

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI
PERMANENTI

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA



**FACOLTA' DI INGEGNERIA
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE**

Corso di Laurea triennale in Ingegneria dell'Automazione

TESINA:

**PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN
MOTORE SINCRONO A MAGNETI
PERMANENTI.
FENOMENO DELLA CROSS SATURATION**

RELATORE: **Ch.Prof. Silverio Bolognani**

CO-RELATORE: **Ing. Mosè Castiello**

LAUREANDO: **Massimo Bottero**

Anno Accademico 2010-2011

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI
PERMANENTI

a chi mi è stato vicino.

SOMMARIO

CAPITOLO 1:

INTRODUZIONE 4

CAPITOLO 2:

RICHIAMI SUL MOTORE BRUSHLESS 7

STRUTTURA DEL MOTORE..... 17

CAPITOLO 3:

DESCRIZIONE TEORICA DELLA MISURA 21

CAPITOLO 4:

DESCRIZIONE MISURA E RISULTATI..... 24

APPARATO STRUMENTALE..... 26

MISURAZIONI EFFETTUATE 27

CAPITOLO 5:

CONCLUSIONI 38

1 INTRODUZIONE

La fisica ci insegna che un corpo può essere sede di energia accumulata, avendo così possibilità di compiere lavoro, scambiare energia o fornire calore.

Esistono molteplici forme di energia dalle quali si può dedurre qual è il fenomeno ad esse connesso (come energia cinetica, potenziale, magnetica, termica), dove solitamente troviamo due sistemi, in cui uno agisce sull'altro con tali forme di energia e l'altro ne subisce gli effetti (possono essere presenti anche più sistemi dove comunque alcuni subiscono gli effetti mentre altri li provocano).

In molte situazioni tali scambi di energia avvengono in maniera naturale ed incontrollata, ossia sono scambi di energia che non devono essere sottoposti a forzatura per ottenere il risultato desiderato. Oltre al termine "naturale" viene associato anche quello di incontrollato in quanto, anche se il fenomeno avviene senza forzatura, non è detto che avvenga negli effetti e quantità desiderate.

Esistono casi in cui, tra questi due elementi, ne venga inserito un terzo, allo scopo di controllare e produrre un determinato scambio energetico; il blocco che viene inserito prende il nome di *macchina*.

Il fatto di andare a controllare lo scambio di energia che avviene tra due sistemi, da la possibilità, oltre ad evitare situazioni indesiderate, di prevedere gli effetti di tali processi o di andare a selezionare e programmare, in termini di quantità e velocità, lo scambio energetico tra le due parti.

Anche per quanto riguarda le macchine, ne troviamo la presenza di svariati tipi, con funzionalità e costruzioni diverse, per riuscire a coprire tutte le esigenze presenti sul mercato.

Inoltre le macchine che vengono utilizzate sono adattate per i diversi tipi di energia e di dispositivi che devono essere utilizzati.

L'elaborato posa la sua attenzione sulle macchine elettriche, in cui, è garantito almeno uno scambio energetico di tipo elettrico (questo perché, alcune tra le macchine esistenti che vengono utilizzate, possono anche non contemplare scambi di energia di tipo elettrico).

Una prima grande distinzione che può essere fatta all'interno delle macchine elettriche è quella dovuta all'esclusivo avvenire di scambi energetici di tipo elettrico o dalla presenza di una *conversione elettromeccanica*, ossia la trasformazione di parte dell'energia elettrica in energia meccanica.

Nel primo caso le trasformazioni di energia che avvengono sono solo di tipo elettrico, dall'energia elettrica di alimentazione fino ai morsetti di uscita.

In questa situazione si parla di *convertitori elettrici statici* come ad esempio i trasformatori i quali presentano una determinata potenza in ingresso (dettata da valori di tensione e corrente al primario) ed ovviamente da una potenza di uscita (anch'essa caratterizzata da corrente e tensione al secondario).

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Nel secondo caso, invece, si parla della traduzione dell'energia elettrica in energia meccanica, fenomeno mediante il quale, partendo sempre da un'alimentazione che fornisce potenza elettrica si può ricavare lavoro meccanico.

In questo caso si parla di *macchine elettriche dinamiche* che comprendono al loro interno parti che si possono muovere e che danno all'eventuale utilizzatore una certa potenza.

Le macchine elettriche dinamiche possono a loro volta essere suddivise in generatori, se forniscono lavoro di tipo elettrico e assorbono lavoro di tipo meccanico, e in motori elettrici se, una volta ricevuto lavoro elettrico, forniscono in uscita lavoro meccanico.

Sul mercato di oggi sono presenti diversi tipi di macchine elettriche, differenziate dal tipo di corrente con cui vengono utilizzate, corrente continua o alternata, e dal tipo e dal materiale con cui sono realizzati gli avvolgimenti e struttura di tale macchina.

Oltre a questi elementi, parlando di macchine elettriche dinamiche, altro elemento di distinzione è rappresentato dal tipo di parte mobile di cui è dotata, differendo anche per il metodo di costruzione.

In particolare questo elaborato fa riferimento ad un tipo di macchina elettrica denominata "*motore sincro a magneti permanenti*" (detto anche brushless), che è stata sottoposta ad alcuni test durante il suo funzionamento.

Per ogni macchina elettrica, dinamica e non, viene spesso considerato un funzionamento cosiddetto ideale e reale.

Quando si va a considerare l'idealità del funzionamento di una macchina, si vanno a trascurare le eventuali perdite di potenza, dovute alle resistenze presenti nella macchina stessa, come ad esempio le perdite Joule, le perdite nel ferro e nel rame.

Inoltre si fa riferimento a delle caratteristiche di funzionamento, che non possano uscire da quelle che sono le specifiche stesse della macchina (dati di targa).

Per quanto riguarda invece il funzionamento reale della macchina (che poi è il funzionamento su cui ci si deve basare per la costruzione e la progettazione della macchina), si vanno a considerare tutte le eventuali perdite presenti e si prendono in considerazione punti di lavoro che possono uscire dall'idealità della macchina stessa.

Una delle caratteristiche che descrive il comportamento reale del motore sincro a magneti permanenti è la *saturatione magnetica* (con tale termine si va ad indicare il raggiungimento del valore massimo di magnetizzazione, raggiunto da un materiale ferromagnetico sottoposto al passaggio di una corrente).

In corrispondenza della saturazione del ferro le relazioni che coinvolgono flusso concatenato e corrente non sono più lineari, prendendo in considerazione entrambi gli assi (d-q) nel sistema di riferimento rotante.

Tali relazioni non assumono più una caratteristica costante, ma assumono la forma di curve, che si incrociano tra loro. Tale fenomeno può essere spiegato tenendo conto che parti del circuito magnetico sono comuni sia all'asse q che all'asse d; conseguentemente quando si raggiunge la saturazione di una delle due parti, questa va a determinare una variazione di flusso anche nell'altro asse, nonostante il valore della relativa corrente rimanga costante.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Un fenomeno che rappresenta tale situazione è quello della *cross saturation* (saturazione incrociata), usata per lo scopo di tale esperienza.

Tale procedura, si distingue da quella per lo studio della saturazione del ferro e conseguente deduzione delle caratteristiche di magnetizzazione, in cui una delle due correnti è mantenuta a zero mentre l'altra viene fatta variare nel suo range prefissato e con passo prestabilito.

2 RICHIAMI SUL MOTORE BRUSHLESS

I motori sincroni a magneti permanenti, detti anche “brushless a f.e.m. sinusoidale”, trovano ampio spazio oggi giorno nelle applicazioni industriali, soprattutto per servoazionamenti di media e bassa potenza.

Con il termine sincrone si fa riferimento ad un tipo di motore elettrico in corrente alternata, in cui il periodo di rotazione è sincronizzato con la frequenza della tensione di alimentazione, solitamente trifase; questo motore può essere utilizzato come alternatore, infatti la maggioranza degli alternatori è di questo tipo.

L'elemento caratterizzante di tali motori è appunto la presenza di magneti permanenti sul rotore (parte rotante del motore), dai quali dipende funzionamento, tipologia e costo dello stesso. All'interno di ogni atomo o molecola, le disposizioni di ogni spin¹ seguono rigidamente il Principio di esclusione di Pauli²; comunque sia, nelle sostanze diamagnetiche non esiste un ordinamento "a lungo raggio" di questi spin, per cui non esiste un campo magnetico, dato che ogni momento magnetico di una particella è annullato da quello di un'altra. Nei magneti permanenti, invece, questo ordinamento a lungo raggio esiste; il grado più elevato di ordinamento è quello presente nei cosiddetti domini magnetici: essi possono essere considerati come microscopiche regioni dove una forte interazione tra particelle, detta interazione di scambio, genera una situazione estremamente ordinata; più elevato è il grado di ordine del dominio, più forte risulterà il campo magnetico generato.

Il *motore brushless* è un motore elettrico che a differenza di un motore a spazzole, non ha bisogno di contatti elettrici striscianti sull'albero motore per funzionare (da qui il nome “senza spazzole”). La commutazione della corrente circolante negli avvolgimenti, infatti, non avviene più per via meccanica, ma elettronicamente, con la conseguenza di una minore resistenza meccanica, eliminando la possibilità che si formino scintille, al crescere della velocità di rotazione. Con questa tipologia di motori si riduce notevolmente la necessità di manutenzione periodica (anche per questo motivo trova una grandissima applicazione sia in campo industriale che in campo domestico).

Uno dei vantaggi che contraddistingue questo tipo di motore riguarda la sua “vita attesa”, dato che le spazzole sono, per un motore, uno degli elementi che si degradano e degradano più velocemente. L'assenza di spazzole elimina anche la principale fonte di rumore elettromagnetico presente negli altri motori in continua.

Un altro aspetto rilevante riguarda le dimensioni del motore stesso, spesso “limitate” rispetto alla potenza che possono erogare (attualmente troviamo motori che sono ridotti al limite della struttura fisica).

¹ Momento angolare intrinseco delle particelle

² Principio della fisica secondo cui due fermioni identici non possono occupare lo stesso spazio quantistico.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Con il termine limitate non si fa riferimento al fatto che non sono in grado di svolgere il loro compito nell'ambiente di lavoro, ma che, in certe situazioni, la struttura fisica del motore stesso non può essere ancor più ridotta. Per verificare questo basta notare il motore preso in esame, il quale è un motore di una lavatrice, l'albero con cui va a mettere in rotazione il cestello è di dimensioni ridotte se si pensa alla mole del cestello stesso.

In termini di efficienza, i motori brushless dissipano molto meno calore di un equivalente motore in corrente alternata (elemento rilevante e preso in considerazione durante le misurazioni effettuate). Gli avvolgimenti sullo statore inoltre dissipano facilmente il calore generato e permettono di costruire motori "lisci", senza alettature esterne. L'assenza di scintille è fondamentale quando il motore opera in ambienti saturi di composti chimici volatili, come i carburanti, o comunque in ambienti domestici (come le lavatrici) che richiedono lavorazioni in totale sicurezza. In aggiunta il riscaldamento complessivo del motore risulta essere diminuito in quanto, le perdite per effetto Joule, sono dovute solo agli avvolgimenti di statore, in quanto quelli del rotore non sono presenti (sostituiti dai magneti). Queste caratteristiche li rendono adatti anche all'utilizzo nei lettori CD e DVD, ma anche, per campi di lavoro più grandi come: l'aeronautica, l'automobilismo, in ambito navale e nei sempre più diffusi veicoli elettrici o ibridi. Recentemente, grazie alla spinta commerciale legata alla richiesta di prodotti ad elevata efficienza energetica nel settore civile, sono stati introdotti sul mercato del condizionamento e della refrigerazione, dove possono ottenere elevati benefici in termini di consumi a favore dei grandi utilizzatori. Esistono applicazioni navali di tali motori con tecnologie a superconduzione che hanno potenze dell'ordine dei MW. Ultimamente sono molto utilizzati in campo industriale ed impiegati nelle macchine automatiche che necessitano di movimenti precisi e veloci con ingombri decisamente contenuti e grande versatilità, offerta anche da apparecchiature di controllo programmabili molto sofisticate, che danno un completo controllo e diagnostica del motore (un esempio sono le frese definite a "cinque assi" in grado di modellare un pezzo grezzo nei minimi dettagli).

Per contro, uno svantaggio di questo tipo di motori sta nel maggiore costo. Al contrario dei motori a spazzole, infatti, il controllo viene effettuato elettronicamente da un controller, ossia un dispositivo elettronico fornito dal costruttore del motore o da terze parti, che comporta un incremento economico, e di conseguenza sul costo finale. Sul prezzo finale del motore stesso incide il materiale con cui sono realizzati i magneti stessi.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

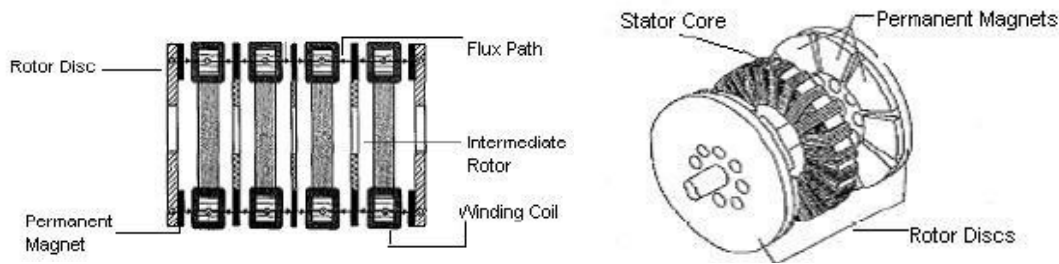


Fig.1 Schematizzazione di motori

La continua ricerca e il tentativo di riduzione dei costi e dimensioni, ha aperto infine un'altra strada per questa categoria di motori, quella dei minimotori brushless. Queste macchine sono pensate per azionamenti di piccolissima potenza, addirittura da qualche centesimo di Watt, fino al massimo ad una decina.

