

Azionamento di un motore in-wheel brushless sinusoidale SMPM: sviluppo FOC e mapping 4D per l'ottimizzazione dell'efficienza

Candidate: Claudio Martino

Supervisor: Prof. Radu Bojoi

Co-Supervisor: Sandro Rubino

Abstract—L'obiettivo di questa tesi è lo sviluppo dell'azionamento di un motore brushless sinusoidale SMPM in-wheel. Il progetto ha l'obiettivo di massimizzare l'efficienza della macchina effettuando un mapping 4D come funzione della coppia richiesta, della velocità di rotazione, della tensione del DC-link e della temperatura degli avvolgimenti. L'elaborato ha inizio con lo studio dei profili di MTPA, MTPV e MTPS fino a raggiungere un mapping completo. Espone la tecnica di tuning dei regolatori per l'anello di corrente, il codice C di alto livello con focus nell'interpolazione quadridimensionale nella ricerca dei punti di riferimento ed il metodo per svolgerne la simulazione. L'intero lavoro è stato svolto tramite Matlab® ed il suo tool Simulink®

I. INTRODUZIONE

La ricerca e lo sviluppo nel campo dei trasporti è sicuramente uno tra i tasselli chiave per la raggiunta di obiettivi di sostenibilità ambientale e riduzione di gas ad effetto serra. I doverosi cambiamenti in questo settore richiedono necessariamente il rispetto di prerogative ambientali forti, conservando però il vincolo socioeconomico. Nasce con questa premessa il progetto europeo *EVC1000* per il quale prende forma l'elaborato. Il progetto prevede la collaborazione di 10 membri europei (università e aziende) con l'obiettivo di progettare due veicoli full electric che possano percorrere 1000 km con una sola carica effettuata in meno di 90 minuti. *Ideas & Motion*, azienda presso la quale ho svolto il progetto tesi, è un membro del team. Essa detiene l'incarico di concepire un dual-inverter trifase con tecnologia ai carburi di silicio (SiC) per l'azionamento di due moto-ruote prodotte dall'azienda *Elaphe*, anch'essa partecipante al team. La macchina presa in esame *L1500* è un motore sincro a magneti permanenti superficiali (SMPM) con alto numero di poli ed elevata coppia.



Figura I.1: *Elaphe L1500 in-wheel motor.*

Tensione nominale	370 Vdc
Coppia massima	1500 Nm
Coppia continua	650 Nm
Velocità massima	1480 Nm
Potenza massima	110 kW
Potenza continua	65 kW
Rendimento massimo	94 %

Tabella I.1: *Dati di targa della macchina.*

Il **contributo personale** che la tesi apporta al progetto è lo sviluppo della struttura di controllo di macchina Field Oriented e lo studio di LUTs di corrente di riferimento tramite mapping 4D. I calcoli preliminari ed il controllo vengono sviluppati procedendo dalla caratterizzazione delle perdite e dei valori di riferimento fino ad arrivare alla stesura del codice applicativo del microcontrollore. Il focus principale è occupato dallo studio dei punti di setpoint. Quest'ultimi saranno calcolati senza la trascuratezza di alcuna variabile. Alla coppia meccanica e velocità di rotazione, grandezze considerate in caso di mapping ordinario, verranno aggiunte tensione del DC-link e temperatura degli avvolgimenti statorici. Il mapping dunque risulterà quadridimensionale e verrà svolto con l'obiettivo di ottimizzare l'efficienza della macchina. Inoltre, sarà sviluppato il metodo di interpolazione quadridimensionale per la ricerca dei valori di setpoint da parte del controllo.

II. TRATTAZIONE PRINCIPALE

A. Mapping 4D

Il mapping completo è il modo più coerente per lo studio dei punti di setpoint per il controllo. Si tratta di studiare quali valori di corrente (d, q), per ogni punto di lavoro della macchina, massimizzino l'efficienza. In questo caso si è svolto tale operazione non solo per migliorare il rendimento di macchina ma anche per computare i valori di riferimento nella regione di deflussaggio (potenza costante), non più controllabili dal profilo di MTPA. Questo studio viene effettuato per tutte le combinazioni di tensione di DC-link e temperatura degli avvolgimenti statorici.

In primo luogo si effettua la ricerca dei limiti di coppia elettromagnetica (MTPS) e successivamente, nella regione compresa, si svolge la ricerca di i_d^* e i_q^* per valori di coppia e velocità definiti a step costanti.

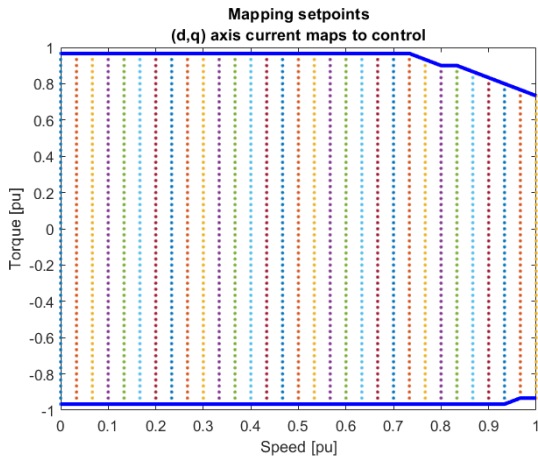


Figura II.1: Rappresentazione punti sottoposti a calcolo dei valori di riferimento.

