

A. DI GERLANDO

CARATTERIZZAZIONE ENERGETICA DI MOTORI
ELETTRICI DI PICCOLA POTENZA
PER APPLICAZIONI AD ALTA VELOCITÀ

Workshop AC Motor Drives Technology
Sala Convegni della Fiera di Vicenza
Vicenza, 7 Maggio 2004
ATTI su CD



**POLITECNICO DI MILANO
DIPARTIMENTO DI ELETTROTECNICA**

20133 MILANO - Piazza Leonardo da Vinci, 32 - Italy
Tel. +39 022399/3702 - 3740 - 3741 - Fax +39 0223993703
Telex 333467 POLIMI - I

Relazione sulla attività svolta dalla Unità di Milano nell'ambito del PRIN 2001 dal Titolo nazionale:

**“Miglioramento del rendimento energetico di motori e azionamenti elettrici
per applicazioni industriali e civili”**

Coordinatore Nazionale Prof. Aldo Boglietti.

***Tema dell'Unità di Milano: “Caratterizzazione energetica di motori elettrici di piccola potenza
per applicazioni ad alta velocità”.***

Responsabile locale: Prof. Antonino Di Gerlando

**Partner industriale cofinanziatore:
Ametek Italia S.r.l.**



Scopo della ricerca è stata l'analisi, la modellizzazione e lo studio dei criteri di riprogettazione di motori ad alta velocità per uso domestico (potenza: 1-1.5 kW; velocità: 30000-50000 giri/min), al fine di una loro caratterizzazione energetica e con l'obiettivo di incrementarne le prestazioni e il rendimento.

Tali motori, prodotti in grande serie (alcuni milioni/anno), hanno un rilevante impatto energetico nel settore delle applicazioni civili.

Descrizione degli obiettivi della ricerca

L'obiettivo generale si è sviluppato come segue:

- analisi preliminare dei motori ad alta velocità;
- indagine su normative e prescrizioni funzionali del prodotto;
- valutazione critica dei metodi per la misura delle prestazioni;
- studio delle caratteristiche costruttive e funzionali del motore universale (MU);
- indagini su motorizzazioni alternative;
- sviluppo di un modello circuitale equivalente complessivo del MU;
- con riferimento al sistema aspirapolvere, sviluppo di un modello della turbina accoppiata;
- validazione numerica e sperimentale del modello circuitale globale;
- analisi comparativa di motorizzazioni alternative;
- studio delle opzioni per il miglioramento delle prestazioni del MU;
- studio teorico e sperimentale della commutazione in c.a., ai fini della stima della durata di vita delle spazzole;
- sviluppo di algoritmi di riprogettazione del MU per un aumento delle prestazioni energetiche;
- studio migliorativo del rendimento del sistema motore-turbina, con modifica della turbina;
- realizzazione di un banco prova per motori ad alta velocità.

Svolgimento della ricerca e suoi risultati

Le attività sviluppate hanno sostanzialmente seguito il programma di ricerca iniziale.

Pur avendo dedicato una parte delle attività alla analisi di soluzioni alternative al MU (in particolare, si è studiata la applicabilità di soluzioni con rotore a magnete permanente ed alimentazione elettronica), particolare attenzione è stata dedicata al MU, perché alla luce delle analisi condotte si è rivelato ancora largamente conveniente, per l'uso considerato, in termini di costi di produzione e di semplicità di regolazione.

L'applicazione di riferimento per la ricerca è quella del sistema aspirapolvere, di larghissimo uso, prodotto su larga scala dal partner industriale cofinanziatore (Ametek Italia S.r.l.).

Sono stati approfonditi i seguenti aspetti:

- A. modellistica del funzionamento globale e di dettaglio del MU;
- B. modellistica di progetto del MU, e sviluppo di metodi di riprogettazione per il miglioramento delle prestazioni;
- C. modellistica del sistema motore-turbina; turbine ad efficienza aeraulica migliorata; realizzazione di prototipi;
- D. realizzazione di un banco prova motori ad alta velocità.

A. Modellistica globale e di dettaglio del funzionamento del MU

E' stata sviluppata una modellistica del funzionamento complessivo del MU (legami tensione-corrente, caratteristica meccanica, perdite), in grado di rendere conto dei vari fenomeni non lineari coinvolti: saturazioni magnetiche complessive e locali, c.d.t. al contatto spazzole-collettore; legami delle f.e.m. trasformatoriche e mozionali con le caratteristiche costruttive della macchina (dati di avvolgimento, spostamento equivalente della posizione delle spazzole, accorciamento di passo, fattore di reazione $\sigma = N_a / (2 \cdot \pi \cdot N_f)$ - con $N_a = N^\circ$ spire di rotore e $N_f = N^\circ$ spire di campo -). Il modello vale sia per il funzionamento con grandezze sinusoidali equivalenti (approccio fasoriale), sia per il funzionamento ai valori istantanei (per una accurata ricostruzione delle forme d'onda, nel caso di alimentazione diretta da rete, o qualora siano utilizzati dispositivi elettronici di regolazione - come il TRIAC -).