Vengono utilizzati ad esempio in strumentazioni mediche ed attrezzature da laboratorio di precisione (elettrocardiografi, artroscopia, bilance di precisione); nel campo audio/video (macchine per riprese cinematografiche, lettori di microfilm, videoregistratori); nel campo del modellismo (aeromodellismo e modellismo di qualità); in azionamenti per sistemi di uso domestico (veneziane, ventilatori).

Il motore brushless presenta conversione elettromeccanica che segue il funzionamento dei sistemi elettrodinamici, ossia basata sull'interazione tra conduttori percorsi da corrente elettrica e i campi magnetici generati dagli stessi o dai magneti permanenti.

Il flusso di cui si è parlato precedentemente nasce appunto dal passaggio di una corrente attraverso un conduttore che avvolge un materiale ferromagnetico.

La conversione elettromeccanica, come dice la parola stessa, rappresenta la traduzione dell'energia elettrica in potenza meccanica definita poi mediante la coppia e la velocità del motore stesso.

Il legame che collega potenza meccanica con potenza elettrica, istante per istante, viene espressa dalla seguente relazione, la quale rappresenta il bilancio delle potenze in gioco durante il funzionamento del motore (per la scrittura delle relazioni si fa riferimento al sistema di riferimento rotante d-q):

$$(u_d i_d + u_q i_q) dt = (R i_d^2 + R i_q^2) dt + L_d i_d di_d + L_q i_q di_q + \omega_{me} (\Lambda_{mg} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) dt$$

Che si ricava direttamente dalle equazioni che contraddistinguono le tensioni sugli assi d e q³:

- $u_d = R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_{me} L_q i_q$
- $u_q = R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \omega_{me} L_d i_d + \omega_{me} \Lambda_{mg}$

³ Sistema di riferimento rotante fisso con il rotore.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

dove con L_d si intende l'induttanza percorsa dalla corrente diretta, perciò detta induttanza sincrona diretta, mentre L_q viene definita induttanza sincrona in quadratura in quanto percorsa dall'omonima corrente.

Il primo membro rappresenta l'energia elettrica fornita al motore nel tempo dt considerato; essa viene eguagliata dall'energia risultante dopo il processo di conversione elettromagnetica, le cui varie componenti sono rappresentate dai termini a secondo membro, dei quali il primo termine, rappresenta l'energia trasformata in calore sulle resistenze degli avvolgimenti (effetto Joule).

Il secondo ed il terzo costituiscono l'energia immagazzinata nel campo magnetico, collegata alle induttanze sincrone L_q e L_d .

L'ultimo termine rappresenta l'energia meccanica sviluppata, nell'ipotesi di funzionamento da motore della macchina. La trasformazione adottata per il passaggio dal sistema di riferimento stazionario a quello sincrono non è invariante per la potenza, che risulta diminuita di un fattore $2/3$. Ricordando poi che la potenza meccanica si può esprimere anche come prodotto della coppia m per la velocità meccanica ω_m , si ottiene in definitiva:

$$m(i_d, i_q) = \frac{3}{2} p \Lambda_{mg} i_q + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q$$

Da tale relazione si vede che il valore della coppia dipende, per il primo addendo, solamente dalla componente della corrente I_q (e solo da questa corrente nel caso di motore SPM), cioè della componente in quadratura in relazione al flusso concatenato che viene generato dai magneti permanenti.

Il secondo addendo coinvolge invece entrambe le correnti e tale elemento della coppia è detto **coppia di riluttanza**.

Dalle relazioni prima descritte si può ricavare il seguente schema a blocchi che descrive le diverse interazioni tra gli elementi del motore:

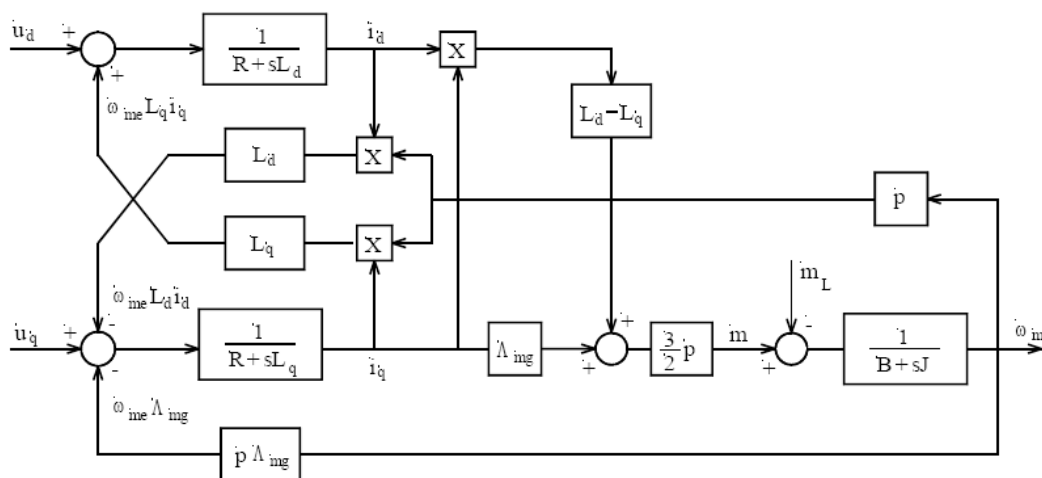


Fig.2 Schema a blocchi delle relazioni di un motore sincrono a magneti permanenti

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Partendo dalle due tensioni u_d e u_q seguendo l'andamento delle frecce si ricavano le due relazioni scritte precedentemente.

Le relazioni sopra citate riguardano i motori a magneti permanenti cosiddetti anisotropi, mentre per i motori isotropi sono presenti alcune differenze ma le modalità con cui si arrivano alle conclusioni sono le medesime⁴.

Per completezza dei simboli utilizzati nelle espressioni va ricordato che:

p = rappresenta il numero di poli del motore (molte volte espresso anche in coppie polari pari a $p/2$);

Λ_{mg} = rappresenta il flusso massimo concatenato con ciascuna fase per l'effetto del magnete permanente;

ω_{me} = rappresenta la velocità di rotazione del sistema di riferimento d-q rispetto al sistema stazionario.

Durante il suo funzionamento ogni motore presenta dei valori di tensione e di corrente limite, entro i quali si garantiscono determinate prestazioni del motore, mentre, superate tali soglie, si rischia di non avere più un funzionamento prevedibile, e di andare a danneggiare quelle che sono le caratteristiche fisiche del motore stesso. Si parla quindi di limiti e regioni di funzionamento che possiamo dedurre all'atto della messa in funzione del motore dai dati di targa.

Per andare a definire tali limiti si va a considerare il funzionamento del motore a regime, ossia il funzionamento in cui le tensioni e le correnti di ogni fase sono sinusoidali nel tempo e con ampiezza e frequenza costanti (di conseguenza anche le grandezze elettriche nel sistema di riferimento d-q sono costanti e si vanno ad indicare con U_d-U_q , I_d-I_q).

Anche la tensione di statore deve rimanere entro un predefinito valore detto valore nominale U_{nom} , che dipende da alcuni fattori come ad esempio: criteri di isolamento e di dimensionamento elettromagnetico del motore. I dati di targa si riferiscono di norma al valore nominale della tensione efficace concatenata.

Per quanto riguarda i limiti di corrente, durante il funzionamento a regime, si ricava direttamente dalle correnti negli assi d-q seguendo tale relazione:

$$\underline{I_d^2 + I_q^2 \leq I_N^2}$$

dove I_N rappresenta il modulo del vettore spaziale delle correnti statoriche corrispondente alla corrente nominale efficace di fase I_{nom} .

⁴ Un esempio è il valore della coppia in cui è presente solo il primo membro in quanto in tali tipi di motori L_d e L_q sono uguali e la differenza del secondo membro è posta a zero.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Per quanto riguarda le tensioni il concetto è analogo e viene espresso dalla seguente relazione:

$$U_d^2 + U_q^2 \leq U_N^2$$

dove U_N rappresenta il modulo del vettore spaziale delle tensioni statoriche corrispondente alla tensione nominale efficace concatenata U_{nom} .

Conoscendo ora i limiti presenti e le relazioni che legano le tensioni e le correnti, si può andare a ricavare graficamente tali limiti e regioni di funzionamento.

Partendo dalle relazioni a regime delle tensioni U_d e U_q :

$$U_d = RI_d - \Omega_{me}LI_q$$

$$U_q = RI_q + \Omega_{me}L_dI_d + \Omega_{me}L_dI_d + \Omega_{me}\Lambda_{mg}$$

Si ricava dalla disequazione precedente:

$$(\Omega_{me}L_qI_q)^2 + (\Omega_{me}L_dI_d + \Omega_{me}\Lambda_{mg})^2 \leq U_N^2$$

I limiti di corrente e di tensione così esposti si riflettono in quelli che sono i limiti di coppia e di velocità.

Nel grafico sottostante dagli assi I_d - I_q sono riportate le espressioni prima scritte:

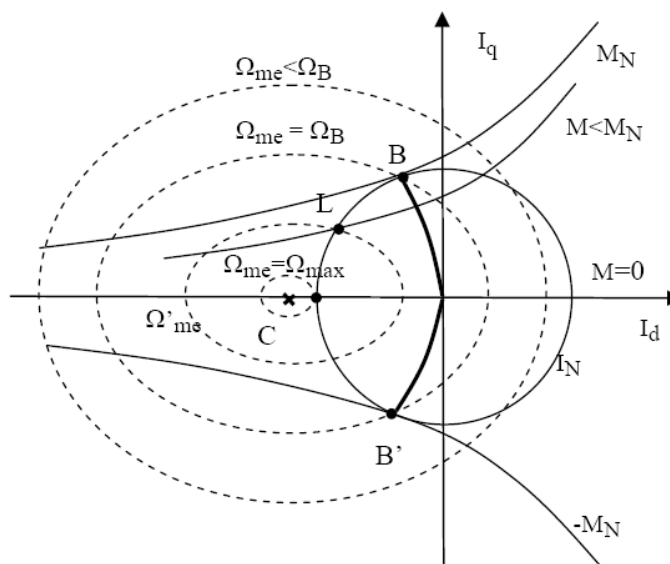


Fig.3 Limiti e regioni di funzionamento motore sincrono

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Per quanto riguarda il limite di corrente si riconosce che esso rappresenta, nel piano Id-Iq, una circonferenza di raggio I_N , mostrata nella figura sovrastante.

Il limite di tensione descrive una famiglia di ellissi concentriche ciascuna delle quali dipende dal reciproco della velocità.

Le coordinate del punto C sono le seguenti:

$$I_{Cd} = -\Lambda_{mg}/L \qquad I_{Cq} = 0$$

le quali rappresentano i valori delle correnti con i terminali posti in cortocircuito, mantenendo comunque il rotore in rotazione.

Nelle macchine anisotrope la corrente di corto circuito può essere maggiore o minore della corrente nominale della macchina. Ovviamente quando tale valore della corrente supera il livello nominale tale punto fuoriesce dalla circonferenza.

Sul grafico sono riportati i luoghi a coppia costante (curve isocoppia) che sono rappresentate da delle iperbole con asintoti rispetto all'asse orizzontale e la retta verticale $I_d = \Lambda_{mg}/(L_q - L_d)$.

A tali relazioni si arriva risolvendo la relazione che definisce il valore della coppia, per ogni valore prefissato della stessa, per la corrente I_q in funzione della I_d .

Si ricava tale relazione:

$$I_q = \frac{2}{3p} \frac{\Lambda_{mg} M}{\Lambda_{mg} + (L_d - L_q)I_d}$$

Per ogni valore di M si hanno due rami di iperbole, uno a destra e uno a sinistra dell'asintoto verticale. Il ramo di interesse è quello a sinistra (nel semipiano dove è collocata l'origine del piano) perché consente di ottenere la stessa coppia con minor corrente.

Sulla figura è mostrata la curva BB', luogo dei punti di tangenza fra le iperboli isocoppia e diversi limiti di corrente. La curva rappresenta l'insieme dei punti di lavoro per i quali si manifesta il massimo rapporto coppia su corrente (luogo Max Torque Per Ampere). Nel punto B si ha la coppia nominale positiva; in B' la stessa coppia di segno negativo.

L'espressione del luogo MTPA, si ottiene imponendo l'ortogonalità della rete tangente la curva isocoppia in un dato punto, con la retta che congiunge quel punto all'origine del piano.

Dato un determinato funzionamento del motore e la conseguente velocità di rotazione possiamo andare a collocare tale punto di lavoro in una regione del grafico, nel rispetto dei limiti di tensione e di corrente.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Come riferimento si prende un determinato valore della velocità detta velocità base:

$$\Omega_B = \frac{U_N}{\sqrt{\Lambda_{mg}^2 + (LI_N)^2}}$$

Per basse velocità di funzionamento, il limite di tensione è molto ampio (infatti gli assi delle ellissi tendono all'infinito per la velocità che tende a zero) e pertanto è più restrittivo il limite di corrente. In tali condizioni appare conveniente far funzionare il motore in un punto del luogo BB', a seconda della coppia che si deve produrre, ma in ogni caso, assicurando per quella coppia la minima corrente assorbita (massimo rapporto coppia su corrente) e minime perdite. Ciò si può attuare fino a che il luogo BB' è interno al limite di tensione ovvero fino alla velocità $\Omega_{me}=\Omega_B$ per la quale la corrispondente ellisse che esprime il limite di tensione passa per i punti B e B'.

Per velocità superiori alla velocità base l'area dei punti di lavoro ammissibili, contenuta sia nel limite di tensione che in quello di corrente, non contiene più l'intero luogo BB'. La massima coppia si ottiene nel punto di lavoro definito dall'intersezione fra la circonferenza limite di corrente e quella limite di tensione, come rappresentato dal punto L della figura 3 con riferimento alla velocità Ω'_{me} . Tale coppia massima disponibile è inferiore alla coppia nominale e cala rapidamente al crescere della velocità per annullarsi quando la velocità raggiunge il valore Ω_{max} al quale i limiti di tensione e di corrente si toccano in un solo punto posto sull'asse della I_d . La velocità massima si può essere espressa mediante la seguente relazione che si ottiene nelle condizioni $I_q=0, I_d= - I_N$.

$$\Omega_{max} = \frac{U_n}{\Lambda_{mg} - L_d I_n}$$

I motori brushless con rotore anisotropo sono in genere realizzati per esibire un'ampia regione di funzionamento con velocità superiori alla velocità base.

