



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI TECNICA E GESTIONE DEI SISTEMI INDUSTRIALI

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA MECCANICA E MECCATRONICA

CURRICULUM MECCATRONICO

**STIMA AUTOMATICA DEI PARAMETRI NEI MOTORI ASINCRONI**

**AUTOMATIC PARAMETERS ESTIMATION IN IM MOTOR DRIVES**

RELATORE: CH.MO PROF. MAURO ZIGLIOTTO

CORRELATORE: ING. ANDREA GHIRARDELLO

LAUREANDO : LUCA TAGLIAPIETRA

ANNO ACCADEMICO: 2012-2013

# I N D I C E

<b>A.</b>	<b><u>APPENDICE DI TERMINOLOGIA</u></b>	<b>Pag.3</b>
<b>B.</b>	<b><u>SOMMARIO</u></b>	<b>Pag. 5</b>
<b>1.</b>	<b><u>PREMESSA</u></b>	<b>Pag. 6</b>
<b>2.</b>	<b><u>DESCRIZIONE DEL BANCO</u></b>	<b>Pag. 10</b>
<b>2.1</b>	<b>DISPLAY E TASTIERA</b>	<b>Pag. 10</b>
<b>2.1.1</b>	<b>LED</b>	<b>Pag. 10</b>
<b>2.1.2</b>	<b>TASTI</b>	<b>Pag. 10</b>
<b>2.2</b>	<b>PARAMETRI</b>	<b>Pag. 12</b>
<b>2.2.1</b>	<b>MODIFICA DEI PARAMETRI</b>	<b>Pag. 12</b>
<b>2.2.1</b>	<b>ELENCO PARAMETRI</b>	<b>Pag. 12</b>
<b>2.2.2</b>	<b>SEGNALI ANALOGICI</b>	<b>Pag. 14</b>
<b>2.3</b>	<b>ENCODER</b>	<b>Pag. 15</b>
<b>2.4</b>	<b>FUNZIONAMENTO DEL FRENO</b>	<b>Pag. 15</b>
<b>2.5</b>	<b>MOTORE</b>	<b>Pag. 16</b>
<b>2.3.1</b>	<b>CONFIGURAZIONE 0 (Normale funzionamento In orientamento di campo)</b>	<b>Pag. 16</b>
<b>2.5.2</b>	<b>CONFIGURAZIONE 1 (Impostazione di tensione Continua)</b>	<b>Pag. 17</b>
<b>2.5.3</b>	<b>CONFIGURAZIONE 2 (Impostazione di tensione e Frequenza)</b>	<b>Pag. 17</b>
<b>2.5.4</b>	<b>CONFIGURAZIONE 3 (Impostazione gradino di Corrente)</b>	<b>Pag. 18</b>
<b>2.5.5</b>	<b>CONFIGURAZIONE 4 (Taratura anello velocità)</b>	<b>Pag. 19</b>
<b>2.5.6</b>	<b>CONFIGURAZIONE 5 (impostazione corrente continua)</b>	<b>Pag. 21</b>

<b>3. <u>COMPENSAZIONE DEI TEMPI MORTI</u></b>	<b>Pag. 22</b>
<b>3.1 MANUALE DI DESCRIZIONE</b>	<b>Pag. 26</b>
<b>3.2 DATI E COMMENTI</b>	<b>Pag. 29</b>
<b>3.2.1 NON LINEARITA' INIZIALE SENZA COMPENSAZIONE</b>	<b>Pag. 29</b>
<b>3.2.2 NON LINEARITA' COMPENSATE CON VETTORE <math>\alpha</math>                 POSTO A 0 GRADI</b>	<b>Pag. 31</b>
<b>3.2.3 NON LINEARITA' COMPENSATE CON VETTORE <math>\alpha</math>                 POSTO A 90 GRADI</b>	<b>Pag. 32</b>
<b>3.2.4 NON LINEARITA' COMPENSATE VON VETTORE <math>\alpha</math>                 SUL 3° QUADRANTE</b>	<b>Pag. 33</b>
<b>4. <u>TEST A VUOTO</u></b>	<b>Pag. 35</b>
<b>4.1 COME IMPOSTARE IL TEST</b>	<b>Pag. 35</b>
<b>4.2 MANUALE DI DESCRIZIONE</b>	<b>Pag. 36</b>
<b>4.3 GRAFICI E COMMENTI</b>	<b>Pag. 37</b>
<b>5. <u>TEST A CARICO CRESCENTE</u></b>	<b>Pag. 40</b>
<b>5.1 COME IMPOSTARE IL TEST</b>	<b>Pag. 40</b>
<b>5.2 MANUALE DI DESCRIZIONE</b>	<b>Pag. 42</b>
<b>5.3 GRAFICI E COMMENTI</b>	<b>Pag. 43</b>
<b>6. <u>CONCLUSIONI</u></b>	<b>Pag. 46</b>
<b>7. <u>BIBLIOGRAFIA</u></b>	<b>Pag. 47</b>

## **APPENDICE DI TERMINOLOGIA**

- **Sistema di riferimento generico g**

$u_s^g$  = tensione di statore nel riferimento g

$R_s$  = resistenza di statore nel riferimento g

$i_s^g$  = corrente di statore nel riferimento g

$\lambda_s^g$  = flusso di statore nel riferimento g

$\Omega_g$  = velocità (costante) del generico riferimento g rispetto allo statore

$R_{sr}$  = resistenza di rotore riferita allo statore

$i_{sr}^g$  = corrente di rotore riferita allo statore nel riferimento g

$\lambda_{sr}^g$  = flusso prodotto dal rotore che si concatena con lo statore nel riferimento g

$\Omega_{me}$  = velocità elettromeccanica (costante)

$L_t$  = induttanza di transizione

$L_\phi$  = induttanza dell'avvolgimento primario

- **Sistema di riferimento stazionario s fisso rispetto allo statore**

$u_s^s$  = tensione di statore nel riferimento s

$i_s^s$  = corrente di statore nel riferimento s

$\lambda_s^s$  = flusso di statore nel riferimento s

$i_{sr}^s$  = corrente di rotore riferita allo statore nel riferimento s

$\lambda_{sr}^s$  = flusso prodotto dal rotore che si concatena con lo statore nel riferimento s

$\Omega_s$  = velocità angolare

$i_\phi^s$  = corrente su  $L_\phi$  dell'avvolgimento primario

$R_r$  = resistenza di rotore

$L_m$  = induttanza di magnetizzazione

$L_r$  = induttanza di rotore

$u_s^{1s}$  = tensione di rotore riportata allo statore (primario)

$\lambda_r^s$  = flusso di rotore nel riferimento s

$\Lambda_{sr}$  = ampiezza del vettore del flusso di rotore riferito allo statore

$\Omega_{sl}$  = velocità di scorrimento

$i_\tau^s$  = corrente sulla resistenza  $R_{sr}$

- **Grandezze in regime sinusoidale**

$S$  = scorrimento

$L_s$  = induttanza sincrona di statore

$L_\sigma$  = induttanza di dispersione

$R_0$  = resistenza relativa alle perdite nel ferro in regime sinusoidale

$R_k$  = resistenza in serie con l'induttanza di dispersione  $L_\sigma$

$I_k^s$  = corrente che attraversa l'induttanza di dispersione  $L_\sigma$

$R_s$  = resistenza di statore in regime sinusoidale

$I_s^s$  = corrente di statore in regime sinusoidale

$U_s^s$  = tensione di statore in regime sinusoidale

$I_\mu$  = corrente di magnetizzazione passante per l'induttanza di statore  $L_s$

$\eta$  = rendimento

Feed-Forward = E' una tecnica di controllo che si basa su una elaborazione degli ingressi eseguita senza conoscere il valore dell'uscita del sistema controllato, essendo note alcune proprietà del sistema da controllare.

E' fondamentale avere un buon modello matematico che descriva in maniera abbastanza precisa il comportamento del sistema.

Tanto più il modello matematico su cui si basa l'azione del controllo feed-forward è esatto, tanto più questo tipo di controllo è affidabile.

Decoupling = Il decoupling significa disaccoppiamento. Nel sistema di riferimento di assi d,q, essendo che la tensione di asse q dipende anche dalla corrente di asse d e viceversa, i PI di corrente interferiscono tra loro.

Effettuare il decoupling significa sommare alle richieste di tensione i termini dovuti alla corrente dell'altro asse, in modo da scaricare di questo compito il regolatore di corrente.

Anti wind-up = è uno strumento utilizzato durante la progettazione di un sistema di controllo, per evitare che motori e convertitori superino i loro limiti fisici.

Nel nostro caso specifico viene impiegato per permettere all'inverter di non oltrepassare la sua massima tensione erogabile.

Si basa su un'operazione di integrale svolta sulla variabile errore e, definita come differenza tra il riferimento  $y^*$  e l'uscita  $y$  del sistema e di una parte proporzionale. L'errore viene continuamente integrato, fin tanto che l'uscita  $y$  raggiunge il riferimento di ingresso. In queste condizioni, l'ingresso non satura più, ed il sistema di controllo ritorna ad avere un comportamento lineare.

La parte proporzionale smorza le oscillazioni transitorie che si vengono a creare quando il sistema entra in saturazione.

Controllo ad orientamento di

campo(FOC) = è una tecnica che si basa su un opportuno disaccoppiamento tra gli effetti delle due componenti della corrente statorica ( $i_{sd}, i_{sq}$ ), secondo un sistema di

riferimento rotante (d,q), in modo tale che una componente agisca esclusivamente sul flusso di rotore, mentre l'altra risulti proporzionale alla coppia elettromagnetica.

## B. SOMMARIO

Il lavoro consiste nell'esecuzione critica di un algoritmo di determinazione dei parametri di un motore asincrono, tramite l'utilizzo di un banco didattico per il controllo motore, senza l'ausilio di particolare strumentazione.

L'esperienza si è svolta ai fini universitari presso l'azienda E-BRAIN di Vicenza, su un banco didattico nel quale il motore asincrono è accoppiato ad un motore sincrono a magneti permanenti, PMSM, che funziona da freno.

Per ricavare i parametri del motore asincrono IM, si sono svolti sul banco in questione una serie di test (a vuoto, a carico crescente).

Prima di effettuare alcun test, si sono compensate, attraverso un opportuno metodo, le non linearità create dall'inverter di tensione trifase che alimenta il motore IM.

A questo punto si sono potuti svolgere i rispettivi test a vuoto e a carico crescente.

Per simulare le condizioni della prova a vuoto si è alimentato il motore IM a 50Hz e tensione crescente, mentre il motore PMSM, che funge da freno, è lasciato non alimentato.

Obiettivo di questo test, è quello di ricavare, dopo opportune elaborazioni, l'andamento della curva di magnetizzazione, quello delle perdite nel ferro  $P_{fe}$  e infine il valore della resistenza

$R_0$ ,

su cui vengono dissipate le perdite nel ferro.

Ne è risultata una tendenza corretta per la magnetizzazione e le perdite nel ferro, mentre  $R_0$  mostra un andamento un po' controverso.

Nel test a carico crescente invece, il motore asincrono sotto test è stato collegato ad un altro motore sincrono a magneti permanenti che agisce come carico attivo comandato da un inverter tradizionale.

Lo scopo finale di questo test, è quello, dopo una serie di elaborazioni dei dati ricavati direttamente dal banco di lavoro, di determinare l'andamento delle induttanze  $L_s$  e  $L_\sigma$ , induttanza di statore e di dispersione rispettivamente.

Si è ottenuto un esito positivo per  $L_s$ , che approssima molto bene l'andamento richiesto, mentre per quanto riguarda  $L_\sigma$ , il risultato mostra una tendenza piuttosto controversa e verosimile solo per valori di corrente elevati.

## 1. PREMESSA

La serie degli esperimenti di misura effettuati sul banco didattico E-BRAIN, richiede misure in regime sinusoidale.

Si basa sullo studio dinamico del motore asincrono collegato ad un motore sincrono a magneti permanenti (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM), operante come freno e sui relativi modelli secondo la teoria dei vettori spaziali. Il metodo attuato, richiede la conoscenza della tensione concatenata applicata al motore e non essendovi prevista alcuna misura diretta, occorre necessariamente basarsi sui riferimenti dati al modulatore vettoriale.

Si analizza ora in dettaglio il procedimento corretto per stimare i parametri di un motore asincrono (Induction Motor, IM). La stima dei parametri di un IM può essere ottenuta mediante una procedura basata su una serie di semplici misurazioni.

La procedura richiede solo strumentazione convenzionale e un banco prova equipaggiato con un freno e si basa sul circuito equivalente detto "a gamma inverso" di figura:

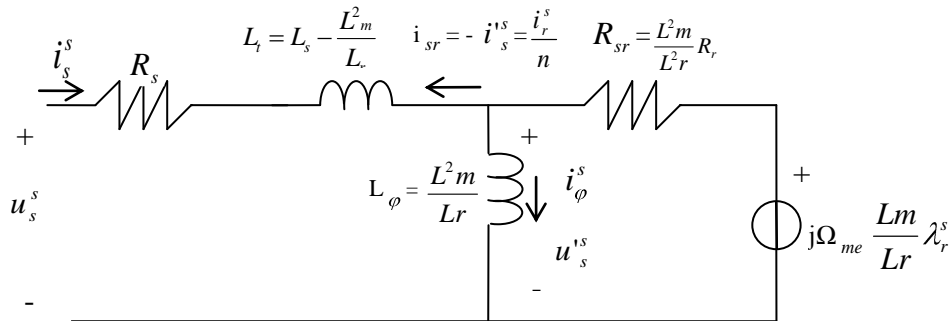


Fig.1 Circuito equivalente a  $\Gamma$  inverso di un IM

$$\text{Dove } \eta = \frac{Lm}{Lr}$$

Le equazioni di statore e rotore del motore asincrono, espresse secondo i vettori spaziali in un generico sistema di riferimento g sono:

$$\begin{aligned} u_s^g &= R_s i_s^g + \frac{d\lambda_s^g}{dt} + j\Omega_g \lambda_s^g \\ 0 &= R_{sr} i_{sr}^g + \frac{d\lambda_{sr}^g}{dt} + j(\Omega_g - \Omega_{me}) \lambda_{sr}^g \end{aligned} \quad (1)$$

$$\lambda_s^g = (L_t + L_\varphi) i_s^g + L_\varphi i_{sr}^g = L_t i_s^g + L_\varphi (i_s^g + i_{sr}^g) = L_t i_s^g + \lambda_{sr}^g$$

$$\lambda_{sr}^g = L_\varphi (i_s^g + i_{sr}^g)$$

Nel sistema di riferimento fisso allo statore ( $\Omega_g = 0$ ), le equazioni si trasformano come segue:

$$\begin{aligned} u_s^s &= R_s i_s^s + \frac{d\lambda_s^s}{dt} + j\Omega_s \lambda_s^s \\ 0 &= R_{sr} i_{sr}^s + \frac{d\lambda_{sr}^s}{dt} - j\Omega_{me} \lambda_{sr}^s \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\lambda_s^s &= (L_t + L_\varphi) i_s^s + L_\varphi i_{sr}^s = L_t i_s^s + L_\varphi (i_s^s + i_{sr}^s) = L_t i_s^s + \lambda_{sr}^s \\ \lambda_{sr}^s &= L_\varphi (i_s^s + i_{sr}^s) = L_\varphi i_\varphi^s\end{aligned}\quad (2)$$

La corrente  $i_{sr}^s$ , che si ottiene dalla seconda delle (2) è:

$$i_{sr}^s = - \left[ \frac{1}{R_{sr}} \left( \frac{d\lambda_{sr}^s}{dt} - j\Omega_{me} \lambda_{sr}^s \right) \right] = -i_\tau^s \quad (3)$$

In condizioni di regime, il vettore del flusso di rotore riferito allo statore ha ampiezza  $\Lambda_{sr}$  e ruota, come ogni grandezza di statore, con velocità angolare  $\Omega_s$ , somma della velocità di scorrimento  $\Omega_{sl}$  e della velocità elettromeccanica  $\Omega_{me}$ .