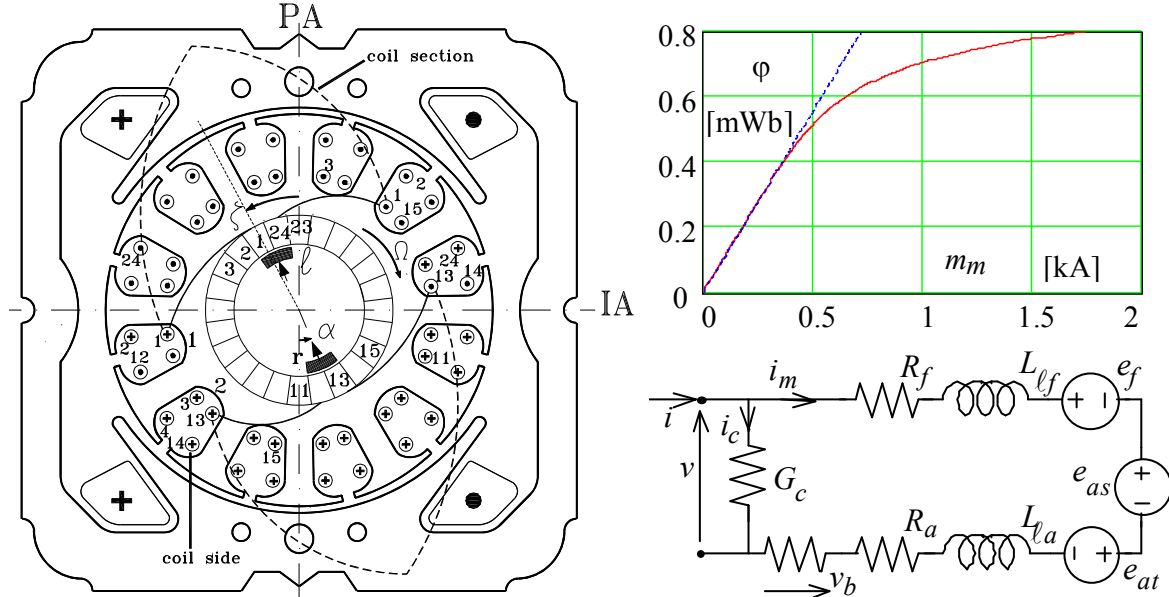


Fig.1 - Struttura, caratteristica di magnetizzazione e circuito equivalente di un MU commerciale, preso come riferimento (diametro rotore = 38.25 mm; lunghezza pacco lamierini = 32 mm; traferro = 1.475 mm; estensione angolare scarpa polare = 60°; dimensioni sezione spazzole [mm] = 6.3x10.95).

I risultati di questi studi (corredati da indagini sperimentali) sono contenuti nell'articolo:

A. Di Gerlando, R. Perini, G. Rapi: "Equivalent Circuit for the Performance Analysis of Universal Motors", pubblicato sulla Rivista IEEE Transactions on Energy Conversion [1].

Oltre allo studio del funzionamento globale (necessario per l'analisi energetica e la riprogettazione del motore), è stato approfondito anche il meccanismo della commutazione, per la stima del consumo delle spazzole: in effetti, un corretto bilancio di convenienza energetica di sistema richiede di considerare anche la durata delle spazzole, fortemente connessa alla vita del prodotto. I risultati di questo studio hanno prodotto un modello teorico-numerico della commutazione, rappresentato dalla rete equivalente di fig.2.

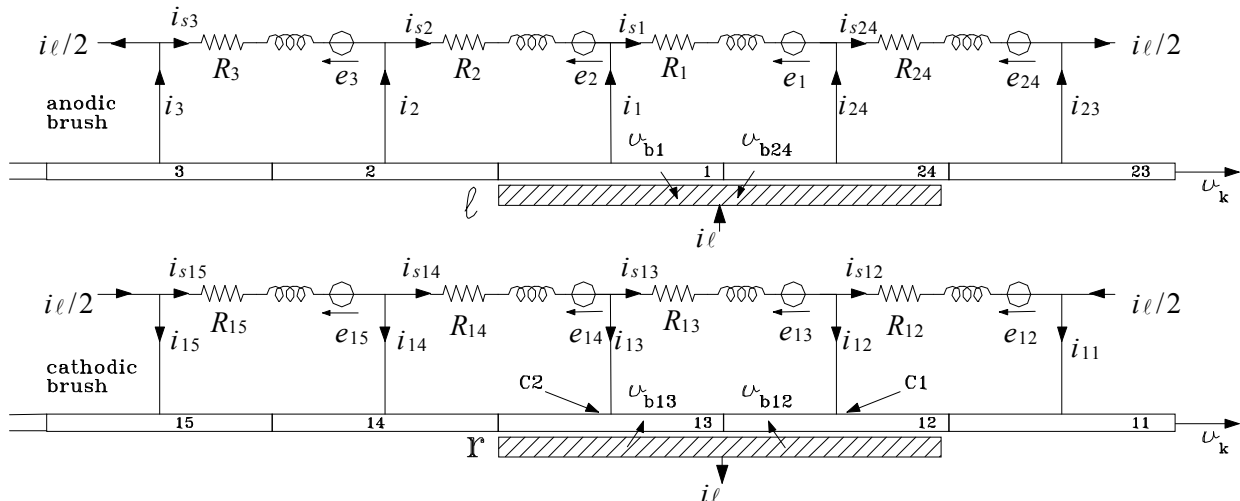


Fig.2 - Modello circuitale delle sezioni di avvolgimento simultaneamente commutanti, per lo studio della commutazione durante la rotazione corrispondente ad un passo di cava di rotore [2].

Tale rete equivalente include le non linearità degli accoppiamenti fra sezioni commutanti, le c.d.t. al contatto, i fenomeni di flash al collettore, il trasferimento di carica elettrica con l'arco, l'effetto di attrito al contatto. I risultati, validati con rilievi sperimentali su macchine appositamente strumentate, sono contenuti nella memoria:

A. Di Gerlando, R. Perini: "Model of the Commutation Phenomena in a Universal Motor", Congresso IEMDC03, Madison (Wisconsin, USA), 1-4 giugno 2003 [2].

Sono stati poi condotti ulteriori completamenti di tale modello, con il quale, oltre a determinare la forma d'onda della tensione al contatto lama – spazzola e della corrente nelle sezioni commutanti e nelle lame (figg. 3, 4, 5, 6), si può valutare l'influenza di diverse quantità sul consumo delle spazzole (attrito tra spazzola e lama, rugosità superficiale causata dai fenomeni di flash, carica trasportata dall'arco).

Il modello consente anche di verificare se, all'atto del distacco spazzola – lama, vi sia un arco o una scarica a bagliore o alla Townsend (fenomeni con diverso effetto sul consumo delle spazzole).

