

Politecnico di Torino  
 Corso di Laurea in Ingegneria elettrica  
**Sviluppo del Firmware per la Mappatura di Flusso ed Efficienza  
 di un Azionamento Elettrico a 48 V**

Relatori: Prof. Gianmario Pellegrino  
 Dott. Fausto Stella

Candidato: Alberto Brocero

**Abstract**—La tesi si pone l’obiettivo di implementare il firmware di controllo per la mappatura di flusso e di efficienza di un azionamento elettrico costituito da un inverter trifase a 48V e un motore sincrono a magneti permanenti indicato con MUT (Machine Under Test). Un secondo azionamento identico denominato DM (Driving Machine) impone la velocità e funge da carico. Le grandezze elettriche sono acquisite da un data recorder HBM Genesis. Il controllo coordinato di MUT e DM permette la scansione del piano delle correnti e del piano coppia-velocità del MUT per la misura ad alta precisione delle mappe di flusso ed efficienza.

comunica via CAN alla DM la velocità da imporre al sistema. Il cuore dell’inverter è il microcontrollore industriale STM32F703RE basato su core ARM M7 che può essere connesso a un comune PC grazie all’ interfaccia di programmazione e debug USB/SWD presente sul convertitore stesso. Il firmware per la MUT è stato sviluppato in codice C utilizzando STM32CubeMx per la generazione del template di progetto e KEIL uVision per la compilazione.

I. INTRODUZIONE

La tesi è collegata allo sviluppo di un nuovo inverter trifase general purpose a 48V. L’inverter è parte di un banco prova dimostratore realizzato per l’azienda tedesca HBM o HBK GmbH. In Fig.1. è visibile il banco prova dimostratore, su cui sono montati due azionamenti identici dotati ciascuno di un inverter a 48V e una macchina a magneti permanenti superficiali (SPM). Il primo azionamento denominato MUT (Machine Under Test) è comandato in corrente/coppia ed è quello di cui si vogliono caratterizzare le mappe di flusso concatenato ed efficienza, mentre il secondo azionamento denominato DM (Driving Machine) è retroazionato in velocità ed impone la velocità di rotazione al sistema. Il banco prova è connesso al data recorder HBM GEN4tB che acquisisce correnti, tensioni, coppia e posizione angolare della MUT.

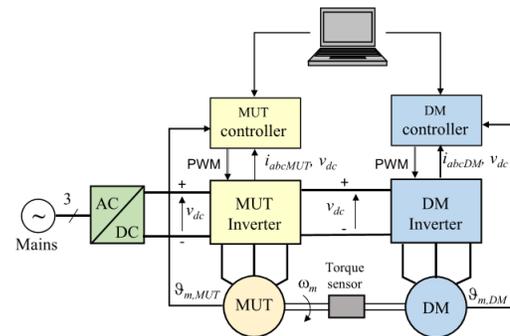


Fig. 2. Schema funzionale del banco test utilizzato.

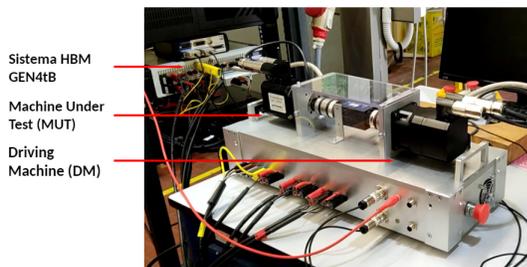


Fig. 1. Banco prova dimostratore connesso ad HBM GEN4tB.

II. SETUP SPERIMENTALE

In Fig.2. è raffigurato lo schema funzionale del banco test dove si vedono i due azionamenti in opposizione meccanica alimentati dalla stesso bus. Durante le fasi di test la MUT

III. MAPPA DI FLUSSO

Lo scopo della prova è valutare il flusso concatenato di macchina al variare delle correnti  $i_d$  e  $i_q$  così da poter poi trovare l’MTPA (Maximum Torque Per Ampere) di macchina. La valutazione del flusso viene effettuata a velocità costante, in questo caso la DM impone una velocità di rotazione pari a 1/6 della nominale (500 rpm). Il controllo della MUT si occupa di imporre un set di riferimenti di corrente in asse d e in asse q andando a testare tutto il piano delle correnti. Allo stesso tempo il sistema di acquisizione HBM monitora le correnti e le tensioni applicate, dalle quali nota la velocità di rotazione di macchina è possibile risalire ai flussi concatenati. Al fine di ottenere una valutazione precisa dei flussi è stato necessario eliminare le cadute di tensione dovute ai contributi resistivi andando ad alternare un funzionamento da motore/ generatore / motore come mostrato in Fig.3.

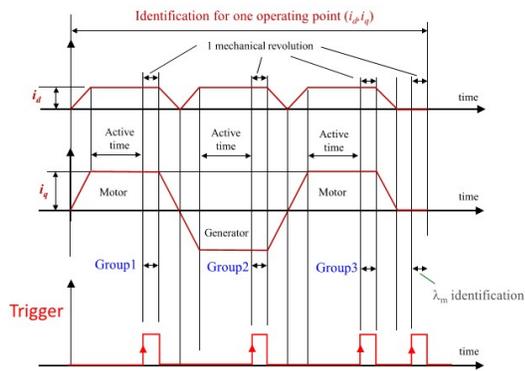


Fig. 3. Schema funzionale adottato per la mappatura di flusso.

#### IV. MAPPA DI EFFICIENZA

Lo scopo della prova è valutare l'efficienza della MUT (motore SPM e inverter a 48 V) nei vari punti di funzionamento dell'azionamento. La mappa di efficienza è ottenuta andando a testare il piano coppia-velocità della MUT. La MUT è comandata con un riferimento di coppia, mentre la DM (comandata via CAN) ha lo scopo di imporre la velocità al sistema. Per ogni livello di velocità sono imposti riferimenti di coppia crescenti e tramite HBM sono misurate le grandezze elettriche e meccaniche del sistema. Lo schema funzionale della prova è riportato in Fig.4. In particolare, sono state misurate tensioni e correnti in ingresso e in uscita all'inverter, tensioni e correnti applicate al motore SPM, velocità e coppia realizzate dal motore SPM. I dati ottenuti sono stati successivamente elaborati in Matlab.

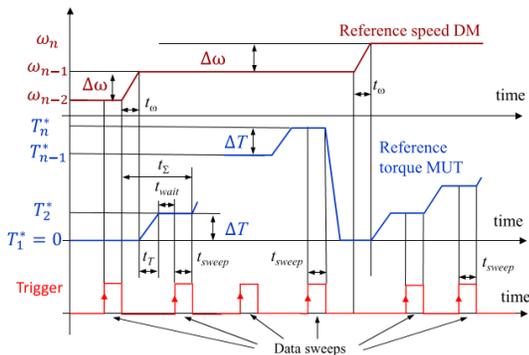


Fig. 4. Schema funzionale adottato per la mappatura di efficienza.

#### V. CONCLUSIONI

La mappatura di flusso è stata ricavata imponendo correnti in asse d da -16 a +16A, con step di 2A, e in asse q, da 0 a +24A, con step di 2A. Guardando la caratteristica flusso-corrente in asse d riportata in Fig.5. è possibile notare come a causa della presenza dei magneti per correnti  $i_d$  positive vi siano fenomeni di saturazione del ferro. La stessa cosa non si

nota in asse q dove non sono presenti i magneti. Inoltre, dai due grafici si vede chiaramente il fenomeno del cross coupling.

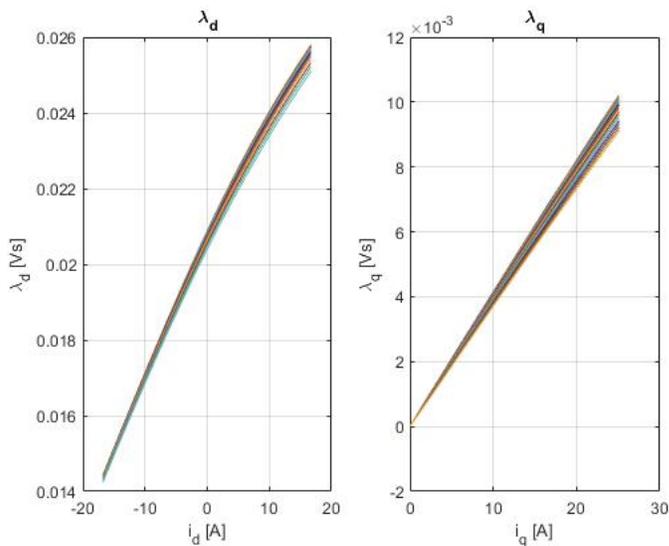


Fig. 5. Caratteristiche magnetiche in assi d-q.

La mappa di efficienza è stata ricavata testando i punti in velocità da 250 a 3000 rpm, con step di 250 rpm ed in coppia da 0.125 a 2.25 Nm, con step di 0.125 Nm.

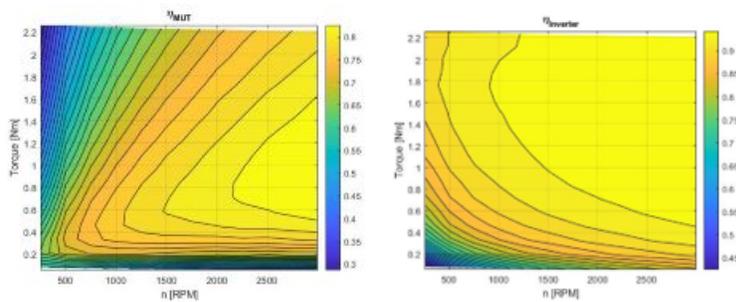


Fig. 6. Mappe di efficienza della macchina SPM e dell'inverter.

Come mostrato in Fig.6. le efficienze più elevate dal punto di vista della macchina elettrica, si evidenziano ad alta velocità per valori di coppia nell'intorno di 1 Nm. Quando la coppia sale a valori via via più elevati, sempre per valori di velocità elevati, si evidenzia un calo dell'efficienza, dovuto alle maggiori perdite per conduzione degli avvolgimenti statorici. Per punti di lavoro a basse coppie e basse velocità la potenza trasferita è minima, con conseguente maggiore peso relativo delle perdite, evidenziato sulla mappa da una zona a bassa efficienza. Per quanto riguarda l'inverter la zona ad efficienza maggiore si ha quando la velocità e la coppia della macchina elettrica sono massime, ovvero quando tensione e corrente erogate dall'inverter sono massime.