi riconfigurabili sono di fondamentale importanza in molte applicazioni e il loro progetto ottimo rappresenta un interessante ambito di ricerca. Di solito, infatti, il risultato di un processo di ottimizzazione multi-obiettivo è un insieme di soluzioni ottime secondo Pareto e il dispositivo corrispondente a una specifica soluzione ottimale si suppone non riconfigurabile. Questo significa che, se la forma, piuttosto che i materiali o il sistema di alimentazione vengono alterati, la configurazione aggiornata generalmente non è più ottimale. La sfida, quindi, consiste nello sviluppare un metodo ispirato all'ottimizzazione multi-obiettivo capace di generare una sequenza di configurazioni, ciascuna delle quali rappresenta il miglior compromesso tra i criteri progettuali assegnati, rispetto a un parametro variabile che indicizza variazioni di forma, materiale o alimentazione.

A tal proposito, si possono individuare tre ampie categorie di dispositivi riconfigurabili:

- meccanicamente riconfigurabili, quando la forma del dispositivo cambia durante il suo funzionamento (controllo della forma, ad esempio attuatori articolati in sistemi robotici);
- elettricamente riconfigurabili (ad esempio metamateriali per microonde, capaci di modificare le loro proprietà di radiazione in modo controllato e reversibile [1]);
- magneticamente riconfigurabili (ad esempio proprietà dei materiali in macchine a magneti permanenti).

La linea di ricerca oggetto di questa memoria si concentra sull'ultima classe e presenta un metodo originale per la sintesi di motori riconfigurabili, secondo un'interpretazione innovativa del concetto di ottimo paretiano.

Per quanto riguarda l'applicazione, ci si riferisce ai motori a magneti permanenti interni (IPM, *Interior Permanent-Magnet*), comunemente caratterizzati da elevata densità di coppia, alta densità di potenza ed elevata efficienza. Per questo, i motori IPM sono stati considerati buoni candidati per applicazioni di trazione elettrica ad elevate prestazioni. Il progetto di forma di un motore IPM [2] viene preso in considerazione come caso di studio: il modello ad elementi finiti è mostrato in Fig. 1a insieme alle cinque variabili di progetto che definiscono la geometria g del rotore. In Fig. 1b è mostrata una tipica mappa di campo magnetico [3].

Si definiscono le seguenti funzioni obiettivo:

- $f_1(\mathbf{g}, \lambda)$: valore medio della coppia motrice (T_r), da massimizzare;
- $f_2(\mathbf{g}, \lambda)$: valore massimo coppia di impuntamento (T_c), da minimizzare;

dove il parametro λ può indicizzare, ad esempio, una proprietà di materiale riconfigurabile. Infatti, poiché i magneti permanenti sono collocati all'interno del rotore, nei motori IPM le linee di campo eccitate dal magnete tendono a richiudersi attraverso il nucleo ferromagnetico del rotore, il che porta a una riduzione del flusso utile. Di conseguenza, la geometria del rotore ha un impatto significativo sulle prestazioni del motore.

Naturalmente, a causa dei numerosi criteri e vincoli che possono essere prescritti, il progetto di questa classe di motori è formulato come un problema di ottimizzazione multi-obiettivo.