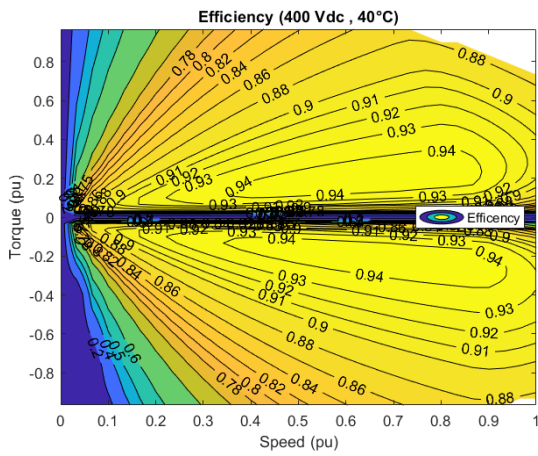


Figura II.2: Efficienza macchina (coppia, velocità).

B. Normalizzazione preliminare delle mappe per interpolazione 4D nel controllo

Le mappe di corrente di riferimento contengono elementi non reali nelle celle in cui il valore di coppia richiesto non è possibile generarlo. La differente dimensione tra le matrici e le posizioni non sovrapposte degli elementi non reali danno luogo a problemi matematici nell'operazione di interpolazione e/o risultati non corretti nella ricerca dei setpoint. Per ovviare a tale problema si ricorre ad un processo di normalizzazione. Questo metodo permetterà di ottenere il vettore di breakpoint di coppia in pu a step costante. Si aggiungerà però la necessità di salvare in memoria i valori di coppia massima al quale si è normalizzato. Sebbene si aggiunga lo svantaggio del salvataggio di ulteriori vettori questo metodo risulta necessario per effettuare un'interpolazione 4D.

C. Field Oriented Control

La tecnica di controllo scelta per la macchina in studio è la Field-Oriented. Dato il piccolo range di velocità da controllare in deflussaggio questa tecnica risulta la più conveniente. Viene implementata in ambiente Simulink® tramite codice C in una S-function.

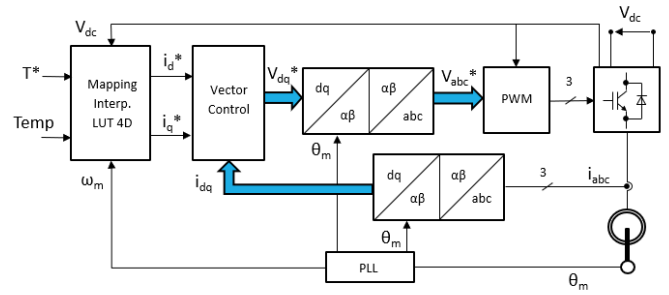


Figura II.3: Schema di controllo Field-Oriented.

D. Ricerca setpoint

Data la normalizzazione effettuata al punto B è stato necessario riprodurre il processo inverso per effettuare l'interpolazione ed ottenere i valori di setpoint i_d^* e i_q^* .

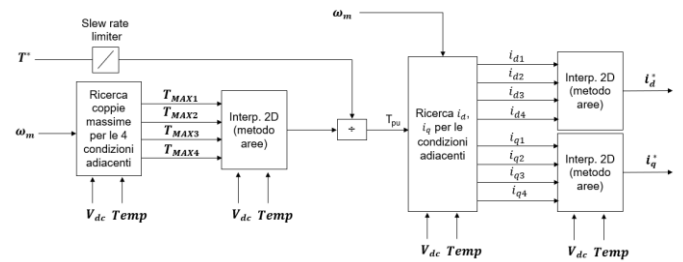


Figura II.4: Schema di interpolazione 4D.

E. Simulazione

In Matlab-Simulink è svolta la simulazione dell'intero powertrain del veicolo composto dal DC-link, inverter trifase e macchina. I risultati dimostrano un controllo ottimale e corretta ricerca dei punti di riferimento ad ogni punto di lavoro.

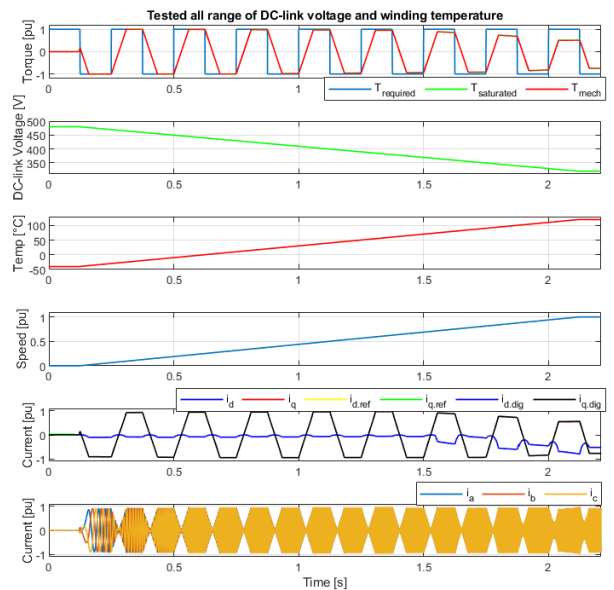


Figura II.5: Risultati simulazione per la totalità dei punti di lavoro.