Di conseguenza, si ha:

$$\begin{aligned}\lambda_{sr}^s &= \Lambda_{sr} e^{j\omega_s t} \\ \frac{d\lambda_{sr}^s}{dt} &= j\Omega_s \Lambda_{sr} e^{j\omega_s t}\end{aligned}\quad (4)$$

Sostituendo la seconda delle (4) nella (3), si ottiene:

$$i_\tau^s = \frac{1}{R_{sr}} \left( \Omega_s \Lambda_{sr} e^{j\omega_s t} - j\Omega_{me} \Lambda_{sr} e^{j\omega_s t} \right) = \frac{1}{R_{sr}} \left( \frac{\Omega_s - \Omega_{me}}{\Omega_s} \right) \frac{d\lambda_{sr}^s}{dt} \quad (5)$$

Introducendo lo scorrimento S (slip) come:

$$S = \frac{\Omega_s - \Omega_{me}}{\Omega_s} \quad (6)$$

e sostituendolo nella (5), si ottiene:

$$i_\tau^s = \frac{1}{R_{sr}/S} \frac{d\lambda_{sr}^s}{dt} \quad (7)$$

Dato che  $\frac{d\lambda_{sr}^s}{dt}$  rappresenta l'espressione (7) dimostra che in condizioni di regime la componente di corrente  $i_{sr}^s = -i_\tau^s$  è legata al ramo resistivo  $\frac{R_{sr}}{S}$  in parallelo ad  $L_\varphi$ , ottenendo il circuito equivalente di figura 2.



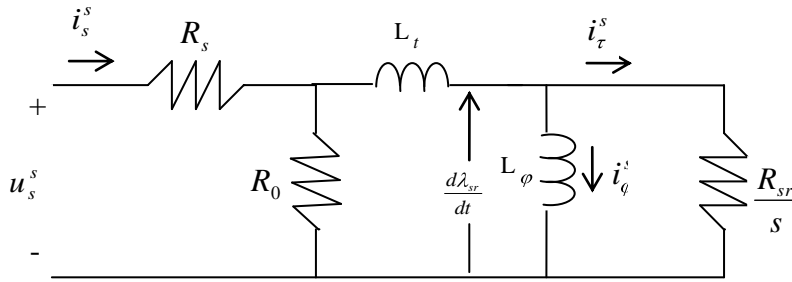


Fig.2 Circuito a  $\Gamma$  inverso a regime

Il circuito di fig.2 differisce dal circuito a  $\Gamma$  inverso precedente per la presenza della resistenza  $R_0$ , introdotta per rappresentare in modo equivalente le perdite nel ferro.

I parametri del circuito (2) sono quelli fondamentali per il funzionamento di un qualsiasi azionamento FOC, perciò devono essere definiti mediante l'uso di test a vuoto e a carico crescente.

Tuttavia, la procedura di stima si pone come obiettivo quello di misurare i parametri del circuito seguente (3) dove viene messo in risalto il regime sinusoidale delle variabili.

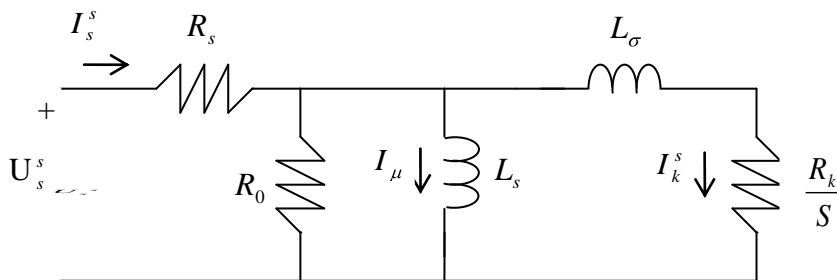


Fig.3 Circuito per la procedura di stima parametrica a regime

La principale differenza tra il circuito (3) e il (2), risiede nella topologia della maglia di rotore.

Esiste una relazione tra i parametri dei due circuiti, che può essere facilmente ricavata mediante l'espressione delle impedenze nella maglia di rotore:

$$Z_{r1} = j\Omega_s L_t + j\Omega_s L_\phi \parallel \frac{R_{sr}}{s} = \frac{j\Omega_s L_t + j\Omega_s \frac{R_{sr}}{s} \frac{L_t + L_\phi}{L_\phi}}{j\Omega_s + \frac{R_{sr}}{sL_\phi}} \quad (8)$$

$$Z_{r2} = j\Omega_s L_s \parallel \left( j\Omega_s L_\sigma + \frac{R_k}{s} \right) = \frac{j\Omega_s \frac{L_s L_\sigma}{L_\sigma + L_s} + j\Omega_s \frac{R_k}{s} \frac{L_s}{L_\sigma + L_s}}{j\Omega_s + \frac{R_k}{s(L_\sigma + L_s)}}$$

Dalla (8) si ottengono le seguenti tre condizioni:

$$\begin{aligned} L_t &= \frac{L_\sigma L_s}{L_\sigma + L_s} \\ R_{sr} \frac{L_t + L_\phi}{L_\phi} &= R_k \frac{L_s}{L_\sigma + L_s} \\ \frac{R_{sr}}{L_\phi} &= \frac{R_k}{L_\sigma + L_s} \end{aligned} \quad (9)$$

Dividendo la seconda delle (9) per la terza delle (9) e risolvendo per  $L_\phi$ , si ottiene:

$$\begin{aligned} L_t &= \frac{L_\sigma L_s}{L_\sigma + L_s} \\ L_\phi &= \frac{L_s^2}{L_\sigma + L_s} \\ R_{sr} &= \frac{R_k}{\left( \frac{L_\sigma + L_s}{L_s} \right)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

la quale è una relazione tra i due circuiti di Fig.2 e Fig.3.

Successivamente si presenterà un metodo per misurare i parametri del circuito in Fig.3 mediante dei test a vuoto e a carico crescente.

## **2. DESCRIZIONE DEL BANCO DIDATTICO DI MISURA PER AZIONAMENTI ELETTRICI IN ALTERNATA**

### **2.1 Display e Tastiera**

Il display consta di quattro righe di 20 caratteri ognuna. La prima riga (in alto) è permanentemente dedicata al freno, e può mostrare i riferimenti di corrente e velocità del freno, oppure la misura della corrente del freno e la misura della velocità del freno (e del motore). Le tre righe successive sono dedicate al motore in modo normale, oppure all'impostazione dei parametri in modo parametri. Le visualizzazioni dipendono dalle varie configurazioni e verranno descritte più avanti. In modalità normale, vengono visualizzate due grandezze per ogni riga ma, a seconda della configurazione attiva, possono esserci più di otto grandezze di interesse; in tal caso si possono visualizzare altre grandezze spostando la finestra di osservazione in alto o in basso tramite i tasti UP e DW; lo scorrimento interessa solo le tre righe relative al motore, mentre la prima riga rimane sempre visualizzata.

#### **2.1.1 Led**

Sono presenti anche alcuni led la cui accensione assume i seguenti significati:

- BRA ON (DL1): si accende quando il freno è attivo;
- MOT ON (DL2): si accende quando il motore è attivo;
- ID SAT (DL9): si accende quando il PI di regolazione di ID è saturo;
- IQ SAT (DL10): si accende quando il PI di regolazione di IQ è saturo;
- SPE SAT (DL11): si accende quando il PI di regolazione della velocità è saturo;
- ALL (DL12): si accende è attivo un allarme.

#### **2.1.2 Tasti**

La prima riga (in alto) del tastierino è composta dai seguenti pulsanti (da sinistra a destra):

- BRA ON/OFF: accende o spegne il freno;
- BRA +/-: cambia segno al riferimento di velocità del freno;
- BRA CUR/SPE: seleziona il riferimento attivo (modificabile tramite encoder) del freno;
- BRA MEA/REF: seleziona se verranno visualizzate le misure o i riferimenti del freno;
- TRIG: è usato come trigger in alcune modalità di funzionamento;
- 10: si usa assieme all'encoder per velocizzare l'impostazione dei riferimenti.
- 100: si usa assieme all'encoder per velocizzare l'impostazione dei riferimenti.

La seconda riga (in basso) del tastierino è composta dai seguenti pulsanti (da sinistra a destra):

- MOT ON/OFF: accende o spegne il motore;
- MOT +/- : cambia segno al riferimento di velocità del motore (ove applicabile);
- MOT SEL REF: seleziona il riferimento attivo (modificabile tramite encoder) del motore;
- UP: usato per spostare la visualizzazione, e in modo parametri per incrementare l'indice;
- SEL: usato in modo parametri per selezionare l'indice o per accettare un valore;
- DW: usato per spostare la visualizzazione, e in modo parametri per decrementare l'indice.
- PAR: usato per accedere al modo parametri.

Alcuni tasti sono usati in combinazione:

il tasto 10 e il tasto 100 premuti contemporaneamente assumono il significato di 1000 (vedi uso encoder).

Il tasto TRIG e il tasto SEL, se premuti contemporaneamente, producono il RESET del sistema (analogo ad una riaccensione).

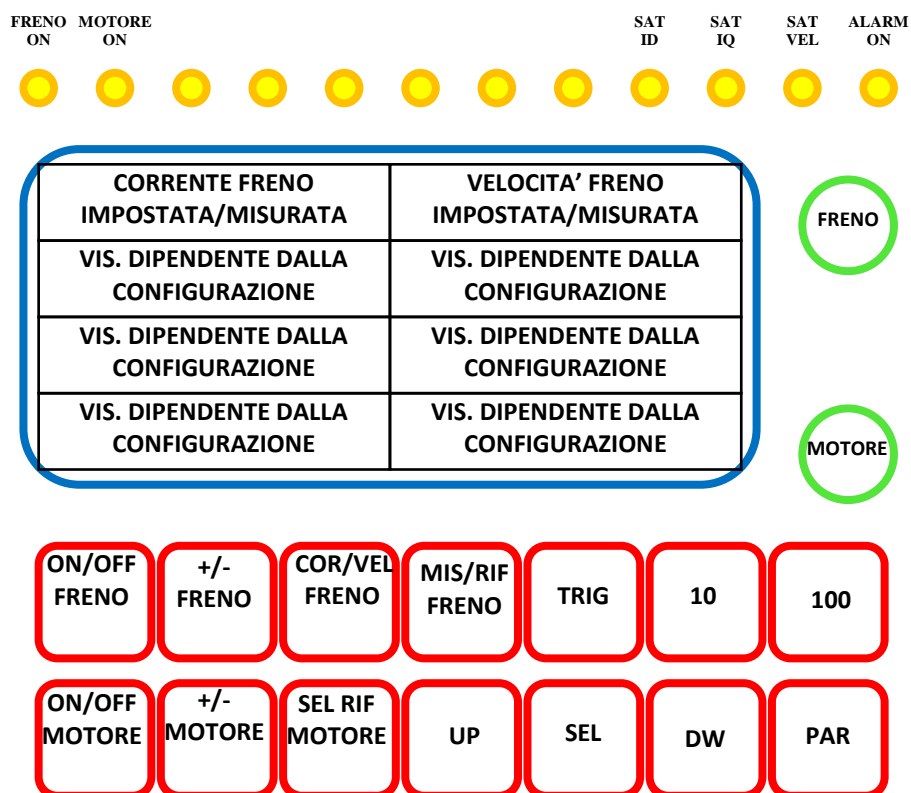


Fig.4 Display e tastiera del banco

## 2.2 Parametri

### 2.2.1 Modifica dei parametri

Premendo il tasto PAR si accede all'elenco parametri; in questo modo le tre righe più in basso cessano di visualizzare grandezze relative al motore e sono usate per permettere la selezione e la modifica di alcuni parametri. La terza riga dall'alto è usata per visualizzare l'indice del parametro attivo, che è modificabile con i tasti UP e DW (la scritta PAR lampeggia, indicando che l'indice del parametro è modificabile), ed il valore del parametro; la quarta riga mostra i limiti massimo e minimo dei valori che può assumere il parametro stesso.

Per modificare il valore di un parametro occorre portarsi sull'opportuno indice, quindi premendo il tasto SET si attiva l'impostazione del valore (la scritta VAL inizia a lampeggiare). Il valore è modificabile sia con i tasti UP e DW sia usando al solito modo l'encoder relativo al motore). Premendo il tasto SET di nuovo si accetta il valore modificato, e si ritorna alla selezione del parametro (e riprende a lampeggiare la scritta PAR). Premendo il tasto PAR si esce dall'elenco parametri e si ritorna a gestire l'inverter che comanda il motore.

L'elenco dei parametri ed il loro significato è di seguito riportato.