Infine, questi studi hanno permesso di dare una interpretazione riguardo alla seguente evidenza sperimentale: adottando opportuni numeri di spire delle sezioni disposte nella medesima coppia di cave (cioè passando da uguali numeri spire - 1° motore: $s_1=s_2=15$ - a diversi numeri spire - 2° motore: $s_1=20, s_2=10$ -) si ottiene un miglioramento della qualità di commutazione, e quindi una maggior durata di vita delle spazzole.

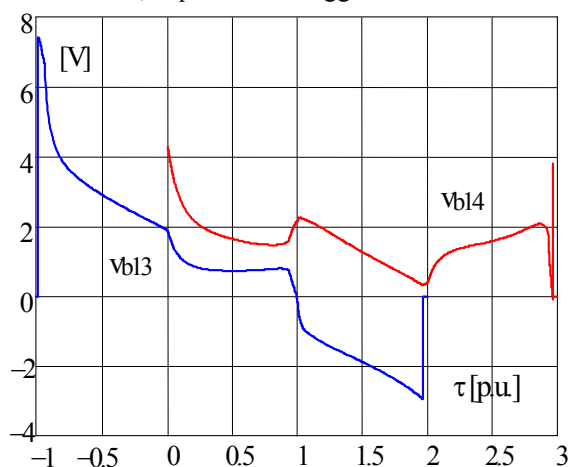


Fig. 3 – C.d.t al contatto per le lame 13 e 14 a contatto con la spazzola attualmente catodica (1° motore: $s_1=s_2=15$); $\tau = 1$ corrisponde a 83 μ s.

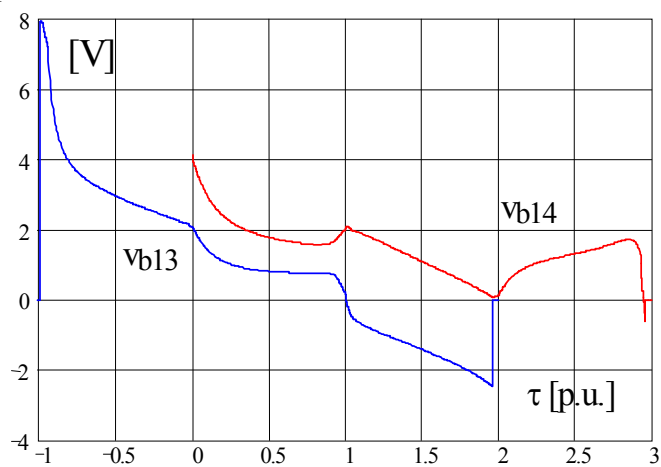


Fig. 5 – Andamento della c.d.t al contatto per le lame 13, 14 a contatto con la spazzola attualmente catodica (2° motore: $s_1=20, s_2=10$).

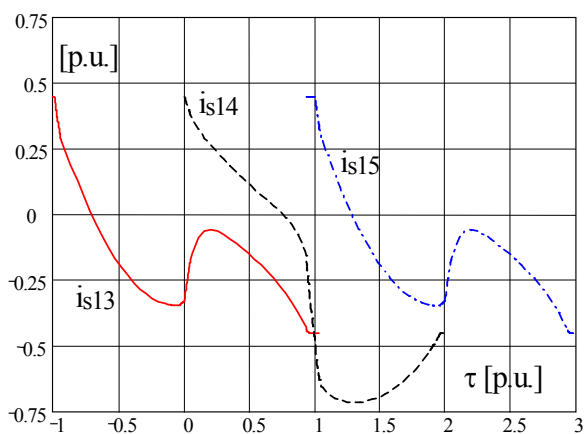


Fig. 4 – Andamento delle correnti di sezione is_{13} , is_{14} , is_{15} (1° motore: $s_1=s_2=15$).

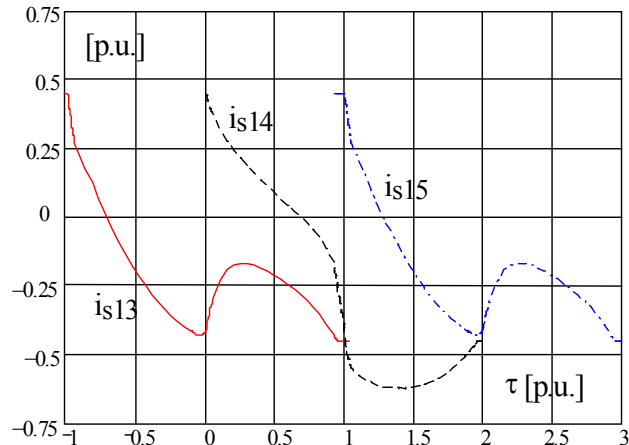


Fig. 6 – Andamento delle correnti di sezione is_{13} , is_{14} , is_{15} (2° motore: $s_1=20, s_2=10$).

I risultati di questi approfondimenti saranno presentati in una memoria di prossima pubblicazione:

A. Di Gerlando, R. Perini, L. Madonini: "Brush Wear Modelling in High Speed Universal Motors", Conferenza SPEEDAM 04, Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Capri, 16-18 giugno 2004.

E' stato studiato il funzionamento del MU con alimentazione da TRIAC, considerando l'influenza dell'angolo di controllo di fase sulle forme d'onda di corrente assorbita, sulla ampiezza della fondamentale e delle armoniche superiori, sull'andamento della coppia elettromagnetica media e della velocità di rotazione, sul fattore di sfasamento, di distorsione e di potenza complessivo (cfr. figg. 7, 8, 9).

I risultati dettagliati di questi studi sono contenuti nella memoria:

A. Di Gerlando, R. Perini: "A Model for the Operation Analysis of High Speed Universal Motors with Triac Regulated Mains Voltage Supply"; *Proceedings of the International Conf. SPEEDAM 2002: Symposium on Power Electronics, Elect. Drives, Automation, Motion: Ravello, Italy, June 11-14, 2002* [3].