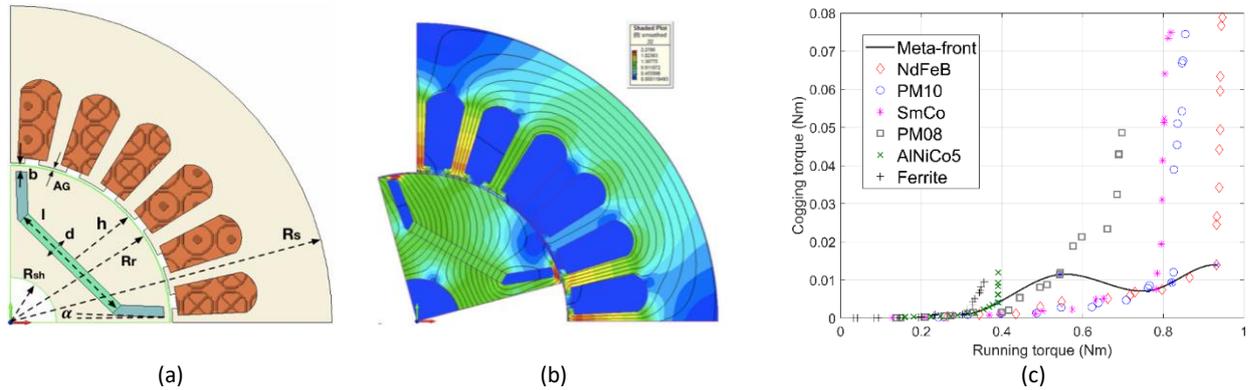


Figura 1 - Modello IPM a quattro poli: (a) variabili di progetto $g = (l, d, h, b, \alpha)$, (b) mappa di campo con posizione del rotore a 15° , (c) fronti di Pareto relativi a sei ottimizzazioni multi-obiettivo ottenuti con diversi materiali.

In Fig. 1c è mostrata una famiglia di sei fronti di Pareto, relativi a diversi materiali per i magneti permanenti: ciascun fronte è stato ottenuto mediante l’algoritmo di ottimizzazione NSGA-II (20 individui, 100 generazioni). I punti più vicini all’utopia di ciascun fronte e corrispondono ai punti ginocchio e appartengono al cosiddetto meta-fronte di Pareto.

Nella Tabella I sono riportati i valori delle variabili di progetto e delle funzioni obiettivo per i punti ginocchio dei fronti di Fig. 1c.

TABELLA I
SOLUZIONI DEL META-FRONTE DI PARETO

Materiale	x_1 d (mm)	x_2 l (mm)	x_3 b (mm)	x_4 h (mm)	x_5 α (deg)	f_1 T_r (Nm)	f_2 T_c (mNm)
NdFeB	3	22	0.5	8.2	1.68	-0.93	13.9
PM10	2.8	22	0.5	8	1.95	-0.82	9.3
SmCo	2.9	21.9	0.5	8	1.82	-0.78	7.5
PM08	2.4	21.4	1.1	10.6	3.42	-0.54	11.4
AlNiCo5	3	22	0.7	8.4	1.65	-0.39	4
Ferrite	2.4	22	0.5	8.3	3.25	-0.33	3.5

Da una prima analisi, è ragionevole affermare che per la classe di problemi considerata il meta-fronte identifica con buona approssimazione la stessa geometria ottimale, al variare di magneti permanenti caratterizzati da curve di smagnetizzazione diverse fra di loro. In altre parole, i punti ginocchio dei fronti nello spazio degli obiettivi tendono ad un’unica geometria nello spazio di progetto. Questa proprietà permetterebbe quindi di sintetizzare una classe di motori magneticamente riconfigurabili.

Bibliografia

- [1] S. Wu, J. Dai, Y. Chang, and R. R. Zhao, “Magnetically Actuated Reconfigurable Metamaterials as Conformal Electromagnetic Filters”, *Adv. Intell. Syst.*, 2022, 2200106, DOI: 10.1002/aisy.202200106.
- [2] P. Di Barba, M.E. Mognaschi, N. Rezaei, D.A. Lowther, and T. Rahman, “Many-objective shape optimisation of IPM motors for electric vehicle traction”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 60 (2019) S149–S162, DOI 10.3233/JAE-191113.
- [3] Simcenter Magnet, <https://plm.sw.siemens.com/it-IT/simcenter/electromagnetics-simulation/magnet/> last visited in December 2024.

Ringraziamenti

This work has been supported by the project “BaC-MPI2” in the frame of “Sustainable Mobility Center (Centro Nazionale per la Mobilità Sostenibile)” project CN00000023 – SPOKE 13 CUP D43C22001180001 and funded by the European Union – NextGenerationEU.