### 2.2.2 Elenco parametri

Di seguito l'elenco dei parametri e la loro descrizione:

- **Par. 0 SEL\_OP** usato per selezionare la configurazione di funzionamento desiderata (0, 1, 2, 3) o per ricaricare i valori di default dei parametri con la seguente procedura: immettere sul parametro 0 il valore 33, quindi resettare la scheda.
- **Par. 1 MODUL** usato per impostare il tipo di modulazione desiderato.  
Se questo parametro vale 1 l'inverter usa una modulazione di tipo "space vector modulation" (SVM) centrata, se vale 0 la modulazione è "bus clamped", ovvero uno dei tre rami è sempre tenuto a massa (MOSFET basso sempre ON), mentre se vale 2 viene utilizzata la modulazione SVM centrata compensata.
- **Par. 2 C\_OPT** usato per specificare alcune opzioni di controllo, in particolare se vale zero non vengono applicati feed-forward o decoupling (descritte a pag. 4) durante il calcolo delle tensioni di uscita, se vale 1 viene applicato il decoupling, ma non il feed forward, se vale 2 viene applicato il feed-forward ma non il decoupling, se vale 3 vengono applicati entrambi.
- **Par. 3 AWU\_SEL** usato per selezionare il tipo di anti-windup (il cui concetto è descritto a pag. 4) applicato all'anello di controllo della velocità ed in particolare se vale zero non viene applicato alcun algoritmo di anti-windup (a parte la semplice saturazione dell'integrale), se vale 1 viene applicato un algoritmo semplice (non dipendente da parametri), se vale 2 viene usato un algoritmo a guadagno impostabile.

- **Par. 4 REF\_SEL** usato per abilitare l'uso dei riferimenti analogici esterni in configurazione 4.
- **Par. 5 I\_STEP** ampiezza del gradino di corrente applicato in configurazione 3 (in mA).
- **Par. 6 S\_STEP** ampiezza del gradino di velocità applicato in configurazione 4 (in rpm).
- **Par. 7 T\_STEP** tempo che intercorre tra il gradino positivo e quello negativo nelle configurazioni precedenti ("durata" dello step)
- **Par. 8 VR\_NOM** Valore massimo della tensione impostabile nella configurazione 2 (in mV).
- **Par. 9 FR\_NOM** Valore massimo della frequenza impostabile nella configurazione 2 (in Hz).
- **Par. 10** Non usato
- **Par. 11 IQR\_NOM** Valore massimo di corrente q impostabile tramite ingressi analogici (in mA).
- **Par. 12 R\_ACC** Rampa di accelerazione in rpm/s (se vale 0 il rif. è applicato direttamente, senza rampe).
- **Par. 13 R\_DEC** Rampa di decelerazione in rpm/s (se vale 0 il rif. è applicato direttamente, senza rampe).
- **Par. 14 KP\_CUR** Guadagno proporzionale anello di corrente.
- **Par. 15 KI\_CUR** Guadagno integrale anello di corrente.
- **Par. 16 KP\_VEL** Guadagno proporzionale anello di velocità.
- **Par. 17 KI\_VEL** Guadagno integrale anello di velocità.
- **Par. 18 KW\_VEL** Guadagno anti-windup anello di velocità.
- **Par. 19 C\_POLI** Numero di coppie polari motore.
- **Par. 20 R\_STA** Valore resistenza statorica in mOhm.
- **Par. 21 L\_SYN** Valore induttanza sincrona in decimillesimi di Henry.
- **Par. 22 PM\_FLUX** Valore flusso dei magneti permanenti in decimillesimi di Weber.
- **Par. 23 I\_MAX** Valore massimo corrente in mA.
- **Par. 24 VB\_NOM** Valore nominale tensione di bus in mV.
- **Par. 25 ANIO\_SEL** Selezione visualizzazioni analogiche e ingressi analogici
- **Par. 26 ANO1\_SEL** Selezione uscita analogica AO1
- **Par. 27 ANO2\_SEL** Selezione uscita analogica AO2
- **Par. 28 ANO3\_SEL** Selezione uscita analogica AO3
- **Par. 29 ANO4\_SEL** Selezione uscita analogica AO4
- **Par. 30 ANO5\_SEL** Selezione uscita analogica AO5
- **Par. 31 ANO6\_SEL** Selezione uscita analogica AO6
- **Par. 32 ANO7\_SEL** Selezione uscita analogica AO7
- **Par. 33 ANI1\_SEL** Selezione ingresso analogica I4 (BNC anteriore)
- **Par. 34 ANI2\_SEL** Selezione ingresso analogica I5 (BNC posteriore)
- **Par. 35 DEF\_LON** Selezione stato MOSFET bassi: se questo parametro vale 1, quando il motore è inattivo, i MOSFET bassi sono comandati (in pratica le fasi sono cortocircuitate); se vale zero invece nessun MOSFET è comandato a motore inattivo.

### 2.2.3 Segnali analogici

E' accessibile affianco al display sulla sinistra una schedina con vari test point, usabili per visualizzare alcune grandezze analogiche tramite un oscilloscopio. I segnali accessibili sono (a gruppi, partendo da sinistra):

- Primo gruppo, da sinistra a destra:
  1. GNDA (massa di riferimento, coincidente con il meno del bus DC)
  2. UF (tensione della fase U rispetto a massa, filtrata)
  3. VF (tensione della fase V rispetto a massa, filtrata)
  4. WF (tensione della fase W rispetto a massa, filtrata)
  5. CSF (tensione di centro stella rispetto a massa, filtrata)
  6. U (tensione della fase U rispetto a massa, non filtrata)
  7. V (tensione della fase U rispetto a massa, non filtrata)
  8. W (tensione della fase U rispetto a massa, non filtrata)
  9. BUS (tensione del bus DC rispetto a massa, non filtrata)
  10. IW (uscita del sensore di corrente sulla fase W)
  11. IU (uscita del sensore di corrente sulla fase U)
  12. GNDA (massa di riferimento)
- Secondo gruppo, da sinistra a destra:
  1. GNDB (massa di riferimento, coincidente con il meno del bus DC)
  2. UL (comando di pilotaggio del MOSFET basso della fase U)
  3. VL (comando di pilotaggio del MOSFET basso della fase V)
  4. WL (comando di pilotaggio del MOSFET basso della fase W)
  5. UH (comando di pilotaggio del MOSFET alto della fase U)
  6. VH (comando di pilotaggio del MOSFET alto della fase V)
  7. WH (comando di pilotaggio del MOSFET alto della fase W)
  8. GNDB (massa di riferimento, coincidente con il meno del bus DC)
- Terzo gruppo: il terzo gruppo è composto da sette segnali analogici (ottenuti tramite PWM filtrate) e quattro segnali digitali; i segnali analogici sono usati per visualizzare alcune grandezze interne usate dall'algoritmo di controllo, e variano a seconda delle configurazioni; i primi tre segnali digitali mostrano le saturazioni degli anelli di regolazione (OD1 sat. ID, OD2 sat. IQ, OD3 sat. Velocità), il quarto non è usato.

### 2.3 Encoder

Gli encoder sono utilizzati per impostare i valori dei riferimenti per il freno o per il motore; l'encoder più in alto (BRA REF) si riferisce al freno, mentre quello più in basso si riferisce al motore (MOT REF).

Per impostare i riferimenti si usano gli encoder e alcuni tasti:

- a ogni scatto dell'encoder in senso orario corrisponde l'incremento di una unità (cifra meno significativa);
- a ogni scatto dell'encoder in senso antiorario corrisponde il decremento di una unità (cifra meno significativa);
- se mentre si agisce sull'encoder è premuto il tasto 10, l'incremento/decremento procede a passi di 10;
- analogamente con il tasto 100;
- se sono contemporaneamente premuti entrambi i tasti 10 e 100, l'incremento/decremento procede a passi di 1000.

### 2.4 Funzionamento del freno

Il funzionamento del motore sincrono, scelto come freno è indipendente dalla configurazione scelta per il motore stesso. La prima riga del display, l'encoder superiore e i quattro tasti in alto a sinistra sono dedicati al freno. Si possono visualizzare la velocità e la corrente misurata (la velocità è comune al motore e al freno, dal momento che sono meccanicamente accoppiati, mentre la corrente è proporzionale alla coppia di frenatura), oppure la velocità e la corrente di riferimento (la velocità è la velocità di riferimento del freno, e può essere positiva o negativa, mentre la corrente è il limite di corrente del freno ed è solo positivo, pur limitando la corrente nei due sensi). Si passa da una visualizzazione all'altra premendo il tasto BRA MEA/REF (quarto da sinistra in alto), e sul display, all'estrema destra della prima riga, una lettera indica cosa è visualizzato in quel momento (M=misure, R=riferimenti). I riferimenti del freno possono essere modificati come descritto precedentemente con l'encoder dedicato, selezionando corrente o velocità con il tasto BRA CUR/SPE (terzo da sinistra in alto); il riferimento selezionato lampeggia (se sono visualizzati i riferimenti). Si può cambiare il segno del riferimento di velocità del freno con il tasto BRA +/- (secondo da sinistra in alto), mentre si può accendere il freno con il tasto BRA ON/OFF (primo da sinistra in alto).

Il freno, se acceso, cerca di mantenere la sua velocità di riferimento, fino al limite di corrente (coppia). La velocità impostata può essere zero, in questo modo il freno funziona come un freno convenzionale, opponendosi al movimento del motore.



## 2.5 Motore

Il funzionamento dell'inverter dedicato al motore dipende dalla configurazione scelta. Sono previste cinque diverse configurazioni, utilizzate per effettuare esperienze diverse. In ogni configurazione si possono impostare dei riferimenti, vengono visualizzate delle grandezze specifiche e vengono impostati alcuni segnali analogici sugli opportuni test point. Per cambiare la configurazione attiva occorre impostare il numero della configurazione desiderata sull'opportuno parametro, e quindi resettare il sistema (la configurazione viene decisa solo all'avvio). Si descrive di seguito il funzionamento del sistema nelle varie configurazioni.

### 2.5.1 Configurazione 0 (normale funzionamento in orientamento di campo)

E' la configurazione di base, in cui il sistema consente di impostare la velocità del motore e di visualizzare le varie grandezze elettriche (correnti, tensioni etc.).

Le visualizzazioni previste sono le seguenti (due per riga, a partire dalla seconda riga dall'alto):

- |   |   |
|---|---|
| 1. CFG (configurazione)                 | REF (rif. di velocità in giri/minuto; lampeggia perché può essere modificato) |
| 2. ID (corrente diretta misurata in A)  | IQ (corrente di asse q misurata in A)   |
| 3. VD (tensione diretta impostata in V) | VQ (tensione di asse q impostata in V)  |
| 4. FRE (frequenza impostata in Hz)      | UDC (tensione misurata del bus DC, lato inverter motore, in V)                |

I valori di corrente visualizzati sono valori di picco, mentre i valori di tensione sono relativi alle tensioni di fase (stellate) di picco. Per accedere alla quarta riga di visualizzazioni occorre ovviamente scorrere la finestra di visualizzazione con i tasti UP e DW. Il riferimento di velocità del motore è l'unica grandezza modificabile, e viene impostato tramite l'encoder dedicato al motore (il tasto MOT SEL REF non viene utilizzato in questa configurazione).

I segnali analogici rilevabili nel terzo gruppo di test point in questa configurazione sono:

- OA1  $V_{\alpha}$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0V, 0.1V alla tensione  $-2V_{B_{NOM}}/3 (= -16V)$ , e 4.9V a +16V.
- OA2  $V_{\beta}$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0V, 0.1V alla tensione  $-2V_{B_{NOM}}/3 (= -16V)$ , e 4.9V a +16V.
- OA3  $I_{\alpha}$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0A, 0.1V alla corrente  $-I_{MAX} (= -3A)$ , e 4.9V a +3A.
- OA4  $I_{\beta}$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0A, 0.1V alla corrente  $-I_{MAX} (= -3A)$ , e 4.9V a +3A.
- OA5  $I_d$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0A, 0.1V alla corrente  $-I_{MAX} (= -3A)$ , e 4.9V a +3A.
- OA6  $I_q$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0A, 0.1V alla corrente  $-I_{MAX} (= -3A)$ , e 4.9V a +3A.
- OA7 Fase elettromeccanica normalizzata come segue: 0V corrisponde a 0rad, 5V corrisponde a  $2\pi$ rad.

In questa configurazione è anche possibile, tramite il settaggio di alcuni parametri, impostare a piacere i segnali analogici di uscita e/o fornire al sistema dei riferimenti tramite due segnali analogici applicati ai connettori BNC sul fianco della scatola.

### 2.5.2. Configurazione 1 (impostazione di tensione continua)

In questa configurazione è possibile impostare direttamente un duty-cycle alla PWM di uscita; il valore impostato tramite encoder viene applicato alla fase U, mentre sulle fasi V e W viene impostato il valore 0 (si tengono sempre accesi i MOSFET bassi).

In questo modo è possibile impostare una tensione continua tra le fasi U e V e tra le fasi U e W, ottenendo una corrente continua entrante sulla fase U (che si ripartisce poi sulle fasi V e W).

Le visualizzazioni sono (due per riga, a partire dalla seconda riga dall'alto):

1. **CFG** (configurazione)
2. **DPM** (duty-cycle in millesimi, 0-999)
3. **UDC** (tensione misurata del bus DC, lato inverter motore, in V)
4. **IDC** (corrente di fase U misurata in A)

In questa configurazione non è prevista alcuna regolazione di corrente, se si supera la corrente massima il sistema produce un allarme ed occorre resettare la scheda.

I segnali analogici rilevabili nel terzo gruppo di test point in questa configurazione sono:

- OA1  $I_u$ , normalizzata come segue: 0V corrisponde a 0A, 3V alla corrente  $I_{MAX}=3A$ .

### 2.5.3. Configurazione 2 (impostazione di tensione e frequenza)

In questa configurazione è possibile impostare un valore di tensione di fase e un valore di frequenza; le impostazioni sono effettuate tramite l'encoder relativo al motore, e si passa da un riferimento all'altro tramite il tasto MOT SEL REF. Il riferimento attivo lampeggia.

Le visualizzazioni sono (a partire dalla seconda riga dall'alto):

1. **CFG** (configurazione)
2. **FRE** (riferimento frequenza in Hz)
3. **VF** (riferimento di tensione di fase, valore di picco, stella, in V)
4. **UDC** (tensione misurata del bus DC, lato inverter motore, in V)
5. **IF** (corrente di fase misurata, picco, in A)
6. **POW** (valore misurato della potenza attiva  $P_{att}$  in W)

Anche in questa configurazione non è prevista regolazione di corrente, se si supera la corrente massima il sistema produce un allarme ed occorre resettare la scheda.

I segnali analogici rilevabili nel terzo gruppo di test point in questa configurazione sono:

- OA1  $V_{\alpha}$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0V, 0.1V alla tensione  $-2V_{B_{NOM}}/3(=-16V)$ , e 4.9V a +16V.
- OA2  $V_{\beta}$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0V, 0.1V alla tensione  $-2V_{B_{NOM}}/3(=-16V)$ , e 4.9V a +16V.
- OA3  $I_{\alpha}$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0A, 0.1V alla corrente  $-I_{MAX}(=-3A)$ , e 4.9V a +3A.
- OA4  $I_{\beta}$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0A, 0.1V alla corrente  $-I_{MAX}(=-3A)$ , e 4.9V a +3A.
- OA5 Fase elettrica imposta, normalizzata come segue: 0V corrisponde a 0rad, 5V corrisponde a  $2\pi$ rad.

- OA6 Fase elettromeccanica misurata, normalizzata come segue: 0V corrisponde a 0rad, 5V corrisponde a  $2\pi$ rad.
- OA7 Picco della corrente di fase, normalizzata come segue: 3V corrisponde alla corrente massima (3A)

#### 2.5.4 Configurazione 3 (impostazione gradino di corrente)

In questa configurazione è possibile applicare un gradino di corrente sull'asse diretto, in modo da osservare la risposta al gradino e ottimizzare la taratura dei guadagni degli anelli di corrente. L'ampiezza del gradino e il tempo interposto tra il gradino positivo ed il successivo gradino negativo sono impostabili tramite parametri, mentre l'istante di applicazione viene deciso tramite il tasto TRIGGER. A parte l'applicazione del gradino, l'inverter funziona come in configurazione 0 (cioè è possibile applicare il gradino anche in movimento, sia trascinato dal freno che controllato in anello di velocità).

Le visualizzazioni sono (sempre a partire dalla seconda riga dall'alto):

- |   |   |
|---|---|
| 1. CFG (configurazione)                 | REF (rif. di velocità in giri/minuto; lampeggia perché può essere modificato) |
| 2. ID (corrente diretta misurata in A)  | IQ (corrente di asse q misurata in A)   |
| 3. VD (tensione diretta impostata in V) | VQ (tensione di asse q impostata in V)  |
| 4. FRE (frequenza impostata in Hz)      | UDC (tensione misurata del bus DC, lato inverter motore, in V)                |
| 5. IS (ampiezza gradino corrente in A)  | TS (tempo tra gradino positivo e negativo in sec)                             |

Anche in questo caso si può scorrere tra le visualizzazioni con i tasti UP e DW.

I segnali analogici rilevabili nel terzo gruppo di test point in questa configurazione sono:

- OA1  $I_d$ , normalizzata come segue: 1V corrisponde a 0A, 4V alla corrente IS (ampiezza gradino riferimento).
- OA2  $I_q$ , normalizzata come  $I_d$  nel test point OA1.
- OA3  $I_{dR}$ , riferimento di corrente di asse d, normalizzata come  $I_d$  nel test point OA1.

### 2.5.5 Configurazione 4 (taratura anello velocità)

In questa configurazione l'inverter funziona come in configurazione 0, ma è possibile imporre un gradino di ampiezza impostabile al riferimento di velocità. L'ampiezza del gradino e il tempo tra gradino positivo e negativo sono impostabili tramite parametri, mentre il normale riferimento di velocità si imposta con l'encoder. Le visualizzazioni sono:

- |  |   |
|--|---|
| 1. CFG (configurazione)                  | REF (rif. di velocità in giri/minuto; lampeggia perché può essere modificato) |
| 2. ID (corrente diretta misurata in A)   | IQ (corrente di asse q misurata in A)   |
| 3. VD (tensione diretta impostata in V)  | VQ (tensione di asse q impostata in V)  |
| 4. FRE (frequenza impostata in Hz)       | UDC (tensione misurata del bus DC, lato inverter motore, in V)                |
| 5. SS (ampiezza gradino velocità in rpm) | TS (tempo tra gradino positivo e negativo in sec)                             |

Anche in questo caso si può scorrere tra le visualizzazioni con i tasti UP e DW.

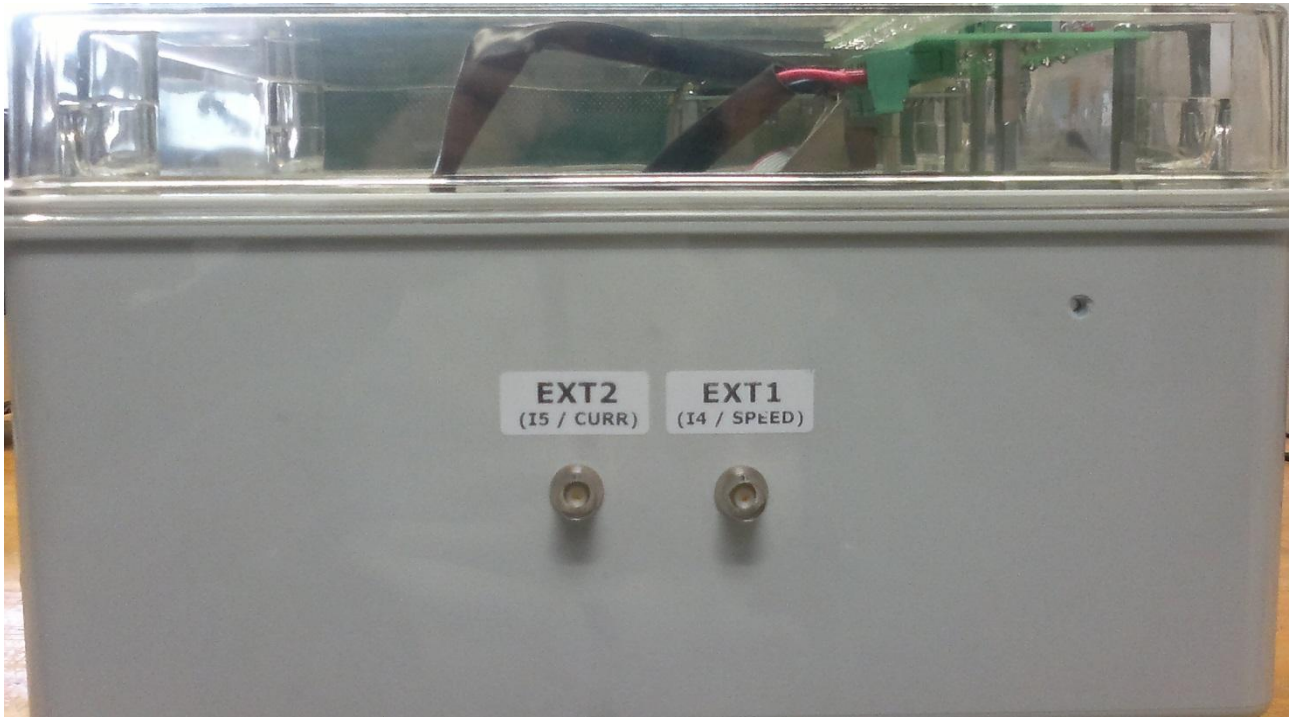
I segnali analogici rilevabili nel terzo gruppo di test point in questa configurazione sono:

- OA1  $I_d$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0A, 0.1V alla corrente  $-I_{MAX}(=-3A)$ , e 4.9V a +3A.
- OA2  $I_q$ , normalizzata come segue: 2.5V corrisponde a 0A, 0.1V alla corrente  $-I_{MAX}(=-3A)$ , e 4.9V a +3A.
- OA3 Memoria integrale dell'errore di velocità, normalizzata come le correnti di sopra.
- OA4 Modulo del riferimento di velocità normalizzato come segue: 0V a zero giri, 4V a 2600rpm.
- OA5 Modulo della velocità misurata normalizzato come segue: 0V a zero giri, 4V a 2600rpm.
- OA6 Fase elettromeccanica misurata, normalizzata come segue: 0V corrisponde a 0rad, 5V corrisponde a  $2\pi$ rad.

In questa configurazione, a seconda del valore di un parametro, è possibile selezionare, al posto del riferimento di velocità costruito tramite encoder, un riferimento di velocità ottenuto da un segnale di tensione esterno, applicato ad uno dei BNC posti a lato della scatola. Al riferimento di corrente di asse q, ottenuto dall'anello di velocità, viene inoltre sommato un offset ottenuto da un segnale di tensione esterno, applicato all'altro BNC.

In questo modo è possibile perturbare il funzionamento dell'anello di velocità ed osservarne le reazioni. I riferimenti esterni sono così definiti:

- I4 (BNC situato nella parte laterale della scatola); Riferimento di velocità normalizzato come segue: zero a 2.5V, massima velocità positiva (2600rpm) a 4.5V.
- I5 (BNC situato nella parte laterale della scatola); Riferimento aggiuntivo di corrente q, normalizzato come segue: zero a 2.5V, massima corrente positiva (dipende da parametro, default 3A) a 4.5V.



### 2.5.6 Configurazione5 ( impostazione di una corrente continua)

In questa configurazione è possibile impostare un vettore di corrente continua nel motore (la corrente è controllata ad anello chiuso tramite PI), e leggere ampiezza e fase del vettore di tensione applicato dall'inverter.

- |   |   |
|---|---|
| 1. <b>CFG</b> (configurazione)                        | <b>UDC</b> (tensione misurata del bus DC, lato inverter motore, in V) |
| 2. <b>CUR</b> (ampiezza riferimento di corrente in A) | <b>PHI</b> (fase del riferimento di corrente in gradi)                |
| 3. <b>VOL</b> (tensione motore misurata in V)         | <b>PHV</b> (fase del vettore di tensione in gradi)                    |

Si può sempre passare da un parametro all'altro attraverso i tasti UP e DOWN.

Questa configurazione è stata introdotta in quanto la tabella per effettuare la compensazione presente all'interno del codice di calcolo è impostata in funzione dei valori di corrente.

Quindi, si necessita avere valori di corrente precisi e soprattutto con un'elevata risoluzione, per poter ottenere un metodo di compensazione efficace.

Fatto che si attua in modo esatto solamente se si impostano i valori di corrente voluti, leggendo di conseguenza le relative tensioni.

Al contrario, l'impostazione di un vettore costante di tensione portava a una lettura di corrente piuttosto discontinua con bassa risoluzione.

Per effettuare i test richiesti si è utilizzato il banco sempre in configurazione 2, impostando quindi tensione e frequenza.

### 3. COMPENSAZIONE DEI TEMPI MORTI

Il cosiddetto “tempo morto” corrisponde all’intervallo di tempo durante il quale entrambi i transistor di uno stesso ramo dell’inverter sono mantenuti in stato di interdizione onde evitare un possibile corto circuito sull’alimentazione dovuto alla difformità ed alla aleatorietà dei tempi di commutazione degli interruttori. Durante tale intervallo di tempo, la tensione di polo dipende dal verso della corrente di uscita, che interessa l’uno o l’altro diodo a seconda della propria polarità. I tempi morti costituiscono una delle principali cause di non linearità nei convertitori a tensione impressa, e si trovano svariate tecniche di compensazione volte a ridurre la distorsione della tensione di uscita.

Una completa compensazione risulta tuttavia molto difficile, data l'impossibilità pratica di conoscere con esattezza i tempi di commutazione degli interruttori.

In questa esperienza, il circuito dell’inverter è costituito da MOSFET, ovvero transistori ad effetto di campo. Solitamente per l’inverter alimentato a tensione di rete, si preferisce l’IGBT per questioni economiche e di dissipazione, ma siccome l’IGBT ha al suo interno una caduta di tensione costante di 2V per qualsiasi tensione di ingresso, nel caso di basse tensioni, questa ne diviene una parte considerevole. Per questo motivo si è scelto il MOSFET, che invece presenta una resistenza di drain-source  $R_{ds-on}$  molto bassa tale da non provocare in pratica nessuna caduta sul dispositivo.

Lo schema seguente di Fig.5, evidenzia il metodo per la generazione della modulazione a larghezza di impulsi di uscita, PWM, nella sua modalità complementare.

Come si nota dall’esempio di figura, sono rappresentate le 3 fasi corrispondenti ai 3 rami dell’inverter, ciascuna con il proprio livello alto e basso.

La gestione degli stati delle varie fasi, è affidata a un contatore che manda in conduzione le linee alte H e basse L di ciascuna fase con un ritardo tra loro pari al dead time, ovvero il tempo necessario ai due interruttori di ogni ramo dell’inverter per evitare l’indesiderata situazione in cui entrambi gli interruttori siano attivi contemporaneamente.

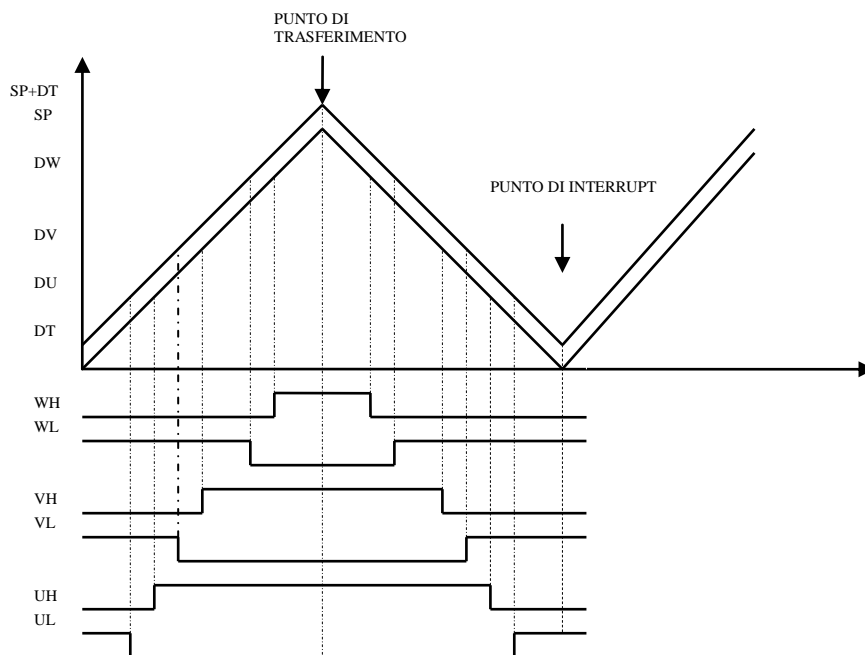


Fig 5 Esempio di forma d’onda di uscita in modalità PWM

Un altro aspetto molto importante è quello legato alla partizione della corrente tra le tre fasi a,b,c. Si può notare dalla figura qui di seguito riportata che la corrente è totale in a, essendoci posti sull'asse  $\alpha$  con il vettore  $(V_a, 0)$  e viene ripartita esattamente a metà nelle fasi b e c. Si considerano inoltre per questo motivo i punti b e c allo stesso potenziale.

