



Sviluppo di una Metodologia Analitico-Numerica per l'Analisi Strutturale dei Rotori di Motori Elettrici Sincroni a Magneti Permanenti Superficiali

Thursday 3 September 2026 10:15 (15 minutes)

I motori elettrici sincroni a magneti permanenti superficiali (Surface Permanent-Magnet Synchronous Motors, SPMSM) costituiscono oggi una soluzione di riferimento in molte applicazioni ad alte prestazioni, inclusa la trazione elettrica per veicoli, grazie ad elevata efficienza, alta densità di coppia e di potenza, compattezza e buone prestazioni dinamiche. Al tempo stesso, la collocazione dei magneti sul bordo esterno del rotore introduce criticità strutturali rilevanti: ai regimi elevati, le forze centrifughe tendono infatti a espellere radialmente i magneti, generando deformazioni nel rotore, nei magneti e negli eventuali strati adesivi, oltre a concentrazioni di tensione che possono compromettere sia l'integrità meccanica del sistema sia le prestazioni elettromagnetiche della macchina. Il presente lavoro ha quindi l'obiettivo di sviluppare una metodologia analitico-numerica per il calcolo strutturale di rotor SPMSM, capace di descrivere in modo affidabile tensioni e spostamenti, mantenendo al tempo stesso tempi di calcolo compatibili con un utilizzo in fase di progettazione preliminare.

La metodologia proposta nasce da una formulazione analitica sviluppata in ambiente Maple, basata sulla teoria dell'elasticità piana e sull'impiego della funzione di tensione di Airy. Il campo tensionale viene rappresentato mediante una base armonica in coordinate polari, dalla quale si ricavano sia le tensioni sia gli spostamenti. La formulazione completamente simbolica, pur rigorosa dal punto di vista teorico, risulta tuttavia molto onerosa dal punto di vista computazionale quando si introducono un numero elevato di armoniche e condizioni al contorno geometricamente complesse. Per questo motivo il modello è stato successivamente tradotto in MATLAB in forma semianalitica: la struttura teorica del problema, basata sulla funzione di tensione di Airy e sulla rappresentazione armonica dei campi tensionali e di spostamento, viene mantenuta in forma analitico-simbolica. L'imposizione delle condizioni al contorno sulla frontiera reale e la risoluzione del sistema risultante vengono invece trattate numericamente, mediante assemblaggio puntuale e soluzione in senso least-squares.

Il rotore viene modellato come un anello esterno non assialsimmetrico, caratterizzato da lobature interne periodiche che permettono di rappresentare in modo più realistico sia la distribuzione di massa sia la rigidità strutturale associata ai raccordi interni. Sul modello agiscono tre contributi principali: il carico esterno associato ai magneti, il carico di campo dovuto all'accelerazione centripeta del materiale rotorico e il contributo elastico dei collegamenti interni, modellati come molle radiali. Sia il carico dei magneti sia quello delle molle vengono descritti tramite distribuzioni armoniche fortemente localizzate, così da approssimare azioni concentrate pur rimanendo compatibili con la formulazione di Airy. L'impostazione si colloca nel solco di precedenti metodologie semplificate per l'analisi strutturale dei rotor, nelle quali il confronto con lo stesso modello agli Elementi Finiti è usato come riferimento di validazione.

La procedura sviluppata consente di descrivere in modo efficace il comportamento strutturale di un rotore SPMSM con geometria interna lobata, cogliendo il ruolo combinato della distribuzione di massa, del carico centrifugo, del carico esterno dei magneti e dell'azione elastica dei collegamenti interni. Il confronto con un modello agli Elementi Finiti costruito sulle stesse ipotesi di carico e di vincolo ha mostrato un buon accordo nella stima delle tensioni e degli spostamenti per le configurazioni semplificate considerate, confermando la correttezza dell'impostazione. In particolare, il modello semianalitico si è dimostrato capace di riprodurre con buona accuratezza il contributo dei carichi distribuiti esterni, del carico centrifugo di volume e del contributo elastico localizzato associato alle molle di richiamo. Il passaggio dalla formulazione completamente simbolica alla versione MATLAB ha inoltre consentito una netta riduzione dei tempi di calcolo, rendendo possibile l'esecuzione di analisi parametriche su armoniche di carico, rigidità dei collegamenti, geometria del rotore e condizioni operative. Successivamente, la procedura è stata confrontata anche con un modello agli Elementi Finiti del rotore realmente realizzato: i risultati hanno mostrato un'accettabile somiglianza nella distribuzione tensionale, nonostante il componente reale introduca dettagli e feature geometriche locali che non possono essere rappresentati fedelmente dalla formulazione analitica.

Il lavoro mostra come una metodologia semianalitica basata sulla funzione di Airy possa costituire un efficace strumento intermedio tra i modelli analitici chiusi e le simulazioni agli Elementi Finiti complete per l'analisi strutturale di rotor SPMSM. Pur non conducendo a formule semplici direttamente implementabili in strumenti di calcolo elementari, il modello sviluppato conserva una buona interpretabilità fisica e permette di analizzare rapidamente l'influenza dei principali parametri di progetto su tensioni e spostamenti. La procedura risulta quindi particolarmente adatta come supporto alla progettazione preliminare e all'analisi parametrica, offrendo un compromesso favorevole tra accuratezza, rapidità di calcolo e leggibilità ingegneristica, pur confermando la necessità del modello agli Elementi Finiti completo quando si vogliano descrivere con pieno dettaglio le discontinuità geometriche del componente reale.

Primary author: Dr BARBIERI, Saverio Giulio (Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari")

Co-author: Dr OLDONINI, Davide (Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari")

Presenter: Dr BARBIERI, Saverio Giulio (Università degli Studi di Modena e Reggio Emilia, Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari")

Session Classification: Automotive

Track Classification: Automotive