Per tale scopo essi sono spesso progettati per avere una corrente di corto circuito minore della corrente nominale e quindi un centro delle ellissi limite di tensione contenuto nella circonferenza limite di corrente.

2.1 STRUTTURA DEL MOTORE

Il motore brushless presenta, come per tutte le macchine elettriche dinamiche, due parti fondamentali, una fissa detta statore ed una parte mobile detta rotore.

Entrambe sono di forma cilindrica e costituite di materiale ferromagnetico separate tra di loro da un traferro in aria. Il traferro rappresenta l'elemento che separa le due parti che costituiscono il motore che, come in questo caso, è l'aria, ma possono anche essere utilizzati altri materiali.

Le immagini sottostanti sono del motore **Elux 7B⁵** utilizzato per l'elaborato:

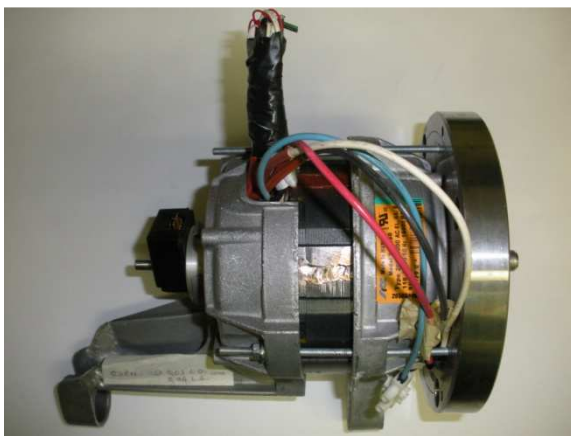


Fig. 4a Vista laterale destra



Fig. 4b Vista laterale sinistra



Fig. 4c Vista frontale

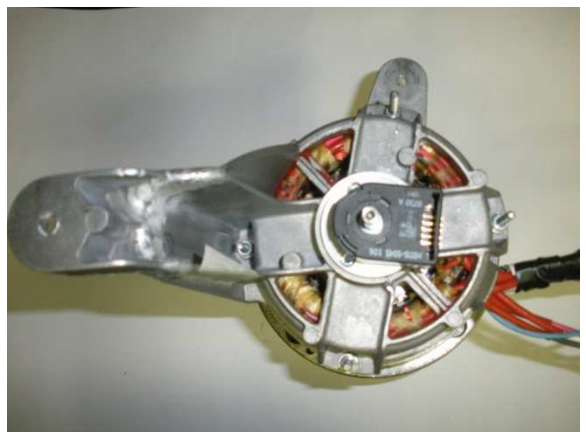


Fig. 4d Vista posteriore

⁵ Tale motore è un prototipo progettato in Laboratorio di Azionamenti Elettrici DIE

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Sullo statore sono collocati, nelle apposite cave statoriche (che sono degli incavi ricavati direttamente sulla struttura dello statore), gli avvolgimenti (conduttori), i quali sono di tipo trifase. Le tre fasi sono costituite in egual numero di conduttori e distribuite spazialmente in modo ordinato, sfasate di $2\pi/3$ (120°). Ciascuna fase farà capo ad una coppia di morsetti attraverso i quali è possibile fornire loro alimentazione mediante una terna trifase esterna.

I magneti sul rotore sono realizzati con speciali materiali che permettono di avere un'inerzia rotorica molto bassa, cosa che permette di avere un controllo estremamente preciso sia in velocità che in accelerazione.

A seconda della loro disposizione e della forma del rotore, si possono ottenere strutture di rotore isotrope o anisotrope.

Nel primo i magneti sono disposti sulla superficie del rotore, e il motore viene per questo motivo denominato SPM (*surface permanent magnet*). Nel secondo caso i magneti sono "sepolti", ovvero posizionati all'interno del cilindro di rotore in senso radiale; questa tipologia viene dunque nominata IPM (*interior permanent magnet*).

Le figure sottostanti mostrano una sezione dei motori a magneti permanenti con le due configurazioni dei magneti dette pocanzi:

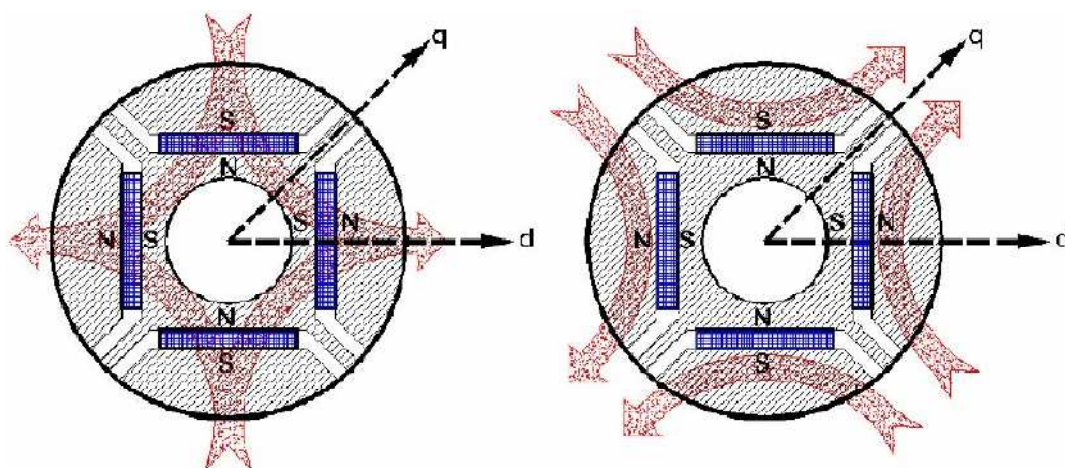


Fig. 5a. Percorsi del flusso magnetico secondo gli assi diretto ed in quadratura di rotore in una macchina sincrona a magneti permanenti interni o annegati.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

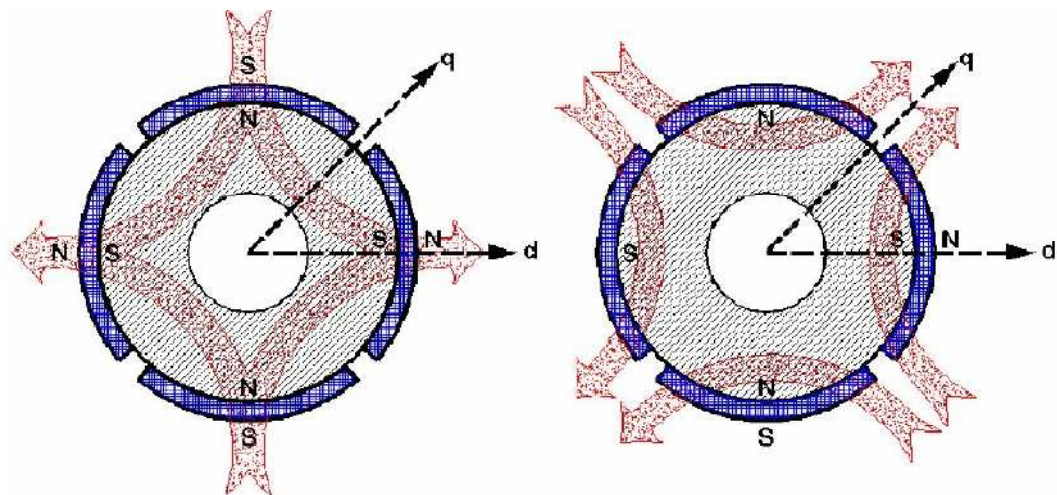


Fig.5b Andamento del flusso magnetico secondo gli assi diretto ed in quadratura di rotore in una macchina sincrona a magneti permanenti superficiali

Rispetto alla struttura isotropa, nei motori IPM si ha un'inerzia del 20-30% maggiore ed una maggiore induttanza, ma offrono un leggero vantaggio nel costo grazie all'uso di barrette magnetiche standard, al montaggio in maniera automatica e all'eliminazione della fasciatura.

La messa in moto di un motore brushless non presenta particolari difficoltà fatte salve alcune importanti precauzioni. Il motore dispone di tre fili, 3 fasi, che vanno collegati al regolatore, opportunamente protetto da cortocircuiti o distacchi accidentali. La perdita della connessione di una fase si rileva dal comportamento del motore che invece di girare, vibra.

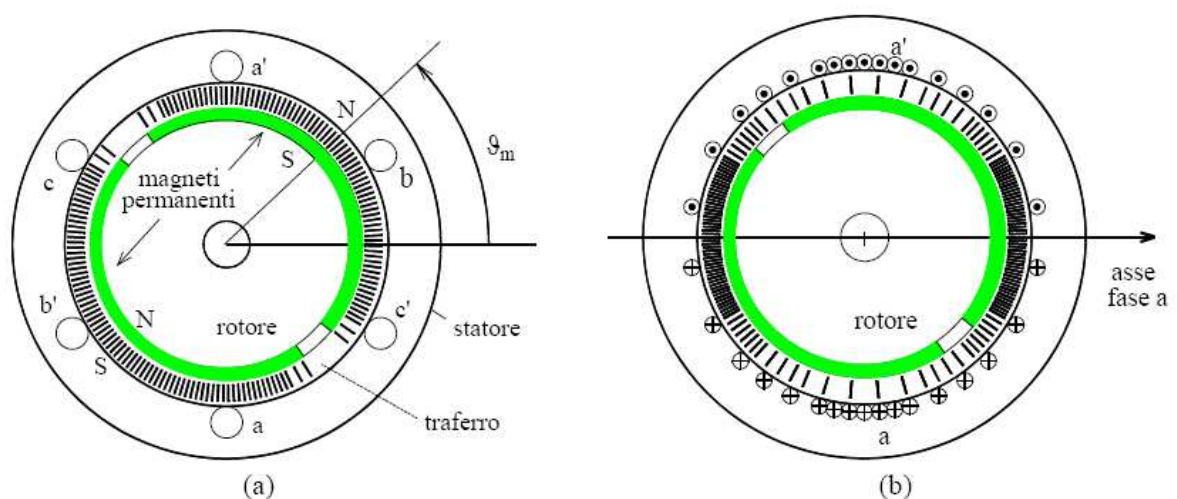


Fig.6 Sezione del motore

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Come si vede dalla figura l'avvolgimento di statore è di tipo trifase (indicati con le lettere aa', bb', cc').

Per ciascuna di tali fasi otteniamo le seguenti equazioni che descrivono le equazioni nel tempo delle tensioni di fase:

$$u_a(t) = Ri_a(t) + \frac{d\lambda_a(t)}{dt}$$

$$u_b(t) = Ri_b(t) + \frac{d\lambda_b(t)}{dt}$$

$$u_c(t) = Ri_c(t) + \frac{d\lambda_c(t)}{dt}$$

Dove i_a, i_b, i_c sono le correnti che percorrono le tre fasi dello statore, mentre $\lambda_a, \lambda_b, \lambda_c$ sono i flussi concatenati con ciascuna fase, mentre R è definita la resistenza di fase che è considerata uguale per tutti e tre i conduttori.

In assenza di saturazione magnetica il flusso concatenato può essere espresso come la somma del flusso concatenato prodotto dal magnete permanente e quello dovuto alle correnti di fase:

$$\lambda_a(t) = \lambda_{a,mg}(t) + \lambda_{a,i}(t)$$

$$\lambda_b(t) = \lambda_{b,mg}(t) + \lambda_{b,i}(t)$$

$$\lambda_c(t) = \lambda_{c,mg}(t) + \lambda_{c,i}(t)$$

Dove ogni primo addendo si ricava dalle seguenti relazioni:

$$\lambda_{a,mg}(t) = \Lambda_{mg} \cos(\theta_{me})$$

$$\lambda_{a,mg}(t) = \Lambda_{mg} \cos\left(\theta_{me} - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$\lambda_{a,mg}(t) = \Lambda_{mg} \cos\left(\theta_{me} - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Che si ricavano nella situazione in cui non si invia alcuna corrente agli avvolgimenti statorici, dove con θ_{me} si definisce l'angolo elettrico tra l'asse della fase e quello del campo prodotto dal magnete permanente, definita anche posizione elettromeccanica. Invece con Λ_{mg} si fa riferimento al massimo flusso concatenato con ciascuna fase per effetto del magnete permanente.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Per andare ad analizzare il contributo del flusso da parte delle correnti che attraversano i conduttori delle fasi statoriche si fa riferimento ai fenomeni di mutua induzione e di autoinduzione, tra ciascuno degli avvolgimenti con gli altri due.

In particolare, è facile rendersi conto che i flussi mutuamente accoppiati hanno segno opposto a quelli che si autoconcatenano in ciascun avvolgimento; si possono scrivere quindi le seguenti uguaglianze:

$$L_a = L_b = L_c = L_i \quad (\text{autoinduzione})$$

$$L_{Mab} = L_{Mac} = L_{Mbc} = L_M \quad (\text{mutua induzione})$$

Per cui i flussi associati ad ogni fase possono essere espressi dalle seguenti relazioni:

$$\lambda_a = L_a i_a + L_{Mab} i_b + L_{Mac} i_c + \lambda_{a,mg}$$

$$\lambda_b = L_b i_b + L_{Mab} i_a + L_{Mbc} i_c + \lambda_{b,mg}$$

$$\lambda_c = L_c i_c + L_{Mbc} i_b + L_{Mac} i_a + \lambda_{c,mg}$$

Solitamente i motori sincroni a magneti permanenti sono sprovvisti di filo di neutro e per tale motivo in ogni istante (per ogni t) è verificata la legge di Kirchoff:

$$\mathbf{i}_a + \mathbf{i}_b + \mathbf{i}_c = \mathbf{0}$$

ossia che la somma delle correnti di fase è pari a zero (infatti la legge di Kirchoff esprime che la somma algebrica delle correnti entranti in un nodo da sempre valore zero).