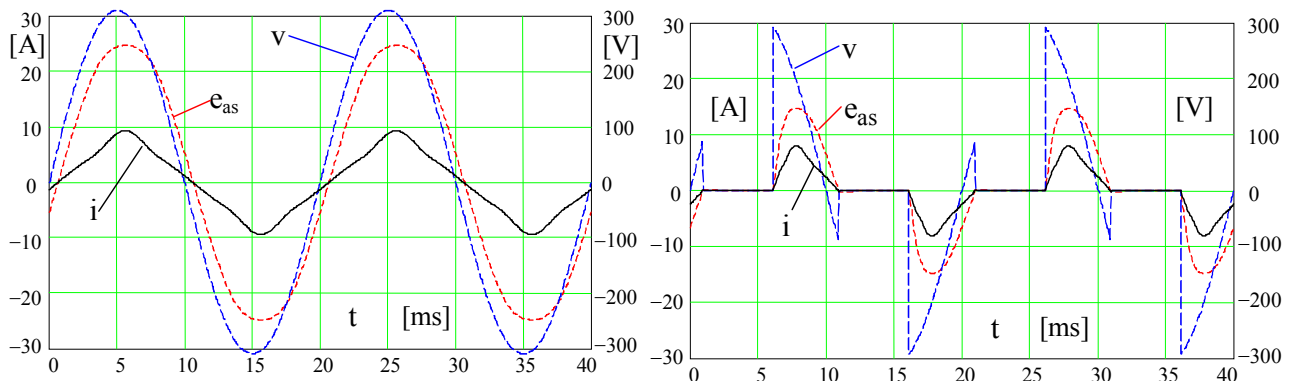


Fig.7 - Forme d'onda calcolate di tensione, corrente, f.e.m. mozionale del MU di fig.1, in assenza e in presenza di regolazione di tensione, con controllo di fase tramite TRIAC.

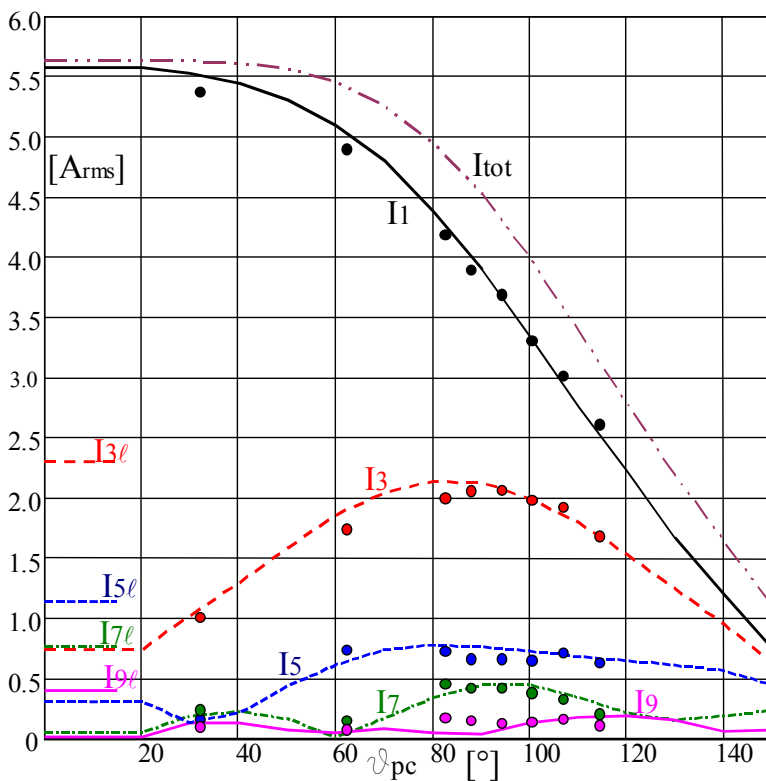


Fig.8 - Curve calcolate del valore efficace della fondamentale e delle armoniche dispari di corrente, insieme con la curva della corrente efficace complessiva assorbita, in funzione dell'angolo di controllo di fase; sulla scala a sinistra sono indicati i limiti armonici di Norma; i punti rappresentano i valori di misura.

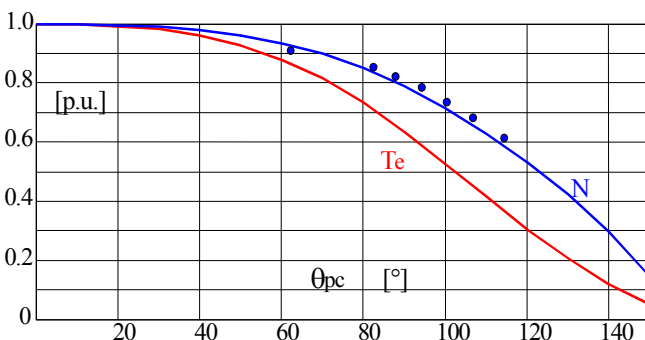


Fig.9.a - Regolazione della coppia elettromagnetica (T_e) e della velocità (N) in funzione dell'angolo di controllo di fase (valori di riferimento: $T_{erif} = 0.300$ Nm; $N_{rif} = 31300$ giri/min).

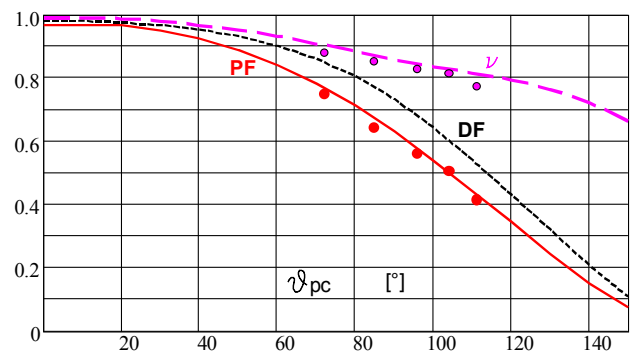


Fig.9.b - Andamento del fattore di sfasamento (v), del fattore di distorsione (DF) e del fattore di potenza (PF) del MU, in funzione del controllo di fase. I punti delle figure rappresentano i valori di misura.