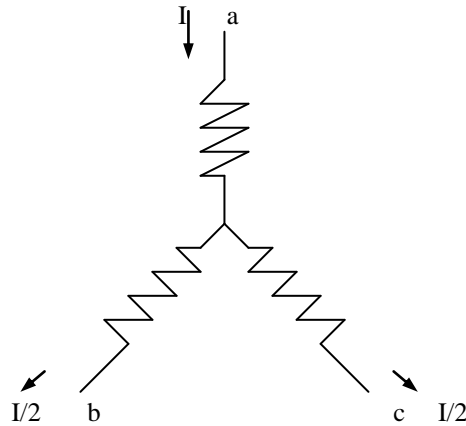


Fig.6 Partizione della corrente sulle 3 fasi

La figura di seguito riportata, rappresenta uno dei 3 rami dell'inverter di tensione trifase. Viene calcolato ora l'errore che si commette su un ramo dell'inverter dovuto ai dead time.

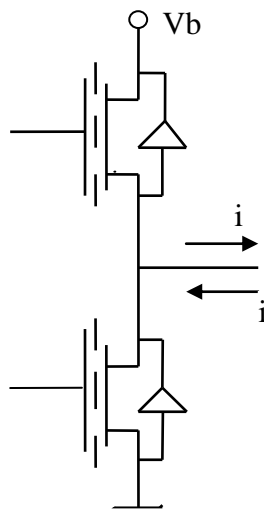


Fig.7 Ramo inverter trifase

Trascurando quindi le altre non linearità, risulta infatti:

$$V_{out} = \frac{1}{T_c/2} * (D * V_b + DT * V_b) \quad \text{quando la corrente entra nel ramo di interruttori}$$



$$V_{out} = \frac{1}{T_c/2} * (D * V_b) \quad \text{quando invece la corrente esce}$$

Dove:

- $V_b$ : la tensione di bus.
- $D_x$  : duty cycle relativo alle 3 fasi U,V,W.
- $\frac{T_c}{2}$  : semi-periodo della forma d'onda.
- $T_c$ : periodo della forma d'onda.
- $DT$ : dead time tra le fasi U,V,W.

Quindi è possibile , aggiungendo un offset a tutte e tre le uscite, scrivere per  $T_c = 2 * \left(\frac{T_c}{2}\right)$ , ovvero periodo=2 semi-periodi:

$$V_{1out} = V_{out} - (DT * V_b / T_c) = \frac{1}{T_c/2} * (D * V_b + DT * V_b / 2) \quad \text{quando la corrente entra}$$

$$V_{1out} = V_{out} - (DT * V_b / T_c) = \frac{1}{T_c/2} * (D * V_b - DT * V_b / 2) \quad \text{quando la corrente esce}$$

Definito positivo il verso della corrente uscente, l'errore risulta proprio:

$$Err = ((DT * V_b / T_c) * \text{sign}[I]) \quad (11)$$

Dato che l'Err è funzione del segno della corrente, l'errore di tensione su una fase dell'inverter è esprimibile come:

$$Err_{ph} = Err * \text{sign}(I_{ph}) \quad (12)$$

La figura seguente, rappresenta la posizione reciproca del sistema di riferimento  $\alpha, \beta$  rispetto al riferimento trifase abc.

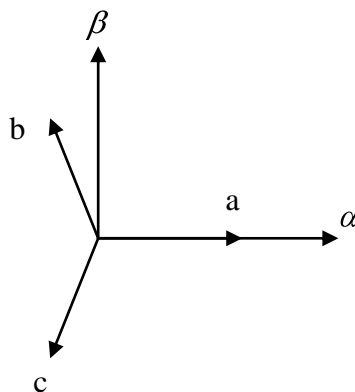


Fig.8 Sistemi di riferimento per vettori spaziali

Per effettuare la compensazione dei tempi morti, si impone in modalità di funzionamento continua DC, un vettore sull'asse  $\alpha$  ( $V_a, 0$ ) e si misura di conseguenza la corrente ( $i_a, 0$ ). Trascurando le cadute sui componenti, la tensione effettivamente imposta sull'inverter vale  $R_s \cdot i_a$ , per cui, supponendo di conoscere la resistenza di fase viene calcolato l'errore  $Err_a = V_a - R_s \cdot i_a$ .

Per ricavare l'errore che si commette su una singola fase si applica la trasformata di Clarke al vettore errore nel caso:

$$Err_a = \frac{2}{3} (E_{ph} \cdot \text{sign}[i_u] - (1/2) E_{ph} \cdot \text{sign}[i_v] - (1/2) E_{ph} \cdot \text{sign}[i_w]) \quad (13)$$

$$Err_a = \frac{2}{3} E_{ph} (\text{sign}[i_u] - (1/2) \cdot \text{sign}[i_v] - (1/2) \cdot \text{sign}[i_w]) \quad (14)$$

$$Err_a = \frac{2}{3} E_{ph} (1 + 1/2 + 1/2) = \frac{4}{3} Err_{ph} \quad (15)$$

Quindi si ottiene  $Err_{ph}$  come  $\frac{3}{4}$  dell'errore  $Err_a$  calcolato in precedenza.

Si tenga presente che nel caso particolare per la trasformata di Clarke  $V_u = V_a$ ;  $V_v = V_w = -V_a/2$ ;  $i_u = i_a$ ;  $i_v = i_w = -i_a/2$ .

La formula (12) è vera nel caso di errore dovuto ai dead time.

E' possibile verificare la correttezza ed efficacia del metodo di compensazione, effettuando un test con una configurazione dedicata sul banco di lavoro.

Se:

- Il parametro PAR 1 MODUL di pag 11, è impostato a 1, l'inverter usa una modulazione (space vector modulation, SVM) centrata non compensata, il che permette di determinare le iniziali non linearità dell'inverter dovute ai dead time.
- Il parametro PAR 1 MODUL, è impostato a 2, l'inverter utilizza una modulazione (space vector modulation, SVM) centrata compensata, tale da poter verificare l'effetto di riduzione dei tempi morti e dell'offset presente nelle misure.

Inoltre dai grafici che si ricavano dalle misure necessarie per la determinazione delle non-linearità dell'inverter, si riesce a determinare la resistenza statorica  $R_s$ . Viene calcolata come pendenza della retta avente in ordinata la tensione  $V$  e in ascissa la corrente  $I$ .

In pratica si prendono 2 punti della retta sopracitata a correnti elevate (serie 1 nei grafici), e si applica la semplice legge di Ohm,  $V = R \cdot I$ .

Risulta nel caso specifico,  $R_s = \frac{\Delta V}{\Delta I}$ , che determina un valore abbastanza accurato della resistenza, da utilizzare poi nei vari test da effettuare.

### 3.1 Manuale di descrizione

Per effettuare l'identificazione delle non linearità sul banco di lavoro, prendere l'alimentatore e collegarlo innanzitutto all'alimentazione, contemporaneamente si accende automaticamente il display nella schermata iniziale.

Mantenendo il motore e freno spenti impostare i parametri preliminari della prova.

Verificato che il valore di tensione di bus UDC sul display sia circa pari a 24,3 – 24,4 volt, come prima operazione fissare il tipo di configurazione voluta, quindi premere il tasto PAR, viene visualizzata una schermata con indicati i parametri PAR e VAL.

Tramite il tasto SEL si seleziona PAR, che inizia a lampeggiare, con l'utilizzo dei tasti UP e DOWN si imposta il valore PAR 0, di seguito sempre con l'ausilio del tasto SEL inizia a lampeggiare la variabile VAL, con la stessa modalità fatta per il valore di PAR, impostare il valore 5. Ciò significa che si sta usando il banco in configurazione 5, come si nota sul display iniziale con l'abbreviazione CFG 5.

A questo punto tornare su PAR e dopo averlo evidenziato, con l'ausilio dei tasti UP e DOWN posizionarsi sul valore 1 che riguarda la modulazione e modificare anche il valore di VAL settandolo al valore 1, ovvero modulazione di tipo centrata non compensata.

Premere il tasto PAR e tornare alla visualizzazione iniziale.

E' consigliato, ogni volta che si modificano dei parametri nel banco, effettuare un'operazione di reset; premere quindi contemporaneamente i tasti TRIG e SEL per alcuni secondi fino a quando tale step è completato.

A questo punto è possibile iniziare a svolgere le misure.

Si affronta come prima prova la determinazione delle non linearità in assenza di compensazione con il vettore  $V_a$  posto sull'asse  $\alpha$  e quindi a  $0^\circ$ , come conferma il valore di PHI sul display iniziale.

Per effettuare questo test, si varia la sola corrente del motore, premere quindi il tasto MOT SEL REF e l'indicazione CUR nella terza riga del display inizia a lampeggiare, ora attraverso la manopola MOT REF variare detto valore di 100mA ad ogni misura, per un range consigliato compreso tra 0 e 4,5 A, leggendo la relativa tensione V.

Si consiglia di spegnere il motore tra una misura e la successiva, in quanto il suo surriscaldamento comporta un errore nel valore trovato, specialmente dopo un certo tempo che si trova in posizione MOT ON.

Riportare i dati ottenuti in una tabella e costruire il relativo grafico.

Per ogni grafico creato, visualizzare la relativa equazione della linea di tendenza, in modo tale da poter ricavare anche il valore della resistenza di statore  $R_s$ , che nel nostro caso risulta all'incirca di  $0,3145\Omega$ .

Si passi ora allo svolgimento delle successive prove con la compensazione attivata.

Per la spiegazione puntuale di come essa sia attuata, si rimanda alla fine di tale paragrafo.

Innanzitutto, come prima operazione, premere il tasto PAR, con gli indicatori UP e DOWN posizionarsi sulla visualizzazione del PAR 1 e attraverso il tasto SEL, modificare il valore di VAL settandolo a 2.

Sempre con l'utilizzo del tasto PAR ritornare nella videata principale.

A questo punto lasciando invariato il valore di PHI a  $0^\circ$ , svolgere tale prova, variando questa volta la corrente del motore CUR di 200mA per ogni misura, all'interno dello stesso range indicato in precedenza.

Successivamente, inserire anche questi dati in una tabella e utilizzarli per costruire un grafico che mette in evidenza , visualizzando l'equazione della linea di tendenza, l'effetto della compensazione rispetto al caso non compensato.

E' possibile verificare tale effetto anche per altre posizioni del vettore  $\alpha(V_a,0)$  ovvero, pensando agli assi  $\alpha$  e  $\beta$  posti su una circonferenza, ci si può posizionare con  $\alpha(V_a,0)$  in qualsiasi punto di essa.

In questo caso si è scelto di riscontrare la relativa efficacia nelle posizioni a  $90^\circ$  e  $225^\circ$ .

Per imporre tali valori, premere il tasti MOT SEL REF, fin tanto che il valore di PHI non lampeggia e successivamente impostare il valore desiderato tramite la manopola MOT REF.

Svolgere quindi le prove seguendo pedissequamente le precedenti e valutare l'efficacia del metodo di compensazione sempre attraverso i relativi grafici.

Una volta terminate le prove, spegnere definitivamente il motore premendo il tasto MOT ON e scollegare il banco dall'alimentazione.

### Codice C relativo alla compensazione delle non-linearità

```

/* tabella di compensazione dei tempi morti*/
#define TAB_DELTAIN          0.1f          // 100mA
#define TAB_INDMAX          9
#define TAB_UDELTA          ((float)(1.0/TAB_DELTAIN))
#define TAB_INMAX           ((float)(TAB_DELTAIN*TAB_INDMAX))
const float tab[TAB_INDMAX+1]={
    0.0072f,    // 0
    0.0098f,    // 1
    0.0118f,    // 2
    0.0125f,    // 3
    0.0125f,    // 4
    0.0125f,    // 5
    0.0125f,    // 6
    0.0125f,    // 7
    0.0125f,    // 8
    0.0125f};  // 9

float MC_Comp(float curr, float vbus)
/*****
*   Descrizione: compensazione dell'errore dovuto ai tempi morti
*****/
{
    unsigned short ind;
    float af;

    if(curr == 0)
    {
        return(0.0f);
    }
    if(curr < 0)

```

## Codice C relativo alla compensazione delle non-linearità

```
{
    curr = -curr;

    vbus = -vbus;
}
if(curr >= TAB_INMAX)
{
    return(vbus * tab[TAB_INDMAX]);
}
ind = (unsigned short)(curr * TAB_UDELTA);
curr -= ind * TAB_DELTA;
af = tab[ind + 1] - tab[ind];
af *= TAB_UDELTA;
af *= curr;
af += tab[ind];
return(vbus * af);
}
/* Dati i riferimenti di corrente idr e iqr, i PI di corrente producono le richieste di tensione
vdc vqc */

MCLibf_dq_alphabeta(vdc, vqc, &vac, &vbc); // cambio di riferimento da (d,q) ad (alfa, beta)
MCLibf_alphabeta_uvw(vac, vbc, &vuc, &vvc); // cambio di riferimento da (alfa,beta) a (u,v,w)
vwc=-vuc-vvc;
MCLibf_dq_alphabeta(idr, iqr, &iar, &ibr); // cambio di riferimento da (d,q) ad (alfa, beta)
MCLibf_alphabeta_uvw(iar, ibr, &iur, &ivr); // cambio di riferimento da (alfa,beta) a (u,v,w)
iwr=-iur-ivr;
eu=MC_Comp(iur, VBUS);
ev=MC_Comp(ivr, VBUS); // calcolo errore tramite tabella
ew=MC_Comp(iwr, VBUS);
vuc+=eu; // compensazione errore
vvc+=ev;
vwc+=ew;
MCLibf_uvw_alphabeta2(vuc, vvc, vwc, &vac, &vbc); // cambio rif da (u,v,w) a (alfa, beta)
MCLibf_xy_rt(vac, vbc, &modv, &phv); // cambio rif da (alfa, beta) a (ro, theta)
/* la routine di modulazione richiede il vettore di tensione in modulo e fase */
MCLibf_SVM(&modv, phv, VBUS, semiperdead, centered, &duty_u, &duty_v, &duty_w);
/* uscita della routine di modulazione sono i tre valori da impostare nei registri della
periferica del microcontrollore */
```

### 3.2 Dati e commenti

Per comprendere al meglio il significato della compensazione, si illustrano ora i dati e i rispettivi grafici ricavati durante le prove sul banco di lavoro.

La verifica dell'effettiva funzionalità del metodo attuato per svolgere la compensazione, può essere fatta posizionandosi con il vettore  $\alpha(V_a,0)$  in tutti i punti del cerchio.

Si è convenuti a scegliere come angoli nel nostro caso i valori:

- 0°: posizione del vettore su  $\alpha$ ;
- 90°: posizione del vettore su  $\beta$ ;
- 225°: posizione con angolo negativo nel terzo quadrante.

#### 3.2.1 Non linearità iniziale senza compensazione

I	V
0,0	0,0
0,1	0,33
0,2	0,43
0,3	0,48
0,4	0,53
0,5	0,56
0,6	0,6
0,7	0,63
0,8	0,66
0,9	0,70
1,0	0,73
1,1	0,76
1,2	0,79
1,3	0,83
1,4	0,86
1,5	0,89
1,6	0,92
1,7	0,95
1,8	0,98
1,9	1,01
2,0	1,05
2,1	1,08
2,2	1,11

I	V
2,3	1,14
2,4	1,17
2,5	1,21
2,6	1,24
2,7	1,27
2,8	1,31
2,9	1,34
3,0	1,37
3,1	1,40
3,2	1,44
3,3	1,47
3,4	1,50
3,5	1,53
3,6	1,56
3,7	1,59
3,8	1,62
3,9	1,64
4,0	1,68
4,1	1,71
4,2	1,74
4,3	1,78
4,4	1,80
4,5	1,83

Il grafico seguente mostra l'andamento della tensione di riferimento in funzione della corrente impostata.

- Serie1=curva che riporta i dati di tensione e corrente presenti in tabella soprastante.
- Serie2= retta che evidenzia l'andamento lineare della serie 1 per valori elevati di corrente.
- Serie3= retta  $R \cdot I$  con R, resistenza calcolata come pendenza della serie 1 per correnti elevate.
- Serie4= andamento dell'errore  $Err_a$ , calcolato come differenza tra la serie 1 e la serie 3.

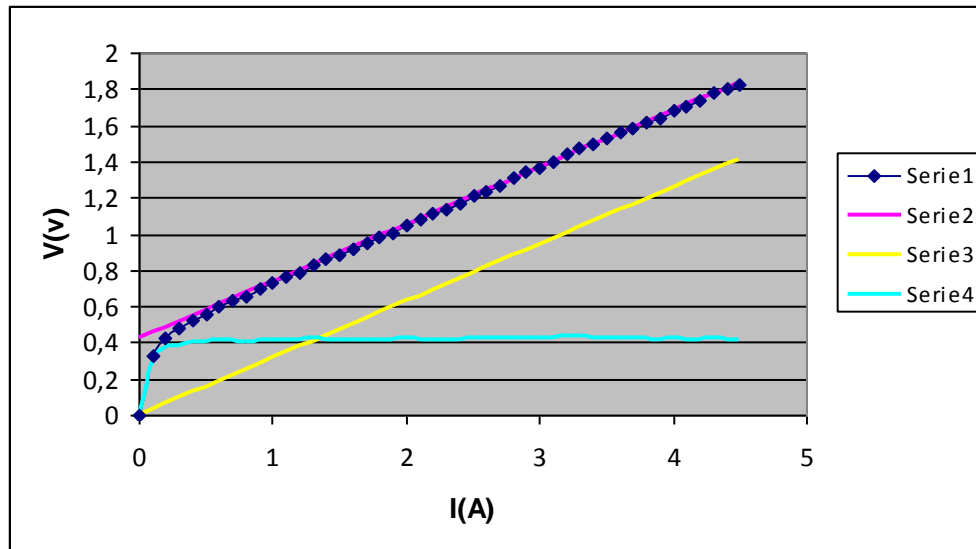


Fig.9 Grafico usato per la valutazione delle non-linearità

### 3.2.2 Non linearità compensate con vettore $\alpha$ posto a 0 gradi

I	V
0,0	0,0
0,2	0,11
0,4	0,20
0,6	0,27
0,8	0,33
1,0	0,40
1,2	0,46
1,4	0,52
1,6	0,58
1,8	0,64
2,0	0,71
2,2	0,77
2,4	0,83
2,6	0,90
2,8	0,96
3,0	1,04
3,2	1,10
3,4	1,16
3,6	1,22
3,8	1,28
4,0	1,35
4,2	1,41
4,4	1,49
4,6	1,59

Il grafico seguente mette in evidenza il grado di compensazione dei tempi morti, con una posizione del vettore  $\alpha(V_a,0)$  pari a  $0^\circ$ .

Serie1=curva che riporta i dati di tensione e corrente presenti in tabella.

Serie2=retta  $R \cdot I$ , con R trovata come pendenza della serie 1 per valori di corrente elevati.



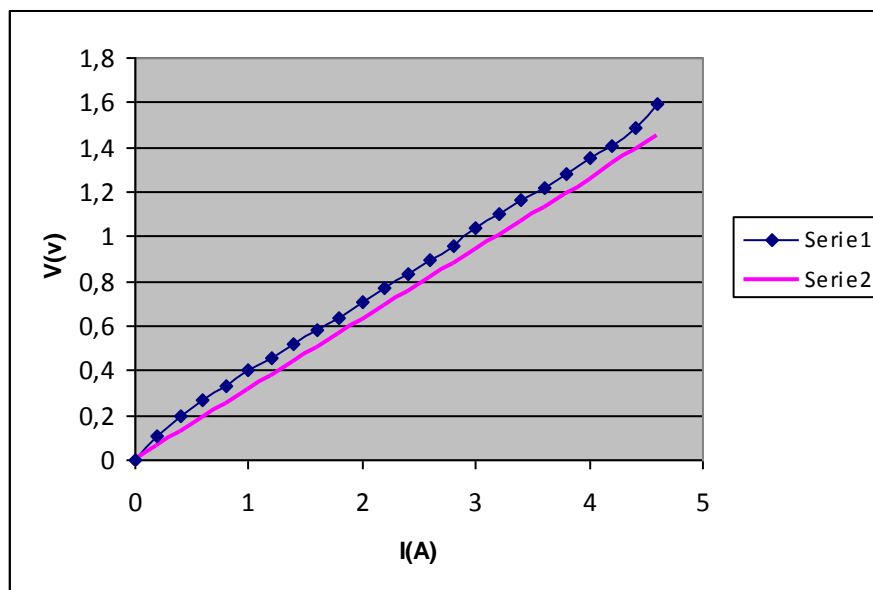


Fig.10 Compensazione delle non-linearità con  $\alpha$  posto a  $0^\circ$

### 3.2.3 Non linearità compensate con vettore $\alpha$ posto a $90^\circ$

I	V
0,0	0,0
0,4	0,25
0,8	0,36
1,2	0,46
1,6	0,58
2,0	0,70
2,4	0,81
2,8	0,92
3,2	1,02
3,6	1,13
4,0	1,24
4,4	1,34

Il grafico seguente mostra l'effetto della compensazione sulla retta blu relativa a dati di tensione e corrente, con un vettore  $\alpha$  ( $V_a, 0$ ) pari a  $90^\circ$ .

Serie1= curva che riporta i valori di tensione e corrente presenti in tabella.

Serie2= retta  $R \cdot I$ , con  $R$  determinata come pendenza della serie 1 per valori di corrente elevati.

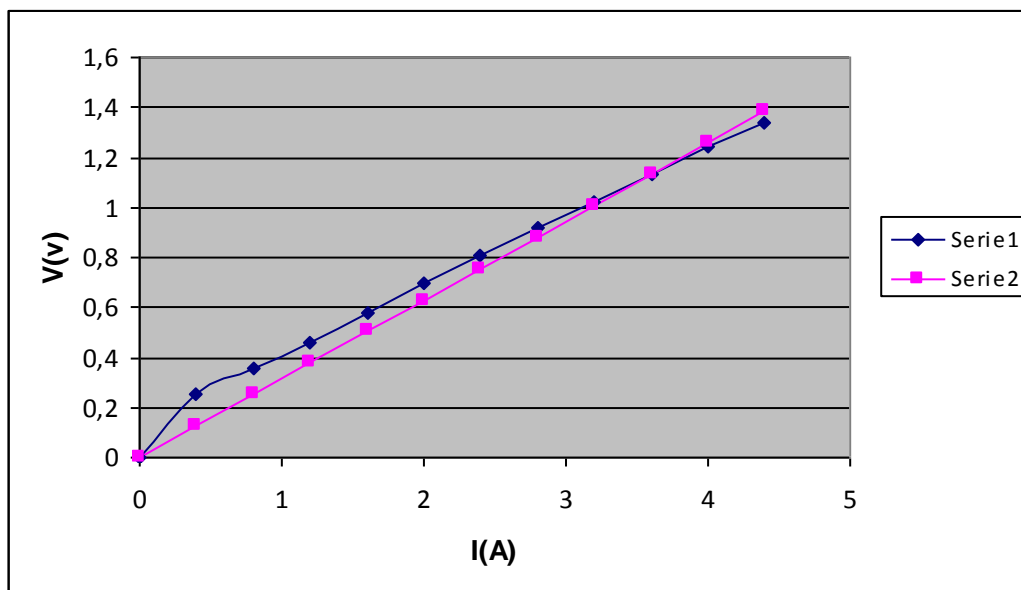


Fig.11 Compensazione delle non linearità con  $\alpha$  posto a  $90^\circ$

### 3.2.4 Non linearità compensate con vettore $\alpha$ posto sul 3°quadrante

I	V
0,0	0,0
0,4	0,19
0,8	0,32
1,2	0,44
1,6	0,56
2,0	0,68
2,4	0,8
2,8	0,92
3,2	1,05
3,6	1,18
4,0	1,31
4,4	1,47

Il grafico seguente evidenzia ancora l'effetto della compensazione, ma in una posizione di  $\alpha(V_a, 0)$  pari a  $225^\circ$ .

Serie 1= curva che riporta i valori di tensione e corrente presenti in tabella

Serie 2=retta  $R \cdot I$ , con  $R$  calcolata come pendenza della serie 1 per valori di corrente elevati.

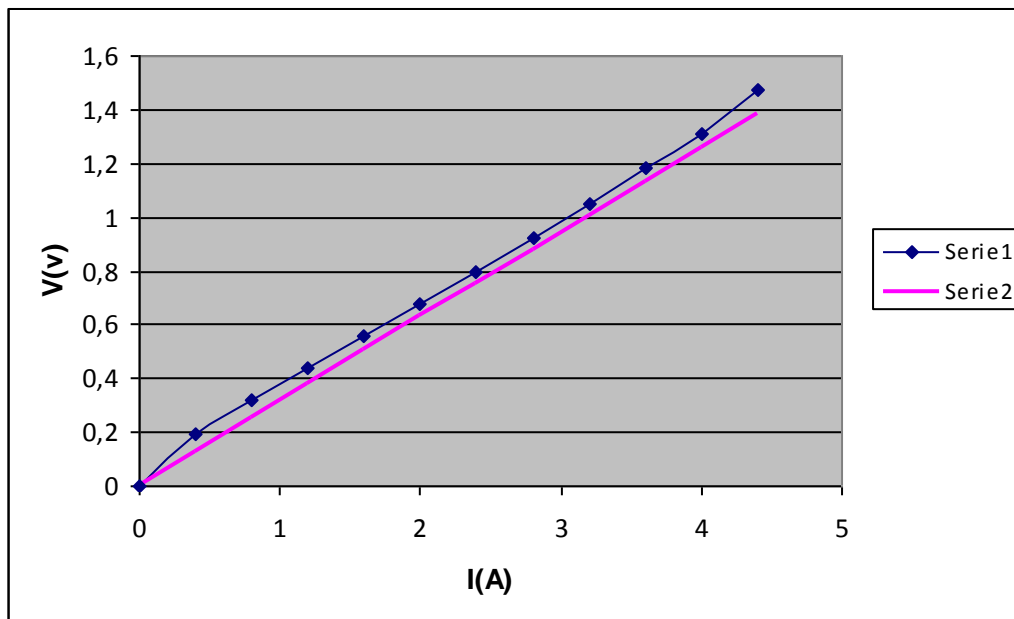


Fig.12 Compensazione delle non linearità con  $\alpha$  posto a  $225^\circ$

Si prenda in riferimento il primo grafico, relativo alla modalità di funzionamento non compensata. Su tale grafico, si è voluto esporre oltre alla curva blu formata dai dati di corrente e tensione sopra riportati, anche la retta gialla di andamento lineare, ovvero senza offset, che è quella di riferimento per poter paragonare successivamente le curve di dati dei casi compensati e osservarne l'effetto; la curva rosa relativa al solo offset non compensato e infine la curva azzurra riguardante l'errore su  $\alpha$   $Err_\alpha = \frac{4}{3} Err_{ph}$ , che come si nota, risulta costante per valori alti di corrente dove la retta è lineare, mentre invece decade in prossimità del "ginocchio" seguendo di pari passo l'andamento della curva blu.

Nei grafici dei casi compensati, si vede chiaramente l'effetto della compensazione attuata, in quanto la differenza tra andamento lineare e curva blu è abbastanza piccola in tutti i casi. Ci si accorge comunque che si poteva aumentare ancora di una piccola quantità il valore di compensazione per poter ottenere una totale sovrapposizione delle due curve.

## 4. TEST A VUOTO

### 4.1 Come impostare il test

Dopo aver misurato il valore della resistenza di statore  $R_s$ , il primo passo da effettuare dopo la compensazione è la prova a vuoto.

Le misure di tensione e corrente vengono acquisite al fine di ricavare l'impedenza del circuito equivalente di fig.3 riportato a pag 5, semplificato mediante l'ipotesi  $s=0$  che si tramuta in una corrente di rotore pari a zero ed un circuito aperto sul lato di rotore.

Questo test fornisce la potenza attiva  $P$ , il valore efficace della tensione concatenata  $U_{ph-ph}$  e il valore efficace della corrente di fase  $I_s$ .

Ottenuti questi dati, risultano necessarie una serie di elaborazioni delle misure effettuate per determinare gli altri parametri relativi a questo test, tramite le seguenti formule:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{3} U_{ph-ph} I_s \\ Q &= \sqrt{S^2 - P^2} \\ P^{(1)} &= P - 3R_s I_s^2 \\ Q^{(1)} &= Q \\ S^{(1)} &= \sqrt{P^{(1)2} + Q^{(1)2}} \\ I^{(1)} &= I_s \\ U^{(1)} &= \frac{S^{(1)}}{3I^{(1)}} \end{aligned} \tag{11}$$

Dove:

- $U_{ph-ph} = U_{picco} \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}}$ , dove  $U_{picco}$  è la tensione di picco dell'onda sinusoidale di ingresso.
- $I_s = \frac{I_f}{\sqrt{2}}$ , dove  $I_f$  è la corrente di fase del motore.
- La potenza attiva viene calcolata e ricavata direttamente dal banco di lavoro nel modo seguente:

*/\* iam e ibm sono le correnti misurate\*/*

*/\* req\_a e req\_b sono le effettive tensioni imposte in uscita\*/*

$$apow = 1.5f \cdot (iam \cdot req\_a + ibm \cdot req\_b);$$

Dal momento che il test a vuoto è eseguito senza caricare il motore, la potenza attiva  $P^{(1)}$  nella sezione (1) è la somma delle perdite meccaniche  $P_{fw}$  e delle perdite nel ferro  $P_{fe}$ .

La velocità del motore durante il test è costante, vicino a quella nominale, in modo che le perdite meccaniche possono essere considerate costanti, mentre le perdite nel ferro variano con il quadrato della tensione  $U^{(1)}$ , legata al regime del flusso statorico.

Il setup del nostro banco di lavoro è costituito da un motore asincrono accoppiato con un motore sincrono a magneti permanenti (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM).

Entrambi i motori sono alimentati tramite un inverter.

Per simulare le condizioni della prova a vuoto occorre alimentare il motore IM a 50Hz e tensione crescente, mentre il motore PMSM è lasciato non alimentato, in quanto funziona solamente da freno.

Dopo aver calcolato tutti i parametri tramite le formule sopra riportate, è possibile costruire 3 grafici, di seguito riportati, relativi alle perdite nel ferro e meccaniche, alla curva di magnetizzazione  $U^{(1)} = f(I_u)$  e alla resistenza  $R_o$ .

La resistenza  $R_o$  viene calcolata mediante la formula  $R_o = \frac{3U^{(1)2}}{P_{fe}}$ . (12)

Le perdite nel ferro  $P_{fe}$ , vengono rappresentate tramite  $R_o$ , in quanto la resistenza è l'unico componente attraverso il quale può essere dissipata una potenza attiva.

Mentre elementi come l'induttanza e la capacità, dissipano potenza reattiva.

## 4.2 Manuale di descrizione

Per effettuare la prova a vuoto sul banco di lavoro, prendere l'alimentatore e collegarlo innanzitutto all'alimentazione, contemporaneamente si accende automaticamente il display nella schermata standard.

Mantenendo il motore e freno spenti impostare i parametri preliminari della prova. Verificato che il valore di UDC sul display sia circa pari a 24,3 – 24,4 volt, come prima operazione si fissi il tipo di configurazione prescelta, quindi premere il tasto PAR sulla tastiera, viene visualizzata una schermata con indicati i parametri PAR e VAL.

Tramite il tasto SEL si seleziona PAR, che inizia a lampeggiare, con l'utilizzo dei tasti UP e DOWN si imposta il valore PAR 0.

Si preme nuovamente sul tasto SEL e VAL inizia a lampeggiare, sempre scorrendo con UP e DOWN fissare tale parametro al valore 2, il quale significa utilizzo del motore in configurazione 2, come si può notare del resto dalla scritta CFG 2 sulla schermata standard, a cui si è ritornati dopo il settaggio premendo nuovamente il tasto PAR.

Tale configurazione permette di impostare valori di tensione VF e frequenza FRE, premere il tasto MOT SEL REF e l'etichetta relativa a FRE inizia a lampeggiare, perciò tramite la manopola presente accanto al display, denominata MOT REF, raggiungere il valore di frequenza FRE pari a 50 Hz. Per velocizzare il settaggio, ruotare la manopola e contemporaneamente premere il tasto 100, in modo tale che il valore aumenti di 10 Hz ad ogni scatto.

Si passa ora a fissare un valore di tensione VF, attraverso il tasto MOT SEL REF, la scritta VF inizia a lampeggiare, imporre con lo stesso procedimento effettuato per la frequenza, un valore di VF consigliato nell'intorno di 3,5V, in quanto per valori più bassi non si ottengono significative entità di corrente IF.

Lo step successivo è quello di imporre un riferimento di velocità del freno (SPE sul display).

Premere il tasto BRA MEA/REF e di conseguenza la scritta SPE inizia a lampeggiare, prima di impostare il valore di 1500 giri/min, controllare che il valore iniziale sia SPE= 0 R, dove R sta per riferimento.

Procedere quindi al settaggio ruotando la manopola BRA REF contemporaneamente con il tasto 100 premuto fino ad arrivare al valore SPE pari a 1500 R.

Successivamente, si fissi un valore di corrente per il freno tramite il tasto BRA CUR/SPE, nell'intorno di un range compreso tra 0,6 e 0,65 A in modo da trascinare il motore totalmente con esso.

Per verificare ciò nella pratica, accendere solamente il freno premendo il tasto BRA ON/OFF, questo inizierà a funzionare, si deve verificare che il valore di velocità SPE misurata, identificata dalla sigla M dopo il numero, raggiunga all'incirca il valore di riferimento.

Se ciò accade, significa che il freno funziona come voluto, altrimenti si deve provvedere a modificare il valore della corrente del freno sempre attraverso l'uso del tasto BRA ON/OFF .

Si può iniziare a questo punto l'esecuzione delle misure.

Mantenere la tensione all'interno di un intervallo compreso tra 3,5 e 10 V e relativo valore di corrente variabile tra 2,4 e 7 A circa.

Valori all'esterno di questo intervallo, più piccoli non sono significativi, mentre più alti possono causare problemi di durata dei fusibili presenti sulle schede del banco di lavoro.

Si legga sul display, ad ogni variazione della tensione VF all'interno del range dato, i relativi valori di corrente IF e di potenza POW e li si inseriscano in una tabella per l'esecuzione dei successivi calcoli.

### 4.3 Grafici e commenti

In questa sezione vengono documentati i grafici di tale prova ottenuti da una serie di dati calcolati con le formule sopra esposte.

Questi danno un'indicazione della correttezza e della precisione delle misure effettuate, tanto più dei metodi attuati all'interno del banco.

Per la visione della relativa tabella completa dei dati, si rimanda al foglio di calcolo excel visionabile in allegato.

Il test a vuoto è stato utilizzato anche per determinare la curva di magnetizzazione del motore  $U^{(1)} = f(I_{\mu})$ , come riportato nel grafico seguente di Fig.13.

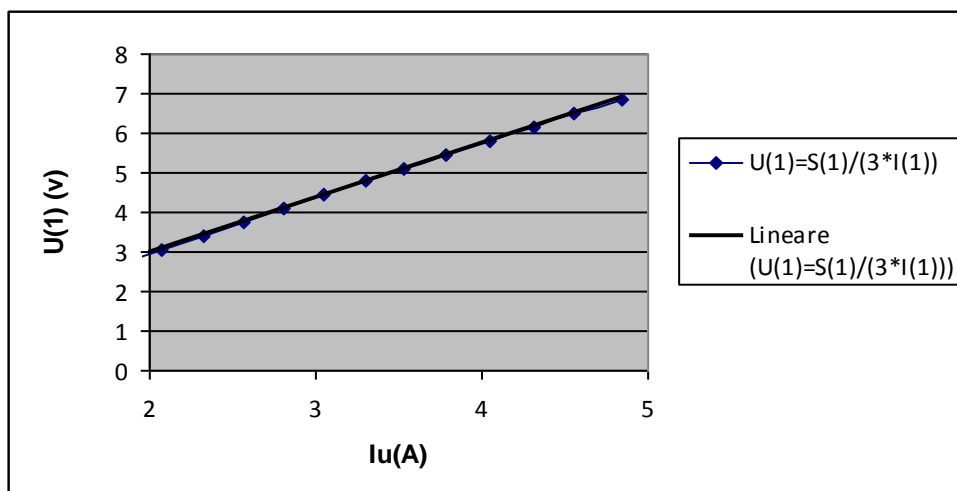


Fig.13 Curva di magnetizzazione  $U^{(1)}$  in funzione di  $I_{\mu}$

Il seguente grafico di Fig.14, mostra la potenza attiva  $P^{(1)} = P_{fw} + P_{fe}$  per diverse tensioni di ingresso. La potenza meccanica  $P_{fw}$ , causata da attriti, è ottenuta mediante estrapolazione della curva qui di seguito riportata.

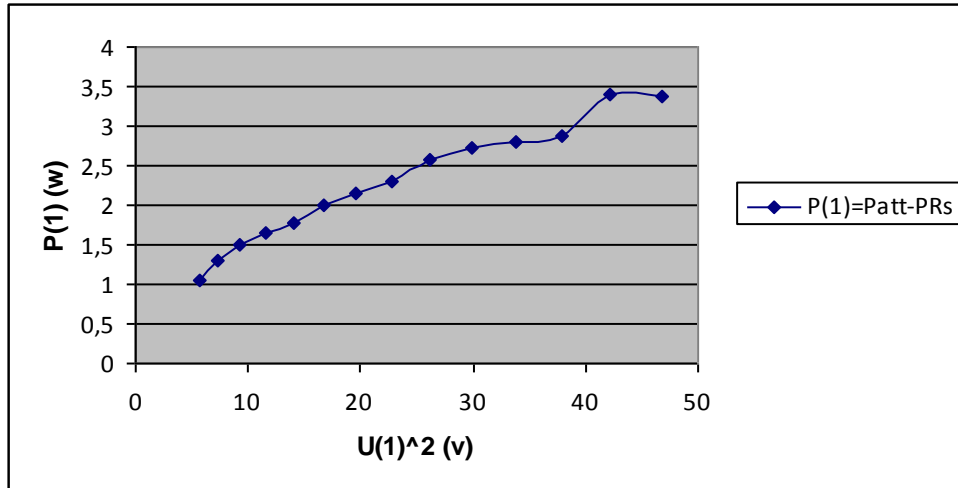


Fig.14 Perdite nel ferro e meccaniche in funzione di  $U^{(1)}$

Il grafico seguente di Fig.15, mette in evidenza l'andamento della resistenza  $R_0$ , che viene calcolata mediante la formula  $R_0 = \frac{3U^{(1)2}}{P_{fe}}$  e la sua indipendenza dalla tensione.

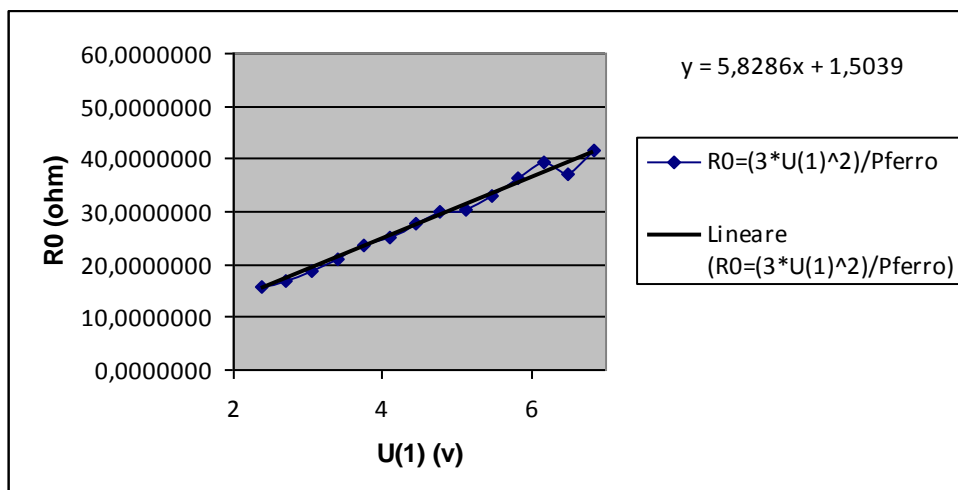


Fig.15 Andamento della resistenza  $R_0$  in funzione di  $U^{(1)}$

Nei grafici qui sopra riportati, si può apprezzare un andamento abbastanza lineare per le perdite e lineare per la magnetizzazione, che rispecchiano esattamente le ipotesi di lavoro richieste.

La magnetizzazione risulta così lineare in quanto non si è ancora raggiunta la zona di saturazione, perché si sta lavorando con correnti abbastanza basse.

Per vedere tale fenomeno, occorrerebbe aumentare la corrente  $I_\mu$ .

Si può notare al contrario, un andamento di  $R_o$  crescente, fatto che non soddisfa la costanza richiesta dalla tendenza che ci si aspettava.

Si ricorda a tale proposito che il motore in dotazione ha bassa tensione nominale, perciò alcuni parametri potrebbero risultare leggermente modificati.



## 5. TEST A CARICO CRESCENTE

### 5.1 Come impostare il test

La stima dei rimanenti parametri del circuito di figura 2 è normalmente ottenuta con i test a rotore bloccato.

Tuttavia, in questo genere di test il rotore concatena forze magnetomotrici di frequenza molto superiore a quella massima di scorrimento, deteriorando la qualità dei risultati per la presenza di effetti secondari sui conduttori come l'effetto pelle.

Al posto di questa tipologia di test, si possono utilizzare quelli a carico crescente con motore in rotazione. Il motore sotto test è stato collegato ad un motore in rotazione.

Il motore sotto test è stato collegato ad un altro motore sincrono a magneti permanenti che agisce come carico attivo comandato da un inverter tradizionale.

Il problema come nel caso del test a vuoto, è che non si dispone di una misura diretta delle tensioni di fase generate dall'inverter che comanda il motore IM.

Si consiglia di basarsi sui riferimenti, dopo che sia stata attuata un'opportuna strategia di compensazione dei tempi morti.

I test a carico crescente restituiscono la potenza attiva  $P$ , il valore efficace della tensione concatenata  $U_{ph-ph}$  ed il valore efficace della corrente di fase, così come la velocità elettromeccanica  $\omega_{me}$  e lo scorrimento  $s$ .

Le misure sono successivamente elaborate e i valori di  $L_\sigma$  e  $R_k$  vengono determinati con buona accuratezza.

Per ottenere tutte le misure desiderate occorre effettuare una procedura di post elaborazione attraverso le seguenti formule messe in successione.

$$U_s = \frac{U_{ph-ph}}{\sqrt{3}}$$

**PASSO 1**

$$S = 3 * U_s * I_s$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$P^{(1)} = P - 3 * R_s * I_s$$

**PASSO 2**

$$Q^{(1)} = Q$$

$$S^{(1)} = \sqrt{P^{(1)2} + Q^{(1)2}}$$

$$I^{(1)} = I_s$$

$$U^{(1)} = \frac{S^{(1)}}{3I^{(1)}}$$

$$I_\mu = f(U^{(1)})$$

$$Q_o = 3 * U^{(1)} * I_\mu$$

**PASSO 3**

$$L_s = \frac{U^{(1)}}{\Omega_s * I_\mu}$$

(13)

$$P_{fe} = 3 \frac{U^{(1)2}}{R_0}$$

$$P^{(2)} = P^{(1)} - P_{fe}$$

**PASSO 4**

$$Q^{(2)} = Q^{(1)} - Q_o$$

$$S^{(2)} = \sqrt{P^{(2)2} + Q^{(2)2}}$$

$$U^{(2)} = U^{(1)}$$

$$I^{(2)} = \frac{S^{(2)}}{3U^{(2)}}$$

**PASSO 5**

$$L_\sigma = \frac{Q^{(2)}}{3\Omega_s I^{(2)2}}$$

$$R_k = \frac{sP^{(2)}}{3I^{(2)2}}$$

## 5.2 Manuale di descrizione

Per effettuare la prova a carico crescente sul banco di lavoro, prendere l'alimentatore e collegarlo innanzitutto all'alimentazione, contemporaneamente si accende automaticamente il display nella schermata standard.