Considerando la simmetria degli avvolgimenti per ogni fase vale la relazione $L = L_i + L_M$ definita come induttanza sincrona e mediante la quale si possono riscrivere le equazioni che descrivono i valori dei flussi con le seguenti espressioni:

$$\lambda_a = L i_a + \Lambda_{mg} \cos(\theta_{me})$$

$$\lambda_b = L i_b + \Lambda_{mg} \cos(\theta_{me} - 2\pi/3)$$

$$\lambda_c = L i_c + \Lambda_{mg} \cos(\theta_{me} - 4\pi/3)$$

Per la determinazione delle induttanze sincrone L_d e L_q solitamente viene utilizzata una tecnica che prevede il funzionamento del motore con rotore fermo.

Nel caso di motori SPM, una volta trovato un valore, lo si può assegnare ad entrambe le induttanze in quanto sono uguali.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Al contrario invece per un motore di tipo IPM, come quello preso in esame, vengono effettuate due rilevazioni: la prima con una determinata posizione del rotore e si acquisisce tale valore, quella successiva invece si ripete andando a spostare il rotore in un'altra posizione.

All'induttanza L_d viene dato il valore maggiore mentre alla L_q viene assegnato il valore minore.

Questa metodologia non è precisa infatti si possono ricavare soltanto gli ordini di grandezza delle due induttanze ma non si ricava un valore preciso.

Inoltre tale prova viene effettuata con rotore fermo, ciò significa che le condizioni e le caratteristiche in gioco quando il motore viene messo in rotazione possono fornire risultati diversi.

3 DESCRIZIONE TEORICA DELLA MISURA

Come detto precedentemente il fenomeno che si è voluto sfruttare per questo elaborato è quello della saturazione incrociata (“cross saturation”).

Come dice la parola stesa tale fenomeno si verifica in corrispondenza del fenomeno di saturazione⁶ di un materiale ferromagnetico.

Prima di descrivere i passi necessari per tali misurazione si ritiene opportuno chiarire alcuni elementi per la comprensione della misurazione stessa.

Lo studio delle grandezze e i loro valori sono stati considerati con il sistema di riferimento rotante, ossia un sistema ortogonale d-q con velocità angolare $\omega_{dq}(t)$ rispetto a quello stazionario fisso con il rotore.

Per distinguere le due rappresentazioni si può esprimere una grandezza rispetto al sistema fisso a-b con il seguente vettore spaziale: $\mathbf{g}_{ab}^7 = g_a + jg_b$ oppure mediante la relazione in forma polare $|\mathbf{g}|e^{j\gamma_{ab}}$.

Mediante le stesse relazioni si esprime un vettore nel sistema di riferimento d-q: $\mathbf{g}_{dq} = g_d + jg_q$ che può essere espressa come $|\mathbf{g}|e^{j\gamma_{dq}}$. Le relazioni elencate sono le medesime e tra i moduli vale la seguente uguaglianza: $|\mathbf{g}_{ab}| = |\mathbf{g}_{dq}|$, mentre tra le fasi il legame è il seguente: $\gamma_{ab} = \gamma_{dq} + \theta_{dq}$ dove θ_{dq} è la posizione istantanea del sistema d-q rispetto al sistema a-b.

Dunque le due grandezze si possono legare mediante la seguente relazione:

$$\mathbf{g}_{dq} = \mathbf{g}_{ab} e^{-j\theta_{dq}}$$

La somma quadratica della corrente nell'asse q e d dal valore nominale della corrente.

Aumentando il livello di saturazione nel ferro il flusso di ciascun asse dipende ovviamente da entrambi le correnti anche se gli effetti, derivanti dalla propria, si evidenziano in maniera più marcata.

Nonostante questo in presenza di cross saturation, parte delle due correnti va ad influire anche dal flusso prodotto dall'altra.

La misurazione avviene per mezzo dell'allestimento di un banco di prova all'interno del Laboratorio di Azionamenti Elettrici (Sede DIE della facoltà), detto banco veloce, mediante il quale viene collegato il motore da testare.

Per il collegamento tra il motore di trascinamento, detto master, e il motore da testare sono stati impiegati opportuni giunti meccanici che si possono vedere dalle immagini sottostanti.

Tra motore e banco viene collegato un torsionmetro che può avere diverse tarature in termini di Nm, il quale è in grado di trasmettere al PC, ad esso collegato, il valore

⁶ Raggiungimento del valore massimo di magnetizzazione da parte di un materiale.

⁷ Le lettere in grassetto rappresentano che la grandezza in questione è vettoriale.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

che la coppia sta misurando durante il test. Il torsionmetro scelto per la prova ha una taratura pari 5 Nm.

Al motore sottoposto ad analisi viene collegata un'alimentazione trifase derivante dalla rete tramite un variac.



Fig.7 Foto del banco prova usato in laboratorio.

Collegato al banco e interagente con i due motori viene connesso un PC, dal quale, mediante la piattaforma di lavoro Matlab⁸, si può scambiare e ricavare dati dalla misurazione stessa in real-time. Questo è possibile mediante la realizzazione di codici Matlab che, in base a dati ricevuti dalla misurazione, elaborano tali valori e ricavano gli elementi richiesti.

La routine utilizzata era precedentemente realizzata per il raggiungimento dello stesso scopo, ma è stata ovviamente adeguata per le misurazioni che sono state realizzate.

Nel caso specifico la routine di Matlab ricava il valore dei flussi, diretto e in quadratura, in riferimento alla coppia di correnti fornite al motore e traduce tali dati in grafici, passando per l'inserimento dei dati di ogni misurazione in apposite matrici conservate nella memoria di Matlab.

Dal PC infatti era possibile andare ad impostare i range di valori per le correnti diretta ed in quadratura, ed il passo con cui venivano fatte variare.

La metodologia con cui vengono fatti variare i valori della corrente richiama appunto quella che è la tecnica della cross-saturation, ossia far variare il valore di una corrente con il passo prestabilito e per ogni valore di esso, si fa variare l'altra corrente per tutto il suo range con il suo passo.

⁸ Matlab è un piattaforma di lavoro in grado di gestire calcoli matematici e simulazioni di circuiti di controllo. La versione utilizzata è Matlab 7.7 R2008b

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Per quanto riguarda i flussi generati dalle due correnti valgono le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} \lambda_d = \lambda_d(i_d, i_q) \\ \lambda_q = \lambda_q(i_d, i_q) \end{cases}$$

Come espresso precedentemente e come si evince dalla relazione sovrastante, entrambi i flussi dipendono da tutte e due le correnti, i quali vengono calcolati di volta in volta mediante tali formule:

$$\Lambda_d(I_d, I_q) = \frac{U_q - RI_q}{\Omega_{me}} \qquad \Lambda_q(I_d, I_q) = \frac{U_d - RI_d}{\Omega_{me}}$$

Da tali due relazioni si vede che nel calcolo del flusso si necessita delle tensioni diretta e in quadratura (che rappresentano il calcolo fatto effettivamente della routine Matlab).

Tali valori delle tensioni venivano prelevate mediante opportune sonde di tensione.

Andando ad impostare i valori delle correnti si ricava i valori del flusso. In realtà dalle relazioni sopra descritte si vede che il ricavare del valore del flusso a seguito dell'impostazione delle correnti è una rilevazione indiretta in quanto il flusso viene calcolato in base alle tensioni.

Un aspetto da sottolineare è quello che la tecnica che sviluppa la cross saturation è unica nel suo genere, in quanto non sono presenti altre tecniche in grado di poter ricavare i medesimi risultati.

In questo caso si è deciso di andare ad impostare i valori di corrente e per ogni coppia di valori, forniti al motore, andare a ricavare il valore del flusso, in modo da ricavare matrici con al loro interno tutti i valori descritti dalla prova.

Si potrebbe decidere di partire dai valori della coppia, in funzione delle due correnti, per poi ricavare i valori del flusso, ma necessito sempre di un altro dato come valore delle correnti o delle tensioni. In ogni caso per il calcolo del flusso si devono sempre sfruttare le relazioni definite precedentemente.

4 DESCRIZIONE MISURA E RISULTATI

La misurazione realizzata in laboratorio è stata suddivisa in due parti principali basate sul differente impiego di due inverter.

Il primo inverter poteva sopportare un massimo di 6,5 A mentre il secondo 50 A.

Per l'estrazione dei dati dal funzionamento del motore, è stata utilizzata una routine realizzata nella piattaforma Matlab 7.7 la quale dava la possibilità di impostare il range di valori delle due correnti I_d e I_q e il passo con il quale le si faceva variare.

La scelta del passo determina, a parità di intervalli scelti per le correnti, il numero di punti di misura che si possono andare a ricavare, per poi andare a ricostruire la curva della caratteristica di magnetizzazione. Ovviamente maggiore è il numero di punti, maggiore sarà l'accuratezza della misura e maggiore sarà il numero di curve che risulteranno.

Tutti i risultati delle misurazioni vengono salvati in automatico, all'interno di matrici, dentro la piattaforma Matlab, in modo da poter accedere direttamente ai valori che hanno contraddistinto tale misurazione.

Dalle matrici si possono visualizzare tutti i dati per ogni coppia di correnti che interagiscono col motore.

Oltre ad un fattore grafico la scelta del valore del passo da utilizzare va ad incidere sulla durata stessa della misurazione, comportando il conseguente surriscaldamento del motore sia per gli avvolgimenti in rame, sia per quanto riguarda la struttura in ferro.

Per ogni misurazione infatti, e di conseguenza per tutti i possibili valori delle correnti, l'elaborazione durava all'incirca 15 secondi, e questo andava ad incidere sul tempo complessivo della prova stessa.

All'interno della routine vi erano previste l'inserimento di pause nel tentativo di evitare che il motore eccedesse nella temperatura.

Tale dato della temperatura è stato monitorato, tramite opportuna sonda, in tutte le misurazioni (con maggiore significato nelle ultime due) in modo da capire fino a quanto il motore riusciva ad essere spinto.

Oltre a questo aspetto va segnalato che sia motore sia banco di prova sono stati sottoposti a ventilazione in maniera tale da non portare le temperature degli elementi suddetti a valori che potevano esser considerati pericolosi.

Grazie alla routine di Matlab si ricava la coppia massima erogata dal motore (in quanto per ogni coppia di correnti la routine andava anche a ricavare il valore della coppia corrispondente) che verrà caso per caso indicata.

Come si può vedere dalla figura con i parametri inseriti nella routine si ottengono grafici con un numero di curve elevato le quali hanno lo stesso andamento, tanto che in certi punti si sovrappongono fino ad essere indistinguibili.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

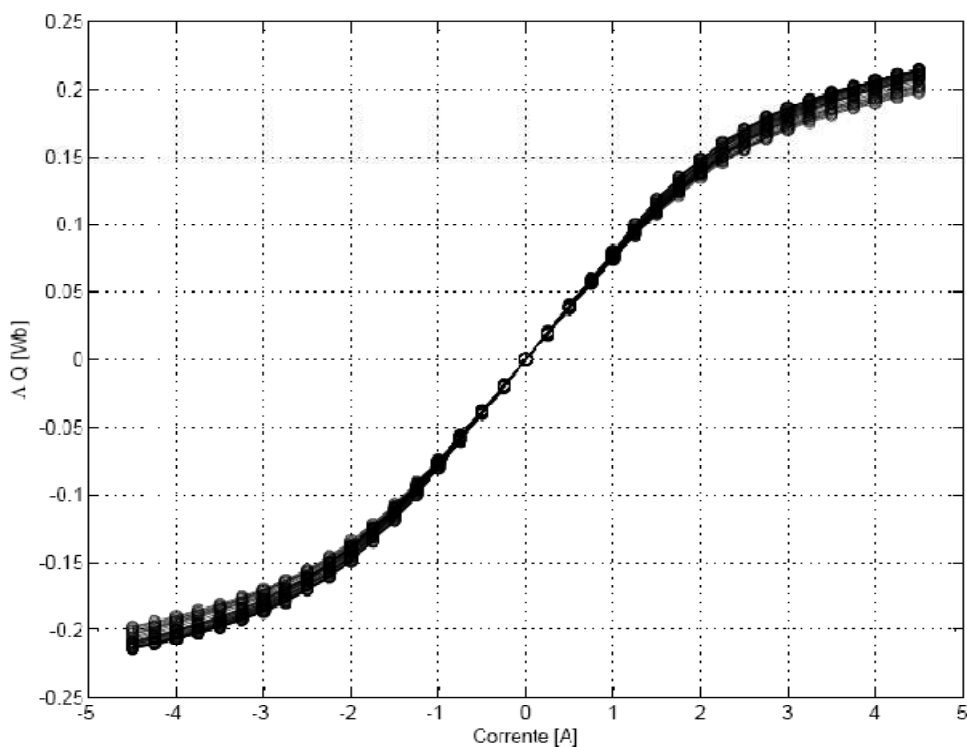


Fig.8 Esempio di grafico derivante dall'elaborazione Matlab

Per facilità di interpretazione del grafico e per una migliore chiarezza si è deciso di estrapolare da ogni elaborazione tre curve ritenute più significative.

In questo caso specifico le curve con correnti massime positive e negative e il caso in cui le due correnti valgono zero.

Un'operazione necessaria per lo svolgimento delle prove era quella della fasatura del motore, ossia dare allo stesso, il punto di riferimento zero su cui basare la misura.

Tale operazione si divide in due parti: la prima si tratta di una fasatura manuale mediante la quale si agiva manualmente sul motore per garantire il verso diretto dello stesso e trovare lo "zero".

Una volta messo in tensione il banco, si faceva ruotare il motore di un giro, nel verso diretto di rotazione, per riportarlo poi sempre nella stessa posizione.

Una volta fatto questo passaggio si dava il via alla fasatura automatica dettata dalla routine, la quale realizzava una fasatura in tre modalità diverse per poi scegliere la migliore.

