

# Valutazione sperimentale delle perdite nel ferro e controllo di massima efficienza per motori SyR

Relatore: Gianmario Pellegrino

Correlatori: Paolo Pescetto  
Simone Ferrari

Candidato: Ariaudo Giorgio

## I. Introduzione

Le principali voci di perdita in una macchina elettrica in alternata, gestibili con il controllo, sono le perdite Joule e quelle allocate nel ferro. Storicamente, per la semplicità correlata al controllo, le macchine sono comandate in maniera tale da minimizzare la corrente, e quindi le perdite nel rame, per un dato valore di coppia.

I contributi della tesi sono:

- Caratterizzazione delle perdite nel ferro per un motore SyR a differenti velocità e punti di funzionamento.
- Modello della macchina in ambiente Simulink con integrate le perdite nel ferro sperimentali.
- Sviluppo di un controllo a massima efficienza.

La macchina testata è un prototipo sviluppato presso il dipartimento di Energia della tipologia sincro a riluttanza non assistito. Simulazioni preliminari su SyR-e e Magnet sono state svolte per verificare la possibilità di un guadagno di efficienza tale da poterlo usare come caso studio.

Nell'elaborato si è trascurato il legame fra le perdite nel ferro e la temperatura, differente a seconda dell'origine.

## II. Misure sperimentali

Nella prima parte della tesi è stata testato il motore. L'obiettivo è ricavare delle mappe di perdita nel ferro in funzione della velocità e del flusso concatenato con gli avvolgimenti di statore (sia in modulo che in fase). A tal fine, allestito il banco di prova presentato in figura 1, sono state svolte delle prove preliminari per valutare le mappe di flusso concatenato e caratterizzare gli attriti. In seguito

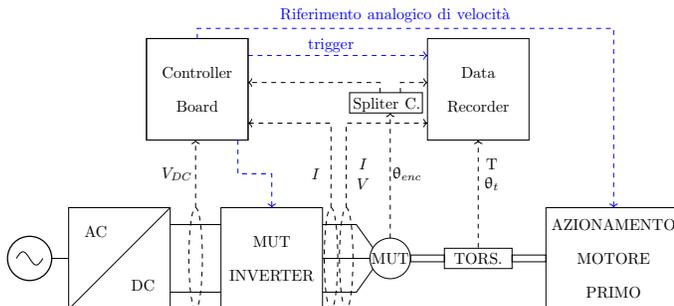


Figura 1. Schema della prova. Il motore sotto test è stato abbreviato con MUT (motor under test).

le perdite nel ferro sono valutate su un'area del piano delle correnti in assi dq di rotore con (1), considerando la potenza meccanica positiva quando è uscente dalla macchina.

$$P_{fe} = P_{el,input} - P_{mecc} - P_{joule} - P_{attriti} \quad (1)$$

Per tale prova la macchina testata è controllata in corrente mentre il motore primo in velocità, tenuta costante durante la prova. Per ogni punto di lavoro esplorato la sequenza proposta è presentata in figura 2 con il funzionamento in due quadranti della corrente al fine di poter correlare le perdite con il flusso concatenato con la reiezione dell'errore sulla resistenza. Tale necessità è correlata al discostamento fra la corrente ai morsetti e quella magnetizzante. Le misure sono state effettuate su due giri meccanici in modo tale da evitare errori correlati ai ripple sulle grandezze. Un esempio dei risultati elaborati è riportato in figura 3.

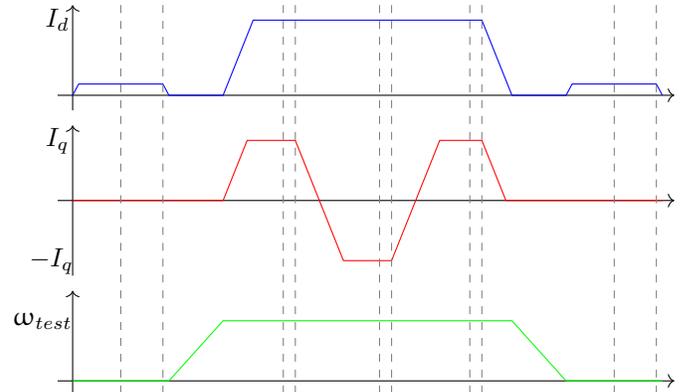


Figura 2. Comando delle correnti e della velocità per la coppia ( $I_d, I_q$ ). Isolati dal tratteggio grigio le zone in cui avviene la misura.

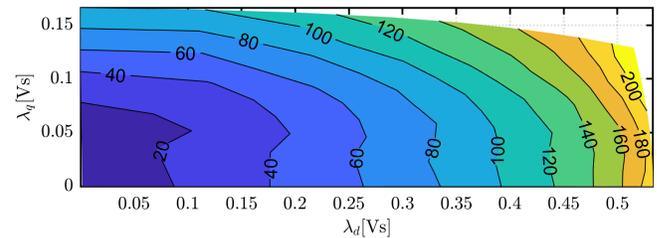


Figura 3. Perdite nel ferro alla velocità di riferimento di 1500rpm

Al crescere della velocità di prova:

- L'effetto dell'errore di resistenza su quello del flusso diminuisce fino a risultare trascurabile. Per alti valori di velocità la prova può essere quindi svolta comandando le correnti nel solo primo quadrante.
- Viene posto un limite di tensione, così solo i punti di lavoro analizzabili sono esplorati.