La modellistica energetica, relativa al calcolo accurato delle singole voci di perdita, oltre a quantificare il principale contributo (perdite Joule di campo e di indotto) ha identificato sperimentalmente le perdite meccaniche e ha approfondito la valutazione delle perdite ferro (difficile, a causa della doppia magnetizzazione del materiale rotorico - magnetizzato “lentamente” a frequenza di rete e “rapidamente” alla frequenza interna- cfr. fig.10).

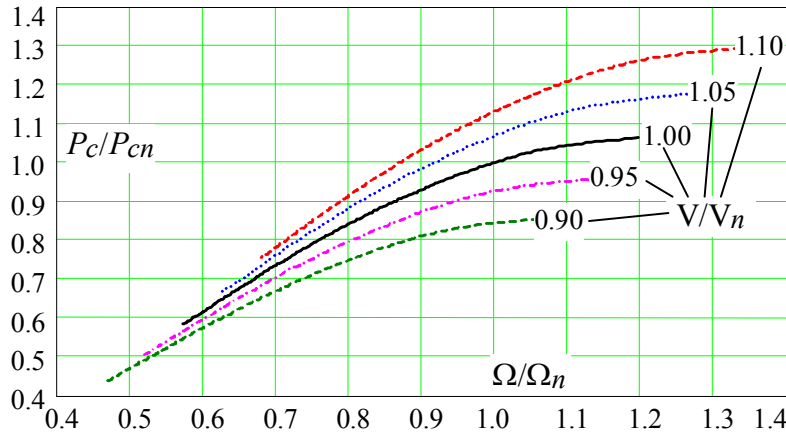


Fig.10 – Andamento in p.u. delle perdite ferromagnetiche (statore + rotore) del MU, in funzione della velocità di rotazione e della tensione di alimentazione (valori di riferimento: $N_n = 32000$ rpm; $V_n = 220$ V; perdite nel nucleo ferromagnetico a $N = N_n$; $V = V_n$; $P_{cn} = 40$ W).

I risultati dettagliati di questi studi sono contenuti nella memoria:

A. Di Gerlando, R. Perini: “Modelling and Experimental Analysis of Core Saturation and Losses of Universal Motors”; Intern. Conf. on Electrical Machines - ICEM 2002; Brugge, Belgium, 25-28 August 2002; Conf. Record on CD: Paper N° 090 [4].

B. Modellistica di progetto del MU, e riprogettazione per il miglioramento delle prestazioni energetiche

L’affinamento dell’analisi di funzionamento del motore ha consentito di svilupparne un adeguato modello orientato al progetto.

Uno studio analitico, affiancato da simulazioni numeriche selettive con programmi ad Elementi Finiti, ha consentito di determinare la posizione angolare ottimale delle spazzole α_o al variare del fattore di reazione σ , per garantire le migliori condizioni di commutazione (fig.11).

Inoltre, dalla elaborazione della caratteristica di magnetizzazione di fig.1, si sono ricavate le funzioni di saturazione di fig.12, legate al rapporto fra opportune riluttanze ferromagnetiche equivalenti saturabili e la riluttanza di traferro.

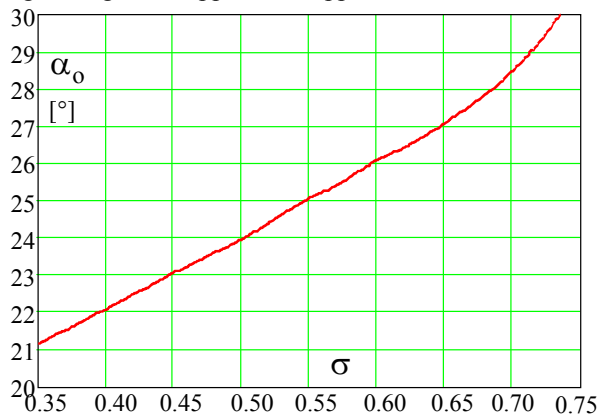


Fig.11 – Posizione angolare ottimale delle spazzole in funzione del rapporto di reazione, che garantisce le migliori condizioni di commutazione (asse spazzole in corrispondenza dell’asse neutro di funzionamento).

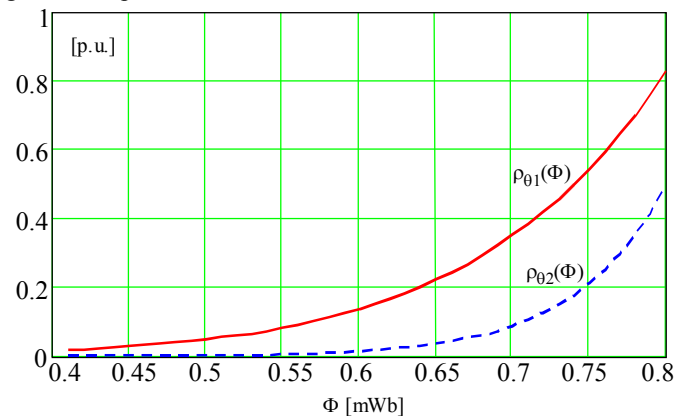


Fig.12 – Funzioni di saturazione, $\rho_{01}(\Phi)$ e $\rho_{02}(\Phi)$, legate al rapporto fra opportune riluttanze ferromagnetiche equivalenti saturabili e la riluttanza di traferro.