Durante tale operazione si poteva visualizzare, tramite il monitor del PC, se tale fasatura poteva considerarsi corretta oppure se si riteneva necessario ripetere la procedura.

Questo era reso possibile dalla routine stessa in quanto, terminata l'elaborazione, andava a visualizzare un valore di fasatura sul display che, per ogni misurazione, si doveva mantenere il più possibile uguale.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

4.1 APPARATO STRUMENTALE

I test sono stati realizzati all'interno del Laboratorio di Azionamenti elettrici mediante tale strumentazione:

- VARIAC: potenza = 3,5 kVA
V_{max} = 220V
I_{max} = 16 A
- TESTER: necessario per monitorare il valore di tensione durante la prova
- MOTORE Elux 7B 2 poli, coppia nominale 1,3Nm,
con corrente nominale 3A
- TORSIOMETRO: tarato a 5 Nm
Sensibilità 1000mV/Nm
Max speed 20000 min⁻¹
- INVERTER: a corrente impressa controllato da scheda dSpace e Matlab
- MOTORE BANCO PROVA (master) m.a.t. vel max = 2250 rpm
V_{max} = 360 V
- ALIMENTATORE 24 V
- DUE SONDE DI TENSIONE: Agilent, V_{max} 700 V
- COMPUTER: con installata la piattaforma Matlab 7.7

4.2 MISURAZIONI EFFETTUATE

Un elemento comune a tutte le misurazioni è la velocità con cui è stato fatto girare il motore che è di 500 RPM. La scelta della velocità è caduta su tale valore, ma si potevano realizzare le stesse misurazioni con velocità diverse, ma il risultato non sarebbe variato in quanto i valori dei flussi non sono dipendenti dalla velocità di rotazione del motore.

La prima misurazione è stata effettuata facendo variare le 2 correnti da -4.5 a +4.5 Ampere (ovviamente si è voluto spingersi al limite in maniera da sfruttare l'inverter a pieno) con passo di 0,25 Ampere per entrambe.

Il programma mediante il quale si riescono a estrapolare i punti sul piano per poi realizzare i grafici presenta anche un ciclo "IF", il quale non avrebbe permesso l'esecuzione della misurazione nel caso in cui la somma dei quadrati delle correnti sotto radice superasse il valore limite dettato dall'inverter che in questa prima fase era di 6,5A.

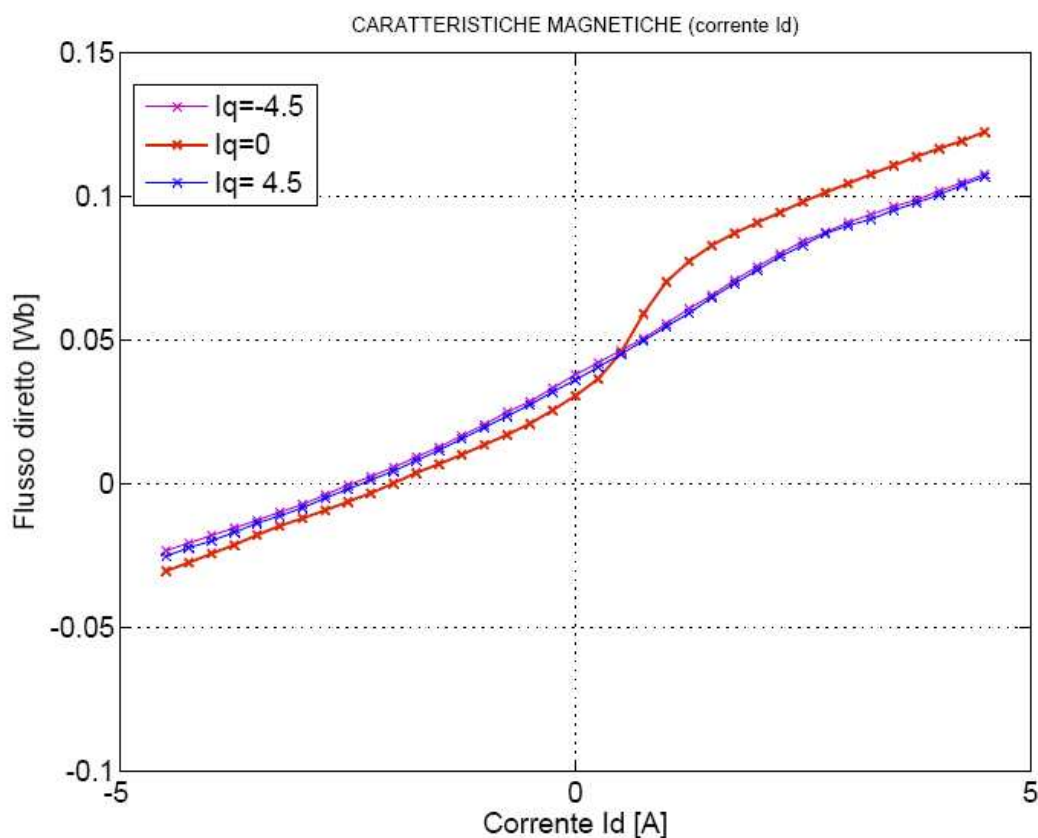
Con i parametri inseriti si garantiva ovviamente che la routine potesse svolgere senza problemi il suo lavoro, mentre, come si vedrà in seguito, nel caso tale limite venga superato, di default veniva assegnato il valore 99 e non veniva realizzata la misurazione.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

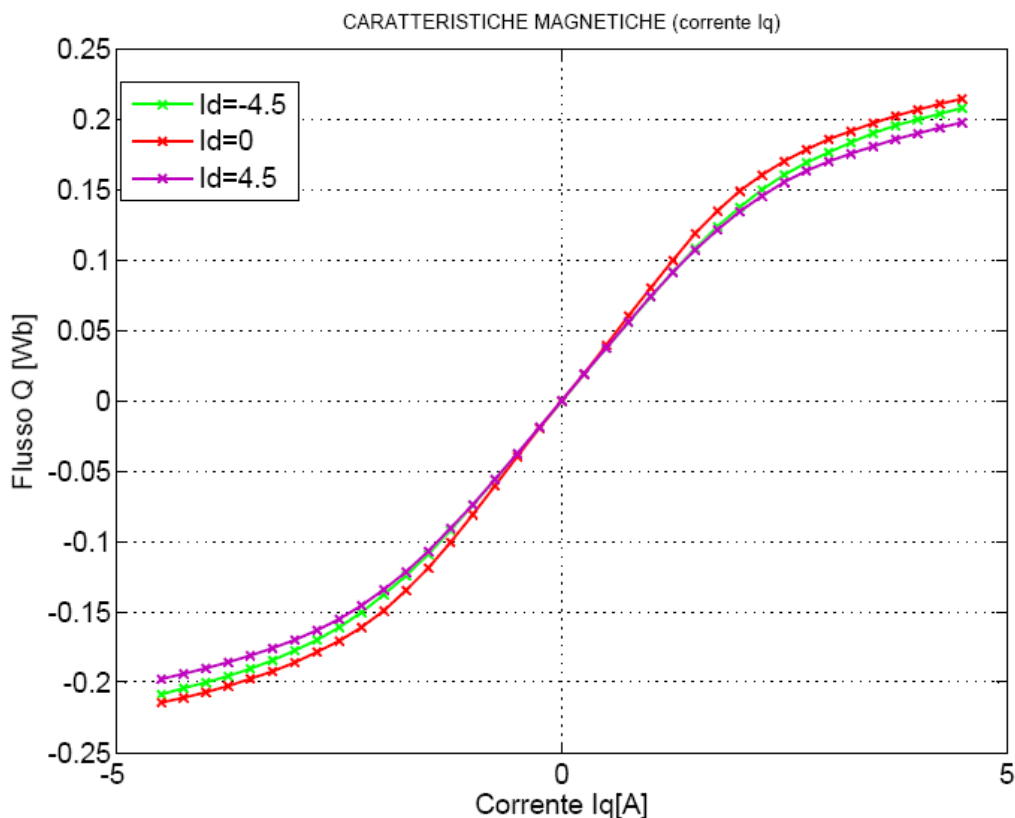
DATI RACCOLTI:

- la durata di tale misurazione è di 5 ore e 25 minuti
- durante la quale il motore ha presentato un surriscaldamento (sempre sottoposto a getto d'aria da parte di una ventola) sia per quanto riguarda gli avvolgimenti in rame sia per quanto riguarda la struttura in ferro non superiore ai 36°C (si notava che la temperatura seguiva direttamente il valore assunto della corrente in quanto a valori di corrente crescente anche la temperatura saliva).
- quando il motore veniva sottoposto a correnti di valore negativo si poteva registrare qualche scossone sul banco di prova in quanto va sottolineato che il motore durante la prova passava da funzionamento "generatore" a funzionamento "utilizzatore".
- la coppia massima registrata in tale situazione è in valore assoluto 2.5701 Nm registrata con la combinazione di correnti $I_q = -4.5$ A e $I_d = -4.5$ A

Il grafico risultante è il seguente:



PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI



La seconda misurazione è stata realizzata con la medesima strumentazione solo che si è andati a variare il valore del passo delle singole correnti ponendole uno diverso dall'altro e un range di correnti da -6 a 6 Ampere.

Come primo tentativo si è fatto variare la I_q con un passo di 1 Ampere mentre per la corrente I_d si è mantenuto il passo della prova precedente con 0.25 Ampere.

Tra le diverse coppie di correnti che potevano essere sottoposte al test di misure, volutamente, ne sono state inserite alcune che superavano il limite dettato dall'inverter e che di conseguenza aprivano un altro ramo di istruzioni nella routine di Matlab.

Ovviamente si parla delle coppie di corrente la cui somma quadratica supera i 6,5 A, posti come limite, ai quali durante la misurazione veniva di default inserito il valore 99.

L'obiettivo in questo caso era valutare che sia la routine sia il motore fossero in grado di reagire in maniera simile alla prova precedente e successivamente verificare eventuali differenze ottenute dal confronto numerico delle matrici e quello grafico delle curve risultanti.

Le matrici ricavate presentavano per molte posizioni il valore 99 e per tali motivi i grafici sono stati realizzati andando a restringere il range di valori applicato.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

La figura sottostante rappresenta il risultato ottenuto con tale misurazione:

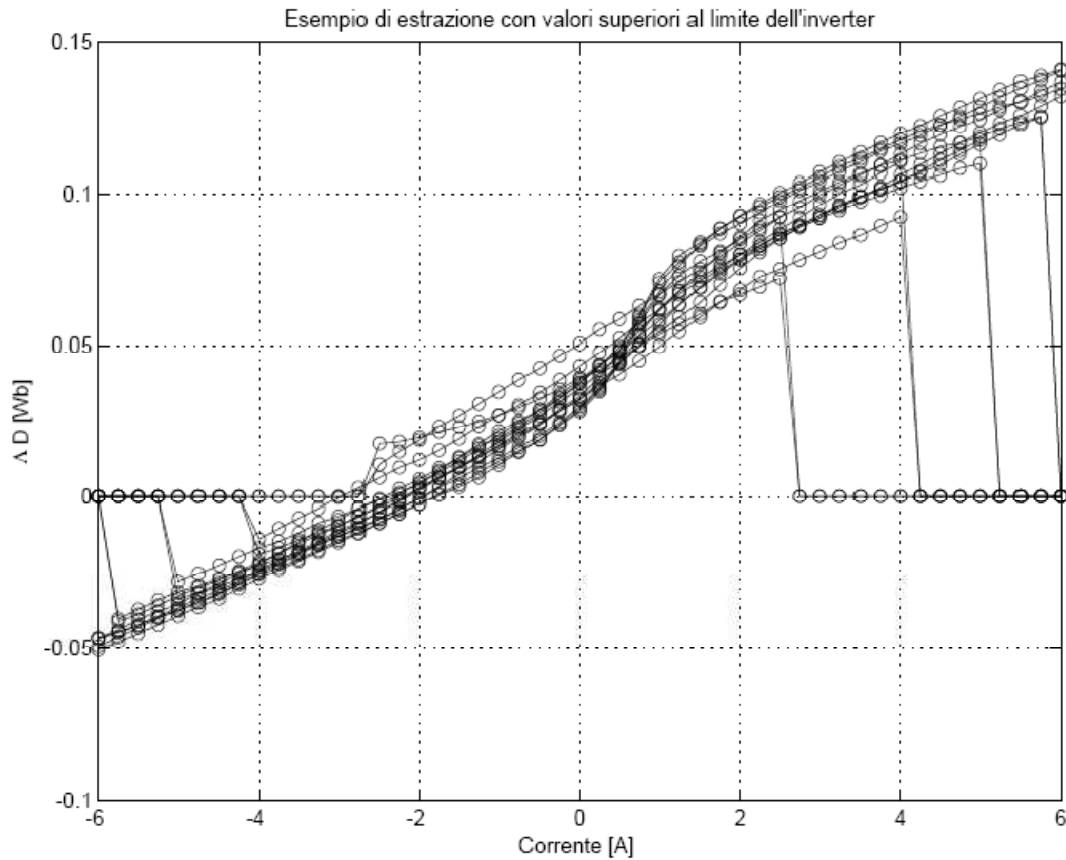


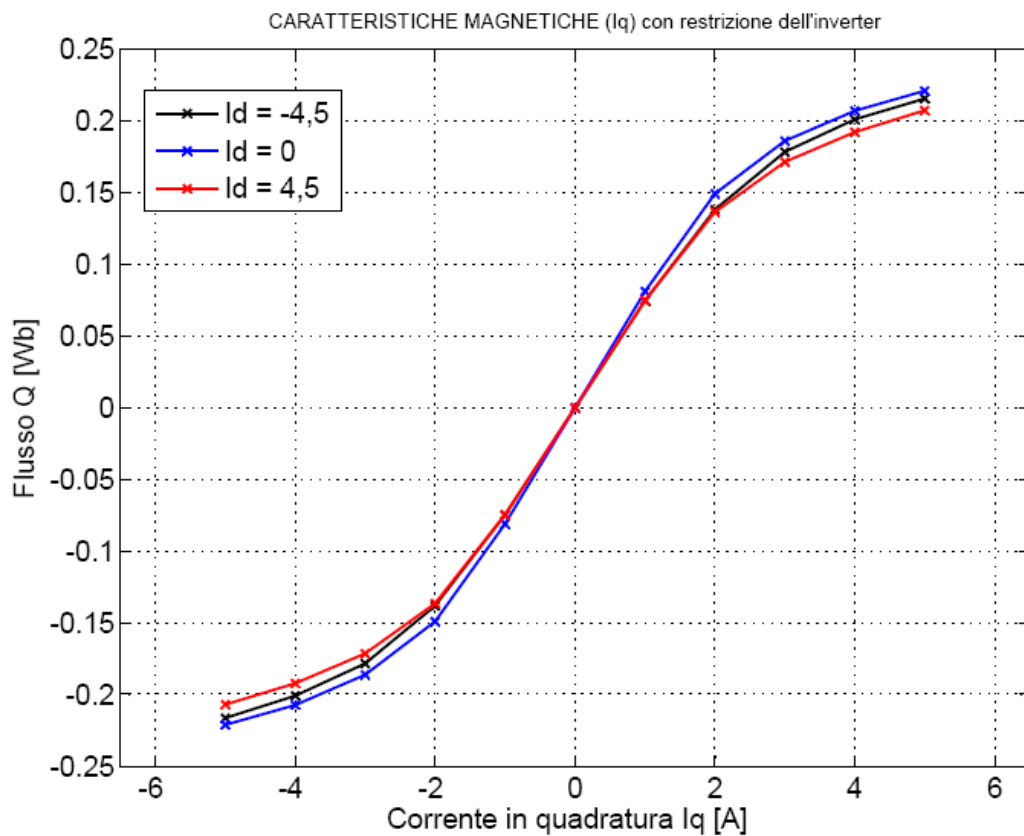
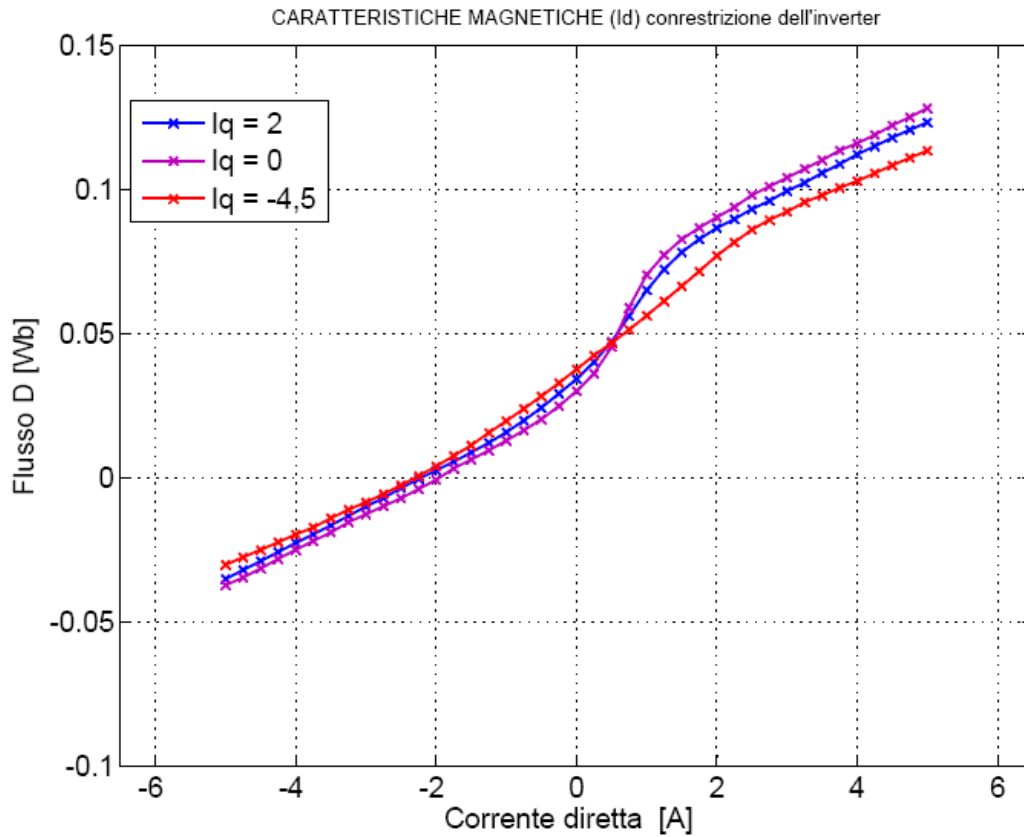
Fig.7 Esempio di grafico da elaborazione Matlab con limitazioni.

DATI RACCOLTI:

- la durata della misurazione è stata di 2 ore 40 minuti
- durante tale misurazione non si sono verificati fenomeni di surriscaldamento del motore (sempre sottoposto a getti di aria) inoltre perché, come sopra citato, per molte coppie i correnti non vi è stata effettiva misurazione.
- la coppia massima che si è potuta registrare in valore assoluto è di 2,741 Nm per la coppia di correnti $I_d = -5.75$ A $I_q = 3$ A.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

I grafici che sono stati estrapolati sono:



PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

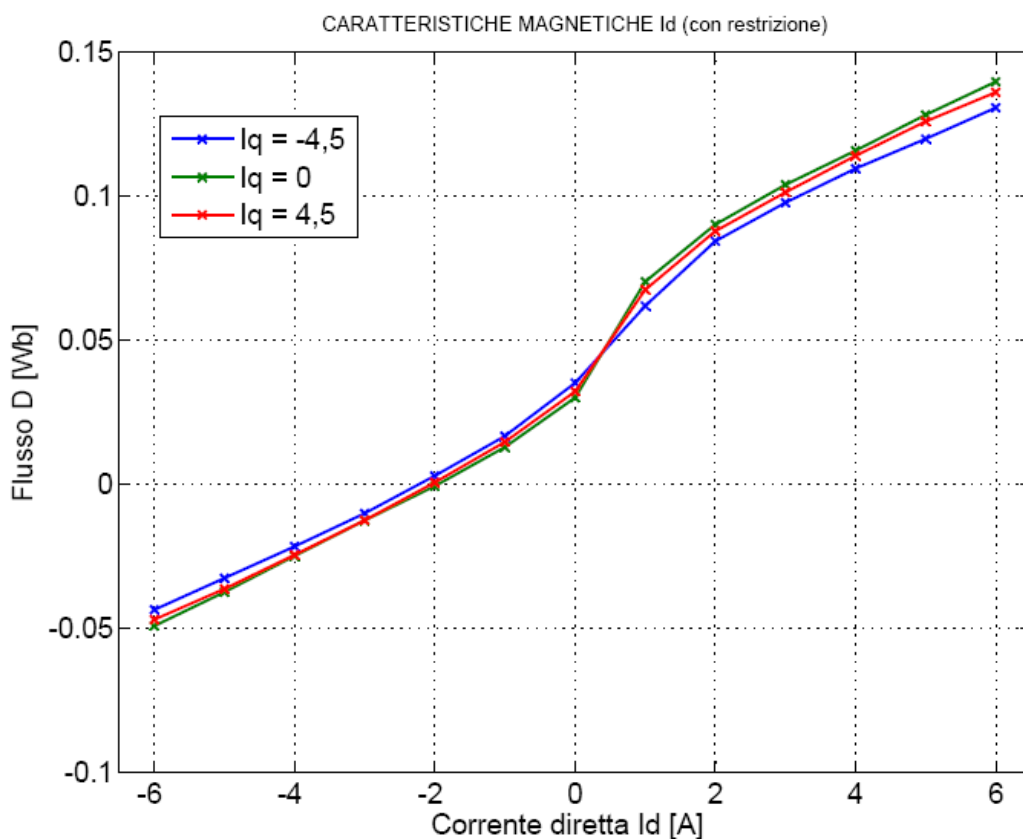
La terza misurazione è stata realizzata in “fotocopia” di quella precedente, con l’unica modifica di rilievo, quella dello scambio dei passi utilizzati per far variare le correnti durante la prova: $I_q = 0.25$ A e $I_d = 1$ A.

Le problematiche e le considerazioni fatte precedentemente possono essere rifatte anche in questa prova.

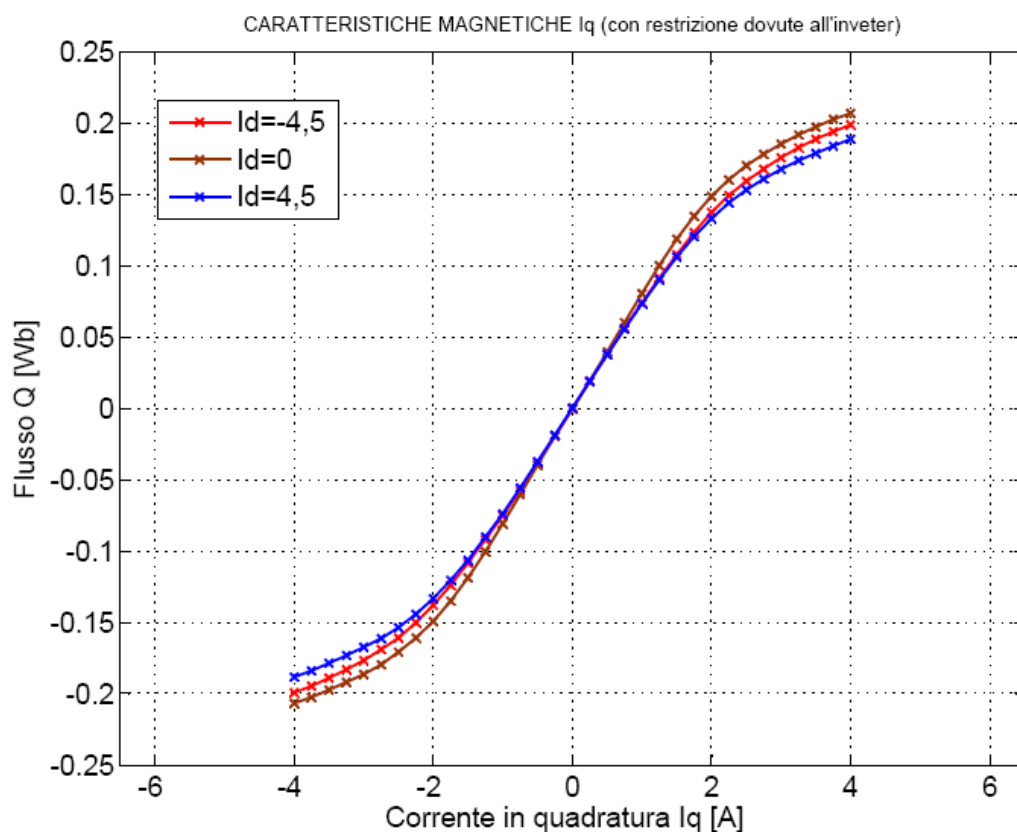
DATI RACCOLTI:

- la durata della prova è stata di 2 ore e 40 minuti
- durante tale misurazione non si sono verificati fenomeni di surriscaldamento del motore (sempre sottoposto a ventilazione), inoltre anche perché come sopra citato, per molte coppie di correnti non vi è stata effettiva misurazione e di conseguenza nessuna trascrizione di dati.
- la coppia massima che si è potuta registrare in valore assoluto è di 2,6933 Nm per la coppia di correnti $I_d = -5$ A $I_q = 4$ A.

I grafici risultanti sono i seguenti:



PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI



Con la quarta misurazione si entra nella seconda parte dei test effettuati, ossia quelli in cui viene utilizzato l'inverter da 50 A. Questa sostituzione è stata realizzata per dare la possibilità di sfruttare a pieno tutte le correnti del range che prima non era possibile utilizzare, ed ovviamente, vedere la reazione del motore sottoposto a tali correnti.

Da sottolineare in questa fase la sostituzione della routine di Matlab con una dello stesso significato ma parametricamente adeguata al nuovo inverter.

Nelle misurazioni che faremo non verrà mai superato tale limite per motivi fisici di struttura del motore e degli strumenti utilizzati, però anche in questa situazione la routine era stata realizzata in modo da far fronte a questa circostanza.

Utilizzando sempre un range di valori per le due correnti di ± 6 A, uno degli effetti collaterali che ci si poteva aspettare era quello di un surriscaldamento eccessivo da parte del motore. Per tale motivo si è andati ad inserire all'interno della routine in Matlab delle pause preventive, tra ogni misurazione e la successiva, in modo da non sovraccaricare il motore di troppe misurazioni consecutive.

L'inconveniente di utilizzare un inverter con un ampio limite di corrente, per poi considerarne una minima parte, è quello di non sfruttare lo strumento nel migliore dei modi e che quindi il valore della misurazione risulti essere meno preciso che non con un funzionamento diverso.