### III. Modello Simulink

In seguito i dati ottenuti sono stati utilizzati per implementare un modello Simulink. Il circuito a parametri concentrati utilizzato è riportato in figura 4. La matrice  $L$  è diagonale e presenta le induttanza incrementalì valutate sperimentalmente.

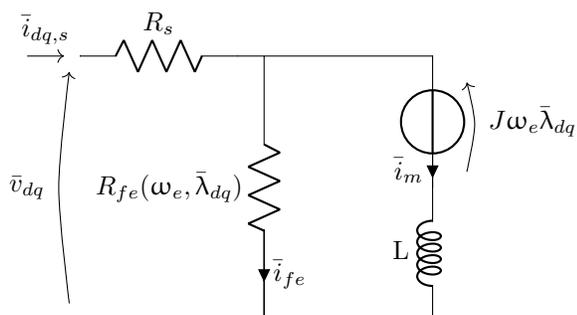


Figura 4. Modello della macchina a parametri concentrati implementato in Simulink.

Le perdite nel ferro valutate alle varie velocità sono interpolate su matrici riferite ai medesimi punti di funzionamento sul piano dei flussi. In seguito un fit viene eseguito secondo l'equazione 2 considerando due contributi di perdita, ottenendo due matrici di  $k_e, k_h$ , utilizzate per ottenere due LUT con ingresso i flussi in assi dq.

$$P_{fe}(\omega_e) = k_h * \omega_e + k_e * \omega_e^2 \quad (2)$$

In tale maniera, nota la velocità di rotore e i flussi in assi dq è valutato il valore  $R_{fe}$ . L'effetto delle perdite nel ferro è inserito nelle equazioni di statore valutando la  $i_{fe}$  e con essa la corrente ai morsetti.

### IV. Controllo ad alta efficienza

Con il modello realizzato è stato simulato un controllo che ricerca durante il funzionamento il punto di massima efficienza. A tal fine il motore è controllato con l'UDFVC. In condizioni di regime avviene la ricerca del punto di massima efficienza mantenendo la coppia richiesta e variando il flusso. A tal fine inizialmente ci si è focalizzati sugli stimatori delle potenze entranti ed uscenti dalla macchina. Per stimare correttamente la potenza meccanica, con i dati tipicamente accessibili in un controllo, è necessario avere accesso ad un modello delle perdite nel ferro. Le LUT utilizzate nel modello Simulink sono adatte ad essere inserite in un codice di controllo. Le misure sono svolte su un angolo meccanico multiplo di  $\pi/p$ , dove p sono i paia poli, per non considerare fenomeni correlati al ripple di

coppia.

In seguito, verificato il corretto funzionamento, la ricerca è stata integrata sia in un controllo di coppia che di velocità. Riveste il massimo interesse il riconoscimento del discostamento dallo stato di regime che avviene in maniera differente nel due controlli. Per il controllo in coppia sono utilizzati la velocità e il riferimento mentre per il controllo di velocità oltre al riferimento si pongono delle tolleranze sulla coppia media e, al fine di riconoscere una presa di carico, la corrispondente variazione sulla velocità è utilizzata.

In figura 5 è presentato il funzionamento in controllo di velocità. Sia variazioni del riferimento che prese di carico a rampa sono riportate, il controllo le rileva e una ricerca è effettuata.

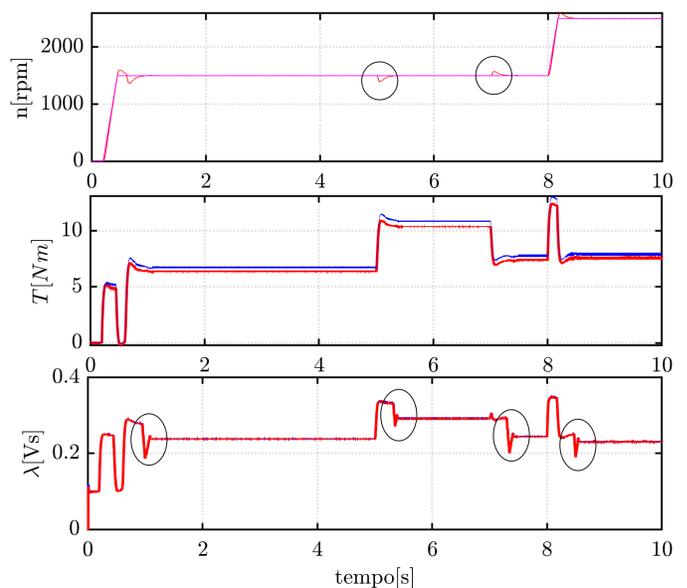


Figura 5. Controllo in velocità ad alta efficienza

Dato un ciclo di lavoro le perdite sono state valutate confrontando il controllo con uno che utilizza la curva di MTPA, riscontrando una riduzione delle perdite e di conseguenza verificando il corretto funzionamento.

### V. Conclusioni

La tesi ha analizzato un caso studio, fornendo una metodologia per caratterizzare sperimentalmente le perdite nel ferro e con esse si è verificata la possibilità di un controllo ad alta efficienza. I guadagni riscontrati per il motore specifico non sono risultati rilevanti in termini di efficienza, se non a bassi valori di coppia e alte velocità. Tale zona risulta di interesse per tutta una serie di applicazioni quali ad esempio l'ambito automotive, per cui il metodo presentato, estendibile a motori con magneti, può essere di interesse nel caso in cui si riscontrino alte perdite nel ferro.