Si sono ricavate apposite equazioni di dimensionamento, in grado di evidenziare i seguenti legami:

- dipendenza della coppia elettromagnetica media T_{av} dal flusso di polo Φ , dal valore del traferro (cui è proporzionale la riluttanza θ_δ), dal fattore di reazione σ , dall’angolo α_o , dal fattore di concatenamento degli avvolgimenti C_{as} , dall’accorciamento di passo delle sezioni ε , dalla saturazione (cui sono legate le funzioni $\rho_{01}(\Phi)$ e $\rho_{02}(\Phi)$):

$$T_{av} = \frac{C_{as} \cdot \pi \cdot \sigma}{1 - \alpha_o(\sigma) \cdot \sigma} \cdot \theta_\delta \cdot (1 + \rho_{01}(\Phi)) \cdot \Phi^2 \quad ;$$

- espressione delle voci di perdita dai parametri costruttivi della macchina, in modo indipendente dai dati di avvolgimento; ad esempio, per le perdite Joule:

$$P_{PJ} = \frac{R_{f1} + R_{a1} \cdot (2 \cdot \pi \cdot \sigma)^2}{2 \cdot (1 - \alpha_o(\sigma) \cdot \sigma)^2} \cdot \theta_8^2 \cdot \Phi^2 \cdot \{1 + 2 \cdot [\rho_{\theta 1}(\Phi) + \rho_{\theta 2}(\Phi)]\} \quad ;$$

- relazioni in grado di definire in modo diretto i valori dei numeri di spire cui, sotto alimentazione a tensione nominale, corrisponde un fissato valore di coppia elettromagnetica, ad una velocità di rotazione desiderata (definizione in fase di progetto di un punto di passaggio della caratteristica meccanica, ad es. il nominale).

Gli studi hanno evidenziato diverse opzioni per il miglioramento delle prestazioni, come descritto nel seguito.

- Riprogettazione a basso costo

In tale filosofia si ammette l'invariabilità della geometria di lamierino (per preservare gli stampi esistenti, di elevato costo aziendale) ed anche la lunghezza del pacco lamiera (per i vincoli dimensionali, assai costosi da rimuovere, imposti dal montaggio del motore nell'apparecchio aspirapolvere). Una oculata analisi delle equazioni di dimensionamento ha evidenziato la possibilità di trarre vantaggio energetico da una adatta riduzione della saturazione magnetica, accompagnata da un corrispondente aumento del fattore di reazione, così da sostenere la coppia, riducendo però la f.m.m. richiesta e quindi le perdite: l'ipotesi è stata confermata dalla verifica sperimentale condotta su diversi motori appositamente realizzati, e ha condotto a stimare come interessante il risparmio energetico conseguibile a livello di popolazione globale motori. Come illustrato nelle figure seguenti, si possono adottare due criteri di incremento delle prestazioni rispetto a quelle del motore base (B):

R1= riduzione delle perdite del motore, a parità di potenza in uscita;

R2= incremento della potenza di uscita, a parità di perdite motore.

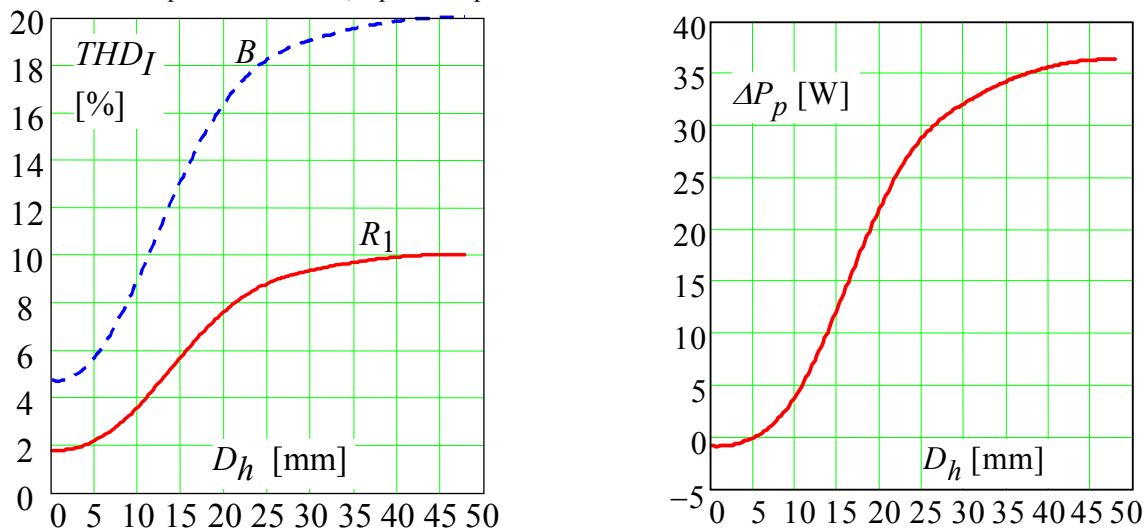


Fig.13 – Risultati della riprogettazione del motore base (B) secondo il criterio R1 (riduzione del flusso di polo rispetto al valore nominale Φ_n (-15%), a pari potenza di uscita di riferimento del sistema): in ascissa: diaframma D_h della camera di prova (che emula il diverso riempimento del sacchetto di raccolta polvere); a sinistra: riduzione del THD di corrente proprio del motore; a destra: riduzione delle perdite (diaframma di riferimento: $D_{h \text{ rif}} = 16$ mm)

Il risparmio in potenza assorbita appare limitato: va però osservato che esso è ottenuto senza alcuna modifica delle masse attive né della struttura motore e turbina; inoltre, il risparmio deve essere valutato in termini energetici, su una durata temporale significativa (ad esempio un anno). Considerando il progressivo riempimento del sacchetto raccolta polvere (cui è legata in proporzione la variazione di D_h), la riduzione media di perdita si può così valutare:

$$\Delta P_{pav} = \int_{D_{hm}}^{D_{hM}} \Delta P_p(D_h) \cdot dD_h / (D_{hM} - D_{hm}) \quad ;$$

ne conseguono i risparmi annuali indicati nella tabella seguente (in essa la popolazione di motori considerata è quella prodotta in un anno dal partner cofinanziatore e si considera un costo energia di $C_E = 0.13$ €/kWh).