Mantenendo il motore e freno spenti impostare i parametri preliminari della prova. Verificato che il valore di UDC sul display sia circa pari a 24,3 – 24,4 volt, come prima operazione fissare il tipo di configurazione desiderata, quindi premere il tasto PAR, viene visualizzata una schermata con indicati i parametri PAR e VAL.

Tramite il tasto SEL si seleziona PAR, che inizia a lampeggiare, con l'utilizzo dei tasti UP e DOWN si imposta il valore PAR 0.

Premere nuovamente sul tasto SEL e VAL inizia a lampeggiare, sempre scorrendo con i tasti UP e DOWN fissare tale parametro al valore 2, (il quale significa utilizzo del motore in configurazione 2), come si può notare del resto dalla scritta CFG 2 sulla schermata standard, a cui si è ritornati dopo il settaggio premendo nuovamente il tasto PAR.

Tale configurazione permette di impostare valori di tensione VF e frequenza FRE, premere il tasto MOT SEL REF e l'etichetta relativa a FRE inizia a lampeggiare, perciò tramite la manopola presente accanto al display, denominata MOT REF, raggiungere il valore di frequenza FRE pari a 50 Hz. Per velocizzare il settaggio, ruotare la manopola e contemporaneamente premere il tasto 100, in modo che il valore aumenti di 10 Hz ad ogni scatto.

Si passa ora a fissare un valore di tensione VF, attraverso il tasto MOT SEL REF, la scritta VF inizia a lampeggiare, imporre con lo stesso procedimento effettuato per la frequenza, un valore di VF consigliato costante per tutte le misure pari a 7,5 V, in modo da ottenere circa 5 A di corrente del motore IF come valore iniziale.

In questa prova impostare i valori di velocità SPE e corrente CUR del freno entrambi a zero.

Per controllare tale settaggio premere il tasto BRA MEA/REF verificando direttamente sul display le scritte SPE= 0 R e CUR= 0.

A questo punto accendere il motore, è consigliabile effettuare questa operazione con un valore di tensione VF più basso di quello impostato precedentemente circa 4,5 V, in quanto è stato fissato un valore di SPE per il freno pari a 0 R e il motore non essendo trascinato dal freno si trova nella condizione di scorrimento massimo, ovvero passa da SPE= 0 a SPE= 1500 giri/min in un tempo brevissimo. Il superamento della soglia di assorbimento di potenza dell'alimentatore, porta quindi all'immediato spegnimento del banco.

Riportare subito dopo l'accensione il valore di VF a 7,5 V, valore imposto per poter affrontare la prova.

Successivamente si provveda ad attivare il freno ed iniziare le misurazioni, tenendo costante una tensione pari a 7,5 V e variando di volta in volta la corrente di freno di 0,3 A tramite la manopola BRA REF, leggendo come risultati ad ogni misura il valore della corrente IF, quello di potenza POW direttamente sul display e il relativo valore di SPE del freno rilevata nel campo delle misure (M).

Effettuare alcune misurazioni, in un range di corrente di freno CUR compreso tra 0 e 1,8 A, valore per cui si osserva una diminuzione significativa della velocità.

Inserire poi i dati ottenuti in una tabella per l'esecuzione dei calcoli successivi.

### 5.3 Grafici e commenti

In questa sezione vengono documentati i grafici di tale prova ottenuti da una serie di dati calcolati con le formule sopra esposte.

Questi danno un'indicazione della correttezza e della precisione delle misure effettuate, tanto più dei metodi attuati all'interno del banco.

Per la visione della relativa tabella completa dei dati, si rimanda al foglio di calcolo excel visionabile in allegato.

Il grafico seguente di Fig.16 mette in evidenza la costanza dell'induttanza di statore  $L_s$ , al crescere della potenza attiva  $P_{att}$ .

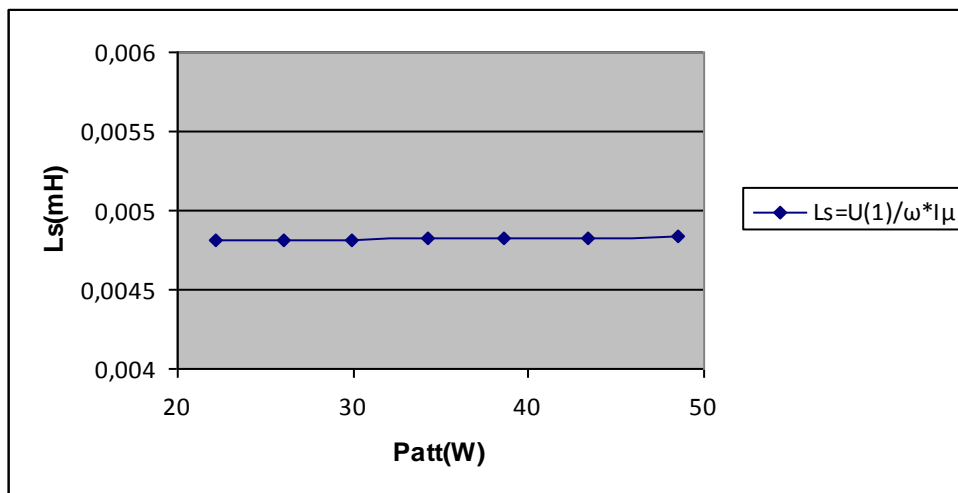


Fig.16 Valutazione dell'induttanza di statore  $L_s$  in funzione della potenza attiva  $P_{att}$

La seguente Fig.17 mostra l'andamento decrescente dell'induttanza di statore  $L_s$  all'aumentare della corrente di magnetizzazione  $I_\mu$ . Ciò consente di trarre qualche indicazione per utilizzare i dati in funzione delle condizioni di lavoro del motore, dal momento che la corrente di magnetizzazione  $I_\mu$  non è direttamente misurabile.

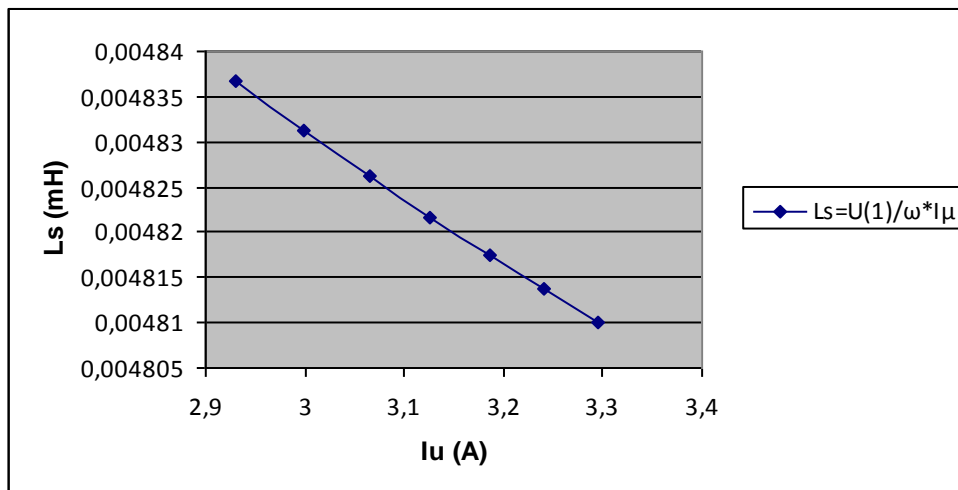


Fig.17 Valutazione andamento induttanza di statore  $L_s$  in funzione della corrente che la attraversa

La seguente Fig.18 evidenzia l'andamento decrescente di  $L_\sigma$  in funzione della potenza attiva  $P_{att}$ . Si può notare che l'induttanza di dispersione risulta costante solo per valori di potenza più elevati.

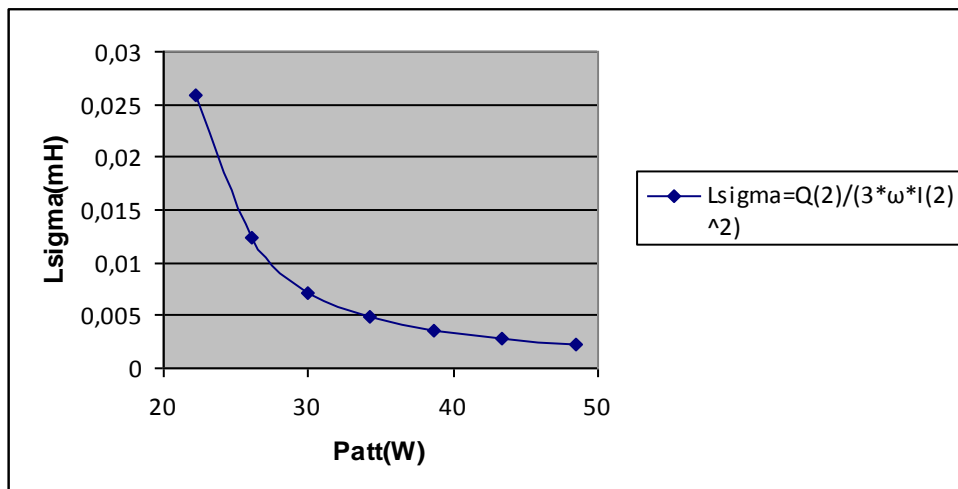


Fig.18 Valutazione dell'induttanza di dispersione in funzione della potenza attiva

Il grafico seguente di Fig.19 fa vedere un andamento di  $L_\sigma$  simile a quello di Fig.18, con la differenza che si ottiene una costanza nei valori di tale induttanza, solo per valori più alti di corrente  $I(2)$ .

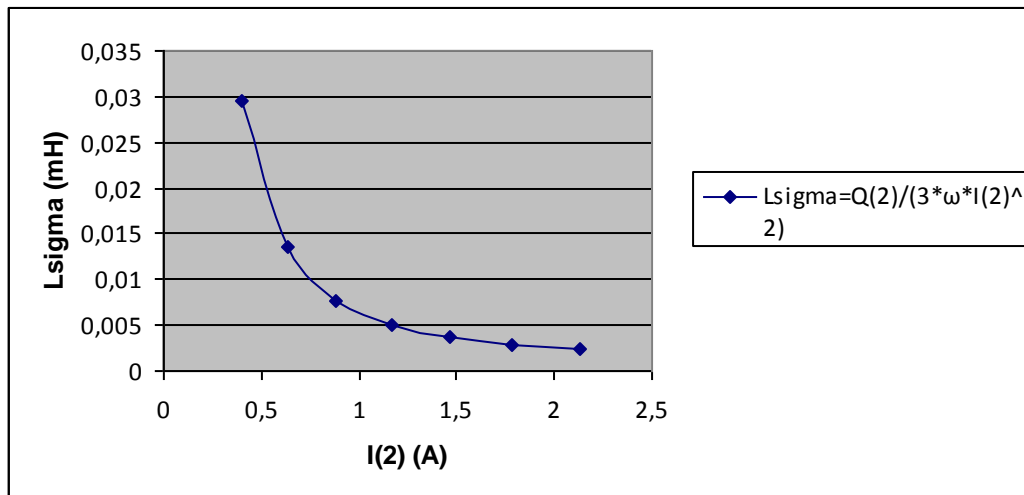


Fig.19 Valutazione andamento induttanza di dispersione in funzione della corrente che la attraversa

In questi grafici sopracitati, relativi al test a carico crescente, si può notare immediatamente un andamento corretto dell'induttanza di statore  $L_s$ , che risulta come da richiesta pressoché costante attorno ad un valore di 48mH.

Un risultato opposto si ottiene invece dall'induttanza di dispersione  $L_\sigma$ , che come si nota chiaramente fornisce risultati abbastanza verosimili e costanti solo per valori di potenza  $P_{att}$  più elevati, mentre i primi valori ottenuti per basse potenze sono completamente errati.

Per tale prova si sono svolti numerosi tentativi per cercare di ottenere valori di  $L_\sigma$  più corretti, ma nessuno è andato a buon fine.

## 6. CONCLUSIONI

L'esperienza nel suo complesso, è risultata positiva sia da un punto di vista dei risultati ottenuti, (che a parte qualche eccezione -induttanza di dispersione  $L_\sigma$ , sono stati soddisfacenti) sia da un punto di vista delle conoscenze acquisite.

E' stato possibile, seppur con un banco di lavoro composto di due motori dalle prestazioni modeste, riscontrare un andamento generale dei vari parametri del motore paragonabile a quelli ricavati su motori più performanti.

Lo svolgimento di tali prove, ha consentito di approfondire molti concetti studiati nella teoria degli azionamenti e inoltre aiutato sicuramente a migliorare l'approccio nei confronti dei problemi che si possono manifestare durante il relativo sviluppo.

Questa esperienza è stata svolta ai fini universitari, per fornire un riferimento per gli studenti del Ciclo di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccatronica che durante il laboratorio del corso di Azionamenti Elettrici Industriali, si troveranno a ripetere le stesse misure; potranno quindi seguire i passi descritti nella tesi e confrontare i risultati ottenuti, contribuendo magari a perfezionarli ulteriormente.

Di fatto ci si accorge osservando i grafici relativi alla compensazione dei tempi morti di pagg. 29-32, che essa poteva essere ancora migliorata di una piccola quantità, per eliminare totalmente l'errore di offset nelle misure e ottenere quindi una totale sovrapposizione della curva dei dati di tensione e corrente (blu) con la retta rosa di andamento lineare.

Per ottenere una tendenza dei grafici come nelle figg. 9-12 (pagg29-32), si è inizialmente utilizzata la configurazione 1 descritta a pag 17, ma dopo averla realizzata e attuata, si è capito che non forniva gli effetti desiderati; a questo punto si è scelto di crearne una nuova (configurazione 5, descritta a pag.20), che invece ha dato fin da subito riscontri positivi per il metodo in questione.

In conclusione, nonostante i numerosi tentativi di svolgimento del test nell'affinare la qualità delle misurazioni, si può presupporre che effettuando ulteriori prove è possibile raggiungere un livello di accuratezza delle misurazioni ancora migliore.

## **7. BIBLIOGRAFIA**

- [1] S. Bolognani, M. Zigliotto, dispense del corso di Fondamenti di Macchine e Azionamenti Elettrici, Università degli Studi di Padova, 2008.
- [2] M. Zigliotto, "Esperienze didattiche con motore asincrono", Università degli Studi di Padova, 2012
- [3] Renesas Electronic, "User's manual of Micro RX62T", Ottobre 2010.