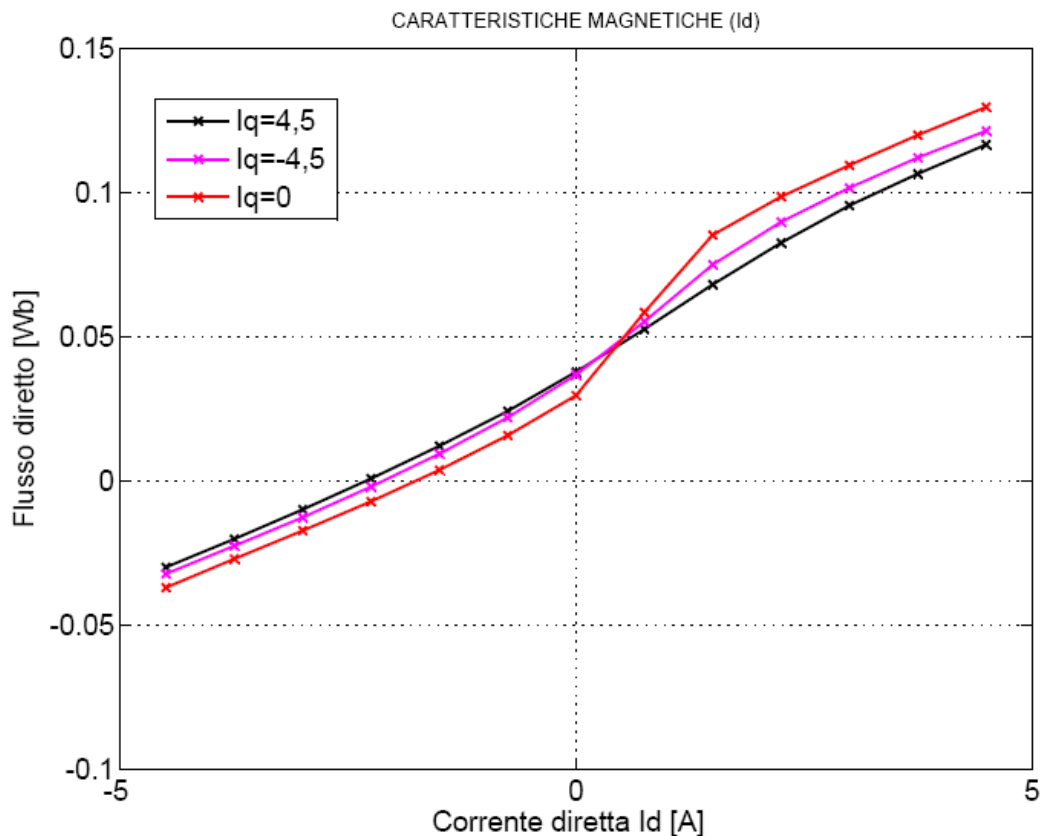
PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Durante questa quarta misurazione si sono fatte variare le due correnti nel range di valori di ± 4.5 A con un passo unico di 0.75 A con lo scopo di fare un confronto con la misurazione effettuata con l'inverter da 6,5 A.

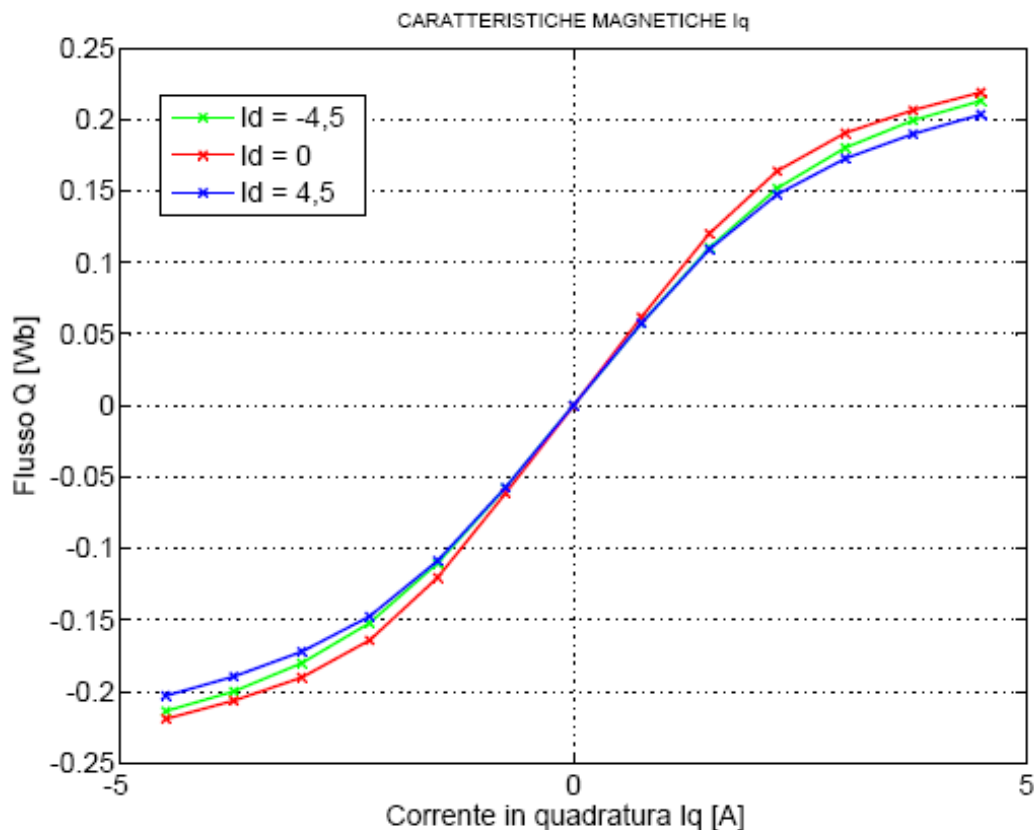
DATI RACCOLTI:

- la durata di tale misurazione è stata di 3 ore e mezzo circa.
- la prova realizzata presentava una durata di rilievo per cui le temperature degli avvolgimenti e delle strutture in ferro che si sono registrate arrivavano a circa 40°.
- durante le prove effettuate con l'inverter da 50 A si deve anche registrare la rilevazione, da parte del voltmetro, di alcuni picchi di tensione detti "spike", alcuni anche arrivati a 1000 V, che però non presentavano reale potenza. Tale affermazione è stata verificata in quanto, al circuito di prova, è stato inserito un chopper che in caso di superamento del valore di 380 V interviene in modo da dissipare la potenza su alcune resistenze. Durante la misura però il dispositivo non entrava in funzione. Gli spike di tensione (esistono anche gli spike di corrente) identificano dei picchi del valore misurato di brevissima durata.
- la coppia massima che si è registrata durante questa misurazione prende il valore di 2.5306 Nm con le correnti $I_d = I_q = -4,5$ A.

I grafici relativi a tale misurazione sono:



PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI



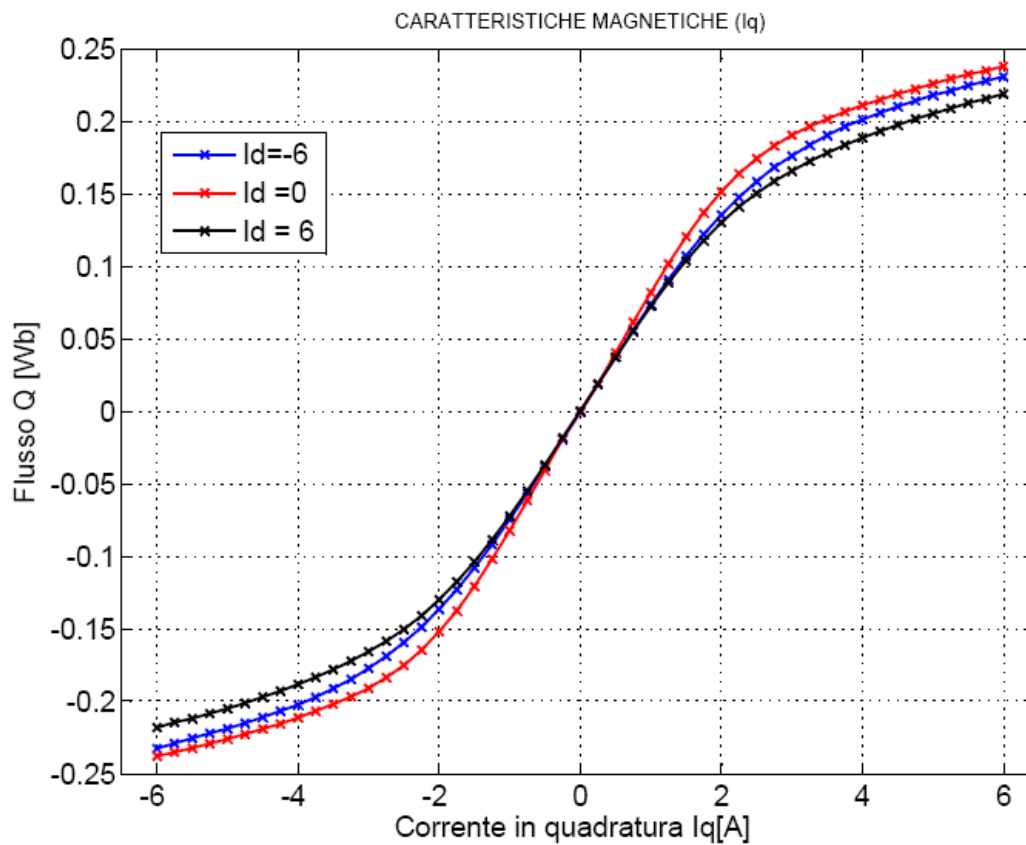
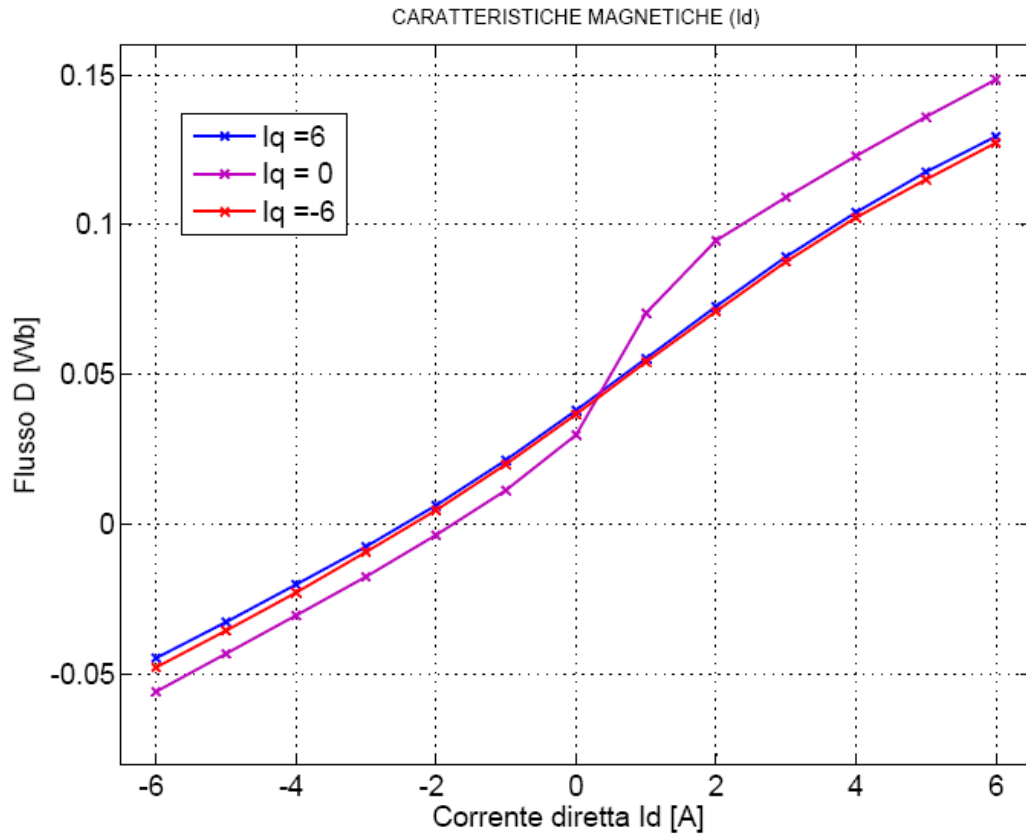
La quinta e la sesta misurazione sono state effettuate andando a variare il range di valori delle correnti, portati a ± 6 A, usando però due passi diversi per le due correnti. Durante il primo dei due test conclusivi si è utilizzato come passo per la corrente diretta il valore di 1 Ampere mentre per la corrente in quadratura il valore di 0.25 Ampere.

DATI RACCOLTI:

- la durata di tale misurazione è stata di 3 ore circa.
- nonostante la prova non sia stata la più lunga di quelle effettuate, a causa del picco di correnti elevato, che si registrava durante il funzionamento con le coppie di correnti con valori assoluti superiori a 4 A, la temperatura degli avvolgimenti e della struttura in ferro, nonostante fossero costantemente sottoposti a getti d'aria, hanno raggiunto rispettivamente temperature intorno ai 40° per il rame e 46° per la struttura in ferro (senza compromettere la misurazione stessa).
- anche in questa misurazione viene segnalata la presenza di picchi di tensione che però non rappresentavano una potenza reale da dissipare.
- la coppia massima che si è registrata invece sale di valore e si assesta su 3.4162 Nm per la coppia di correnti (-6,-6)A.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

I grafici relativi a tale prova sono:



PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

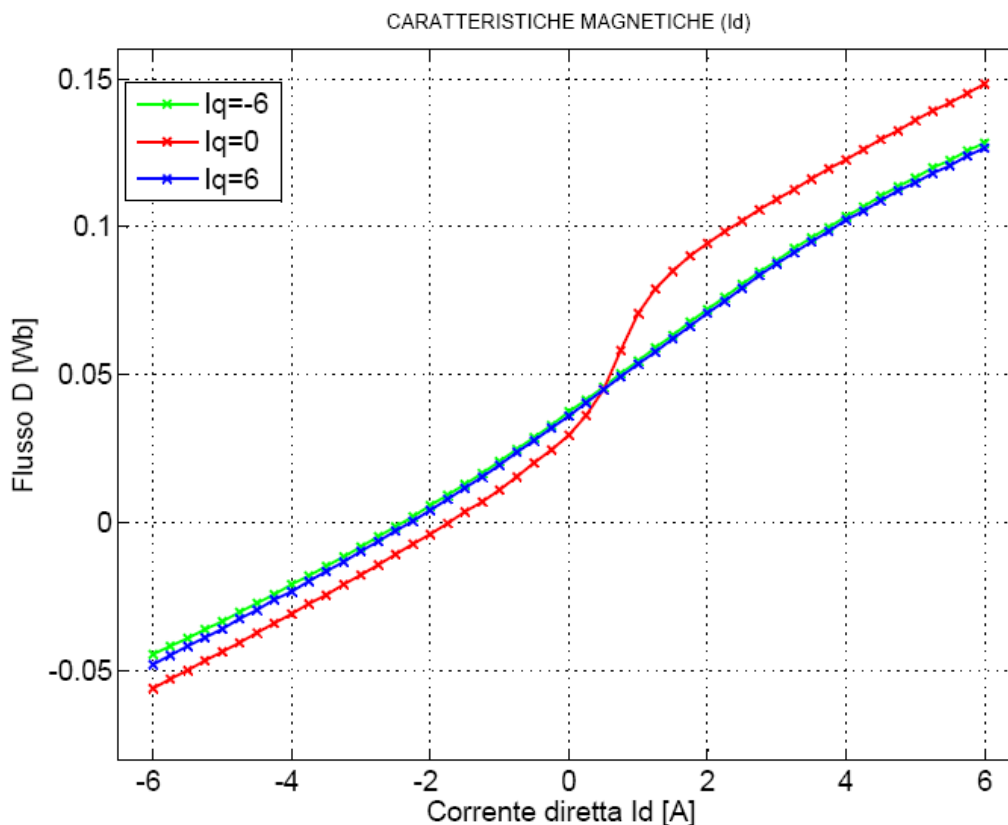
La sesta ed ultima misurazione che è stata effettuata presenta le medesime caratteristiche di quella precedente solo con i passi delle due correnti invertiti: $I_q = 1$ A e $I_d = 0,25$ A.

Per garantire che le due prove avvenissero alle medesime condizioni prima di dare il via alla routine di misura si è atteso un tempo utile per garantire al motore sotto test ed al banco prova di abbassare la temperatura fino ad arrivare a quella ambiente.

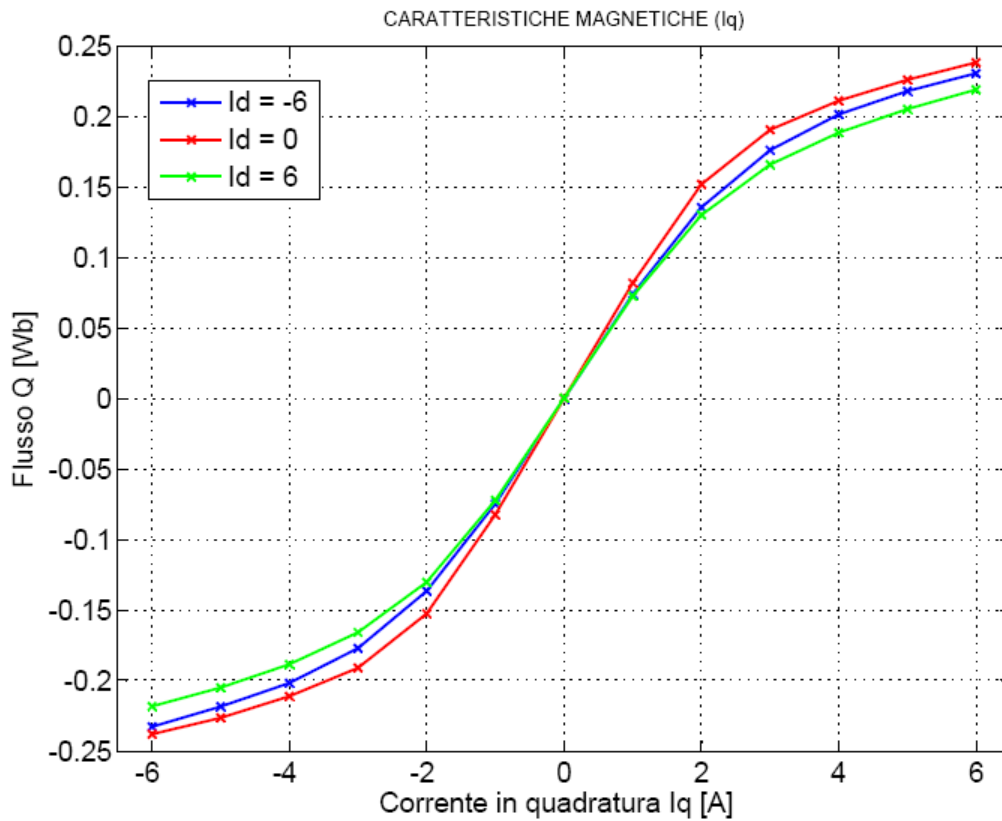
DATI RACCOLTI:

- la durata di tale misurazione è stata di 3 ore circa.
- nonostante la prova non sia stata la più lunga di quelle effettuate, a causa del picco di correnti elevato che si registrava durante le coppie di correnti con valori assoluti superiori a 4 A, la temperatura degli avvolgimenti e della struttura in ferro, nonostante fossero costantemente a getti d'aria, hanno raggiunto rispettivamente temperature intorno ai 40° per il rame e 46° per la struttura in ferro (senza compromettere la misurazione stessa).
- anche in questa misurazione viene segnalata la presenza di picchi di tensione che però non rappresentavano una potenza reale da dissipare.
- la coppia massima che si è registrata invece sale di valore e si assesta su 3.4153 Nm per la coppia di correnti (-6;-6)A.

Grafici relativi all'ultima elaborazione:



PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI



In entrambe le misurazioni in cui i passi utilizzati erano differenti si può vedere graficamente che, nel caso si faccia riferimento alla corrente con passo 1 A, i punti ricavati per il grafico sono più distanti tra loro comportando un andamento delle curve simili ad una linea spezzata (rispettando comunque l'andamento).

Mentre quando si fa riferimento al passo di 0,25 A l'andamento delle curve risulta più accurato.

5 CONCLUSIONI

DIFFERENZE RISCONTRATE:

Un primo confronto è stato realizzato tra i due grafici ottenuti eseguendo la misurazione con il medesimo passo per tutte e due le correnti, ma con inverter differenti, sui valori massimi e minimi assunti dal valore del flusso in funzione del valore della corrente.

I dati sono riassunti nella seguente tabella:

	CROSS SATURATION Q			
	Inverter 6,5 A	Inverter 50 A	Differenza	Errore %
valore massimo[Wb]	0,2148	0,2191	0,0043	2,001862
valore minimo [Wb]	-0,2144	-0,2193	0,0049	2,285448
	CROSS SATURATION D			
	Inverter 6,5 A	Inverter 50 A	Differenza	Errore %
valore massimo [Wb]	0,1224	0,1297	0,0073	5,964052
valore minimo [Wb]	-0,03055	-0,03237	0,00182	5,62244

Tutti i valori riportati in tabella sono dei valori di flusso e quindi definiti in Weber.

Come descritto dalla tabella riassuntiva i valori massimi e minimi assumono valori diversi con l'utilizzo dei due diversi inverter, seppur con differenze minime.

L'obiettivo era valutare le eventuali discrepanze ed, oltre naturalmente alla sostituzione dell'inverter, quali potevano essere le cause di tali differenze.

Alcune di esse possono essere ricondotte alla durata della prova e al conseguente surriscaldamento, oltretutto le due misurazioni sono state realizzate in giorni diversi.

Dai dati ricavati dai grafici su valori massimi e minimi in riferimento alla corrente di quadratura, si può notare che ogni curva passa per il punto (0,0) e denota una simmetria rispetto all'origine (come si può vedere infatti sia valori massimi e minimi assumono circa gli stessi valori considerandoli in valore assoluto).

Per i grafici che descrivono invece il flusso in funzione della corrente diretta si registra che tutti i grafici presentano punto medio attorno al valore di 0,03 Wb.

Per quanto riguarda quelle che sono le misurazioni utilizzando passi diversi per le correnti I_d e I_q non si possono fare le stesse considerazioni in quanto per l'inverter da 6,5 A, le correnti sopra i 4 A non davano riscontro di misurazione.

Nonostante questo si possono ricavare dei valori che possono essere indice di conferma di andamenti e punti "focali" riscontrati nelle considerazioni precedenti.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

Segue la tabella:

	CROSS SATURATION D		CROSS SATURATION Q	
	INVERTER 6,5 A	INVERTER 50 A	INVERTER 6,5 A	INVERTER 50 A
valore massimo [Wb]	0,1282	0,1483	0,2384	0,207
valore minimo [Wb]	-0,05608	-0,03744	-0,238	-0,2068

Da tali valori si può notare che per quanto riguarda le curve riguardanti la corrente in quadratura, viene rispettata la simmetria rispetto all'origine degli assi (che viene attraversato da ogni curva).

Per quanto riguarda i dati raccolti sulla corrente diretta vale sempre il passaggio delle curve per il punto medio di valore 0,03 Wb.

Un aspetto comune in tutti i grafici, e che va a sottolineare il fenomeno della saturazione, è quello che si può notare quando le curve raggiungono un andamento praticamente lineare.

Sia per la caratteristica diretta che per la caratteristica in quadratura si possono notare infatti, due punti di flesso oltre i quali appunto, l'andamento delle curve tende ad assomigliare a quello di una retta; là si riscontra l'inizio della saturazione magnetica.

Per quanto riguarda l'utilizzo dei due diversi inverter si può dire che per il fine delle misurazioni realizzate hanno dato, se pur con qualche differenza, gli stessi risultati nonostante l'inverter da 50 A sia stato "sfruttato" solo per un minimo della sua reale capacità.

Per quanto riguarda il motore sottoposto all'analisi un aspetto da segnalare è che, durante la fase di tutte le misurazioni non ha presentato comportamenti anomali nonostante sia stato sottoposto a correnti spesso superiori al suo valore nominale.

In relazione a quanto detto precedentemente si sottolinea la coppia sviluppata dal motore, sempre in riferimento al suo valore nominale.

Alla corrente nominale di 3 A la coppia nominale è di 1.3 Nm. Durante la misurazione invece si è riusciti a spingere il motore fino ad una coppia del valore di 3.4162 Nm per la coppia di correnti (-6,-6)A ricavata dalla quinta prova realizzata che è quasi tre volte quella nominale.

Nonostante questo caso anche per tutte le altre misurazioni, come indicato nelle diverse prove, il valore della coppia superava quello nominale.

In tale caso specifico, questa combinazione si forniva al motore una corrente complessiva di $\sqrt{I_d^2 + I_q^2}$ pari a circa 8,5 A con ovvia conseguenza del surriscaldamento del motore.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

La tabella sottostante riassume i valori massimi raggiunti dal motore da punto di vista della coppia nelle misurazioni effettuate:

numero prova	prima	seconda	terza	quarta	quinta	sesta
coppia di correnti [A] (I_d, I_q)	(-4,5;-4,5)	(-5,75; 3)	(-5;4)	(-4,5;-4,5)	(-6;-6)	(-6;-6)
valore max coppia [Nm]	2,5701	2,741	2,6933	2,5306	3,4162	3,4153

Nonostante questo probabilmente, si poteva forzare ancora di più il motore con il rischio, ovviamente, di poter rovinare gli avvolgimenti stessi e una conseguente distorsione dei dati che in tale caso si andavano a ricavare.

Durante le prove realizzate, per verificare la corrispondenza tra i valori descritti sulla piattaforma Matlab e quelli che effettivamente arrivavano al motore, è stata utilizzata una pinza amperometrica collegata ad un oscilloscopio.

Da tale rilevazione si è potuto appurare che i valori impartiti dalla routine erano quelli effettivi, guardando il valore medio della sinusoide, in quanto ad essa si sommavano dei disturbi che non rendevano pulito il segnale.

Alcuni aspetti negativi che sono stati riscontrati, che potevano in qualche modo andare ad influire in modo negativo sulla prova sono i seguenti:

- per quanto riguarda i giunti di connessione tra motore e master poteva essere riscontrato un “gioco”, seppur minimo, tra gli agganci meccanici;
- fino a che la prova non terminava non veniva salvato alcun dato, con la diretta conseguenza che una inaspettata interruzione della prova, che poteva essere dovuta alla routine o al banco, faceva perdere tutti i dati registrati precedentemente. Questo si riflette anche sul fatto che non era possibile vedere se la prova stava procedendo in maniera ottimale o no fino al termine della stessa, comportando in caso di esito negativo, il dover ripetere dall’inizio la prova (per evitare questo ad ogni inizio di misurazione ne veniva effettuata una di verifica sia per la routine che per il motore);
- la fase di fasatura del motore descritta, comportando una parte manuale, non dava precisamente sempre gli stessi valori;

Al momento dell’acquisto di un motore di tale tipo, la caratteristica di magnetizzazione non è presente all’interno del comune datasheet ad esso collegato, ma all’atto della costruzione è uno dei test che vengono effettuati per capire determinate caratteristiche del motore.

Inoltre quando viene fornita, la caratteristica di magnetizzazione, presenta solamente un’unica curva e la scelta ricade su quella con I_d ed I_q pari a zero.

In conclusione è stata realizzato un confronto con delle misure della caratteristica di magnetizzazione, effettuate sullo stesso motore, ma che andava a ricavare solamente la caratteristica di magnetizzazione con I_d ed I_q pari a zero.

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI UN MOTORE SINCRONO A MAGNETI PERMANENTI

La tecnica in questo caso consisteva nel mantenere la corrente diretta o la corrente in quadratura a 0 A, facendo variare l'altra, nel range per essa prestabilito. Con tale procedimento si ricava un'unica curva di magnetizzazione sia per la I_d che per la I_q . Mettendo a confronto le figure si poteva notare che l'andamento, per tutti e due i tipi di curva, era rispettato, riconoscendo anche in tali curve, i punti comuni e le simmetrie registrate dai grafici realizzati per tale esperienza.

Questo va a dimostrare che la tecnica per la ricostruzione delle caratteristiche di magnetizzazione, mediante cross saturation, porta a medesimi risultati, coinvolgendo ambedue le correnti nella deduzione del flusso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Dispensa del corso “Azionamenti Elettrici 1”, Silverio Bolognani,2008
- [2] http://www.wikipedia.com/Motore_Brushless
<http://www.wikipedia.com/Magnetizzazione>
<http://www.wikipedia.com/Saturazione>
<http://www.wikipedia.com/Spike>
- [3] Grande Enciclopedia della scienza e della tecnologia, DeAgostini,1997
- [4] User’s Guide, Agilent technologies
- [5] Guida a MatlabR2008b version7.7, 2008