Risparmio energetico di un singolo motore [kWh]	Risparmio economico di un singolo motore [€]	Risparmio energetico di una popolazione di $M_P = 6 \cdot 10^6$ motori [GWh]	Risparmio economico di una popolazione di $M_P = 6 \cdot 10^6$ motori [M€]
$\Delta P_{pav} \cdot \Delta t_L$	$C_E \cdot \Delta P_{pav} \cdot \Delta t_L$	$M_P \cdot \Delta P_{pav} \cdot \Delta t_L$	$M_P \cdot C_E \cdot \Delta P_{pav} \cdot \Delta t_L$
15.0	1.95	90.0	11.7

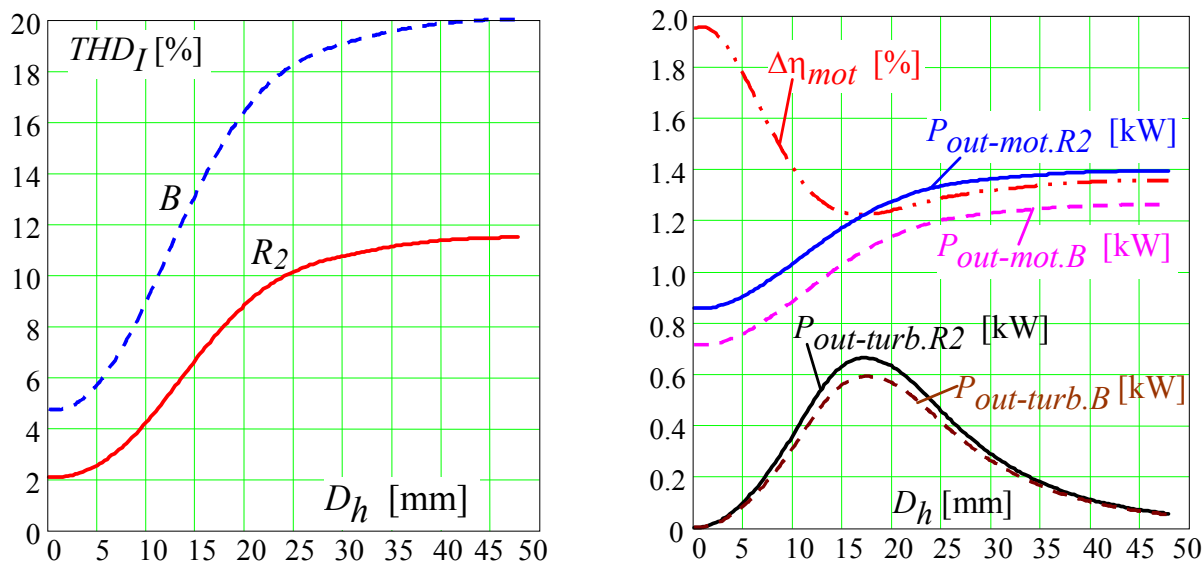


Fig.14 - Risultati della riprogettazione del motore base (B) secondo il criterio R2 (riduzione del 14% del flusso di polo nominale Φ_n , con spostamento della caratteristica meccanica verso velocità più elevate, mantenendo invariate le perdite motore, in corrispondenza al diaframma $D_h = 16$ mm): a sinistra: riduzione del THD di corrente proprio del motore; a destra: incremento della potenza di uscita del motore e della turbina e incremento del rendimento del motore.

I risultati dettagliati sono riportati nella memoria:

A. Di Gerlando, R. Perini: "Low-Cost Redesign Criteria for the Efficiency Improvement of Universal Motors used in Domestic Appliances", presentata al Congresso EEDAL '03, Torino, 1-4 ottobre 2003 [5].

- Riprogettazione con modifiche della struttura magnetica del motore.

Secondo tale strategia, di maggior costo aziendale, ma ugualmente meritevole di approfondimento, si mantengono le dimensioni esterne del lamierino e la lunghezza attiva del pacco (sempre per i citati vincoli), ma viene modificata la geometria interna nel circuito magnetico: si realizza una configurazione di tipo asimmetrico, sia sui corni polari, che sulle corone di statore, così da compensare la caratteristica, peculiare in questi motori, di presentare saturazioni asimmetriche; infatti il loro bilanciamento asimmetrico consente di migliorare le prestazioni, senza incremento delle dimensioni complessive esterne (N.B.: tale ridisegno asimmetrico è possibile solo perché il motore considerato è destinato ad un unico, prefissato, senso di rotazione). La ridistribuzione della induzione nel nucleo è finalizzata all'ottenimento dei seguenti effetti globali e locali:

- incremento dei valori del flusso di polo, a pari valore della f.m.m. di magnetizzazione: tale incremento consente di incrementare i livelli di coppia, a pari perdite del motore;
- riduzione delle saturazioni locali, in particolare nei corni saturi, con miglioramento delle condizioni di commutazione.

Questi studi hanno condotto alla realizzazione di un prototipo.

La fig.15 mostra il confronto delle mappe di B, per il motore base (a sinistra) e per il motore asimmetrico (a destra).

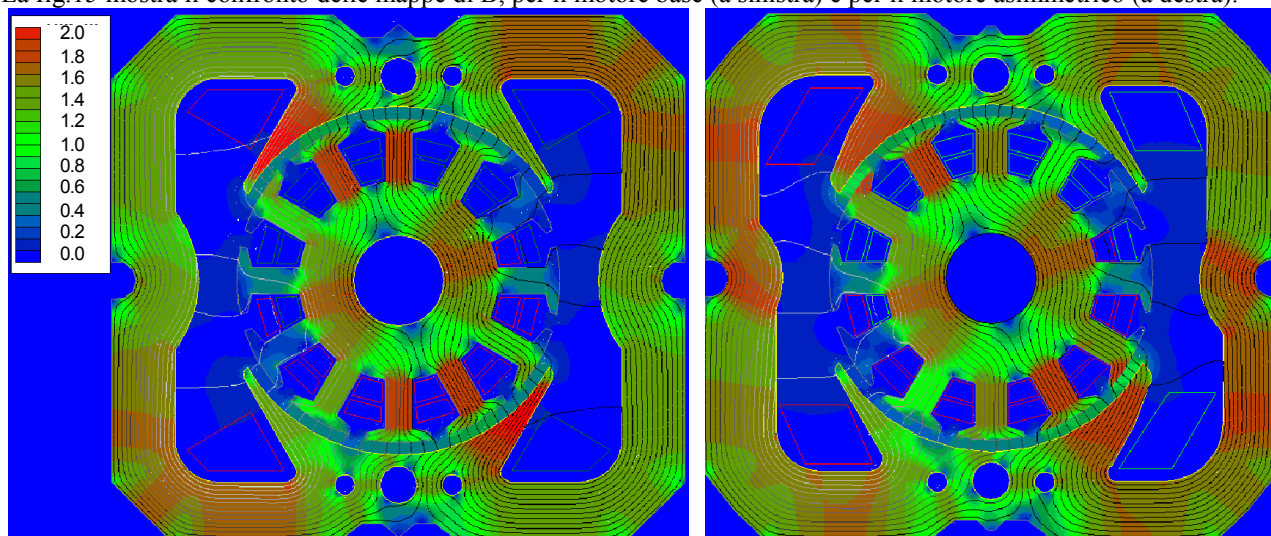


Fig.15 – Mappe di induzione relative al motore base e al motore con lamierino asimmetrico (scala a sinistra in [T]).

I dati sperimentali confermano l'incrementabilità dell'efficienza energetica del motore, anche se in misura limitata. I relativi risultati saranno prossimamente oggetto di pubblicazione.

C. Modellistica del sistema motore-turbina; turbine ad efficienza aeraulica migliorata; realizzazione di prototipi

Attraverso una serie di prove sul sistema complessivo motore-turbina, montato su una apposita camera con foro calibrato di aspirazione (che emula diverse condizioni aerauliche del carico visto dall'aspirapolvere e corrispondente ad un progressivo riempimento del sacchetto di raccolta polvere), sono state determinate le caratteristiche aerauliche della turbina attualmente utilizzata, in particolare, le curve di portata-prevalenza, coppia-portata, rendimento-portata, con parametro la velocità di rotazione.

Questa caratterizzazione ha consentito di esaminare le curve di rendimento del motore e della turbina (valore ed estensione dei massimi delle curve di rendimento, posizione relativa tra i massimi): si è potuto verificare che i livelli di rendimento motore, già nelle versioni commerciali attuali, sono dignitosi (compresi fra il 76 e il 78%), mentre l'elemento cui corrisponde il maggiore degrado energetico è proprio la turbina, con limitata zona a rendimento massimo, di valori non superiori al 55%.

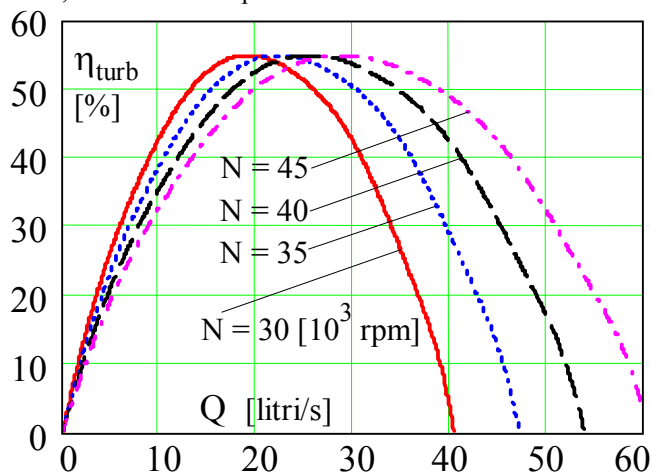


Fig.16 - Curve di efficienza aeraulica della turbina dell'aspirapolvere, in funzione della portata d'aria, con parametro la velocità di rotazione.

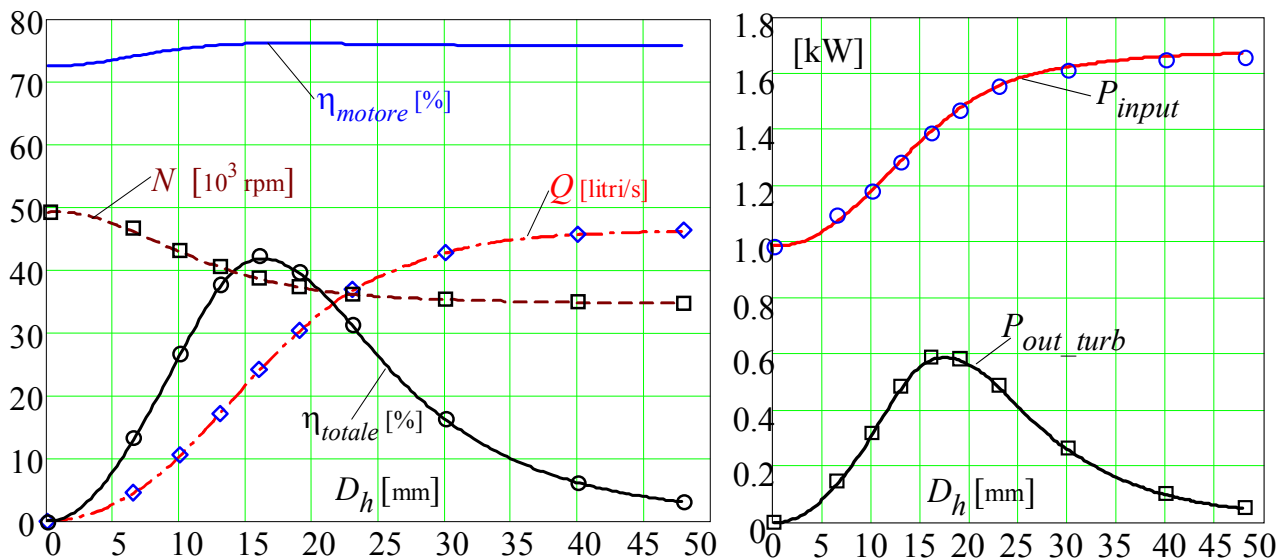


Fig.17 - Risultati simulati (curve) e validazione sperimentale (punti) relativi al sistema commerciale motore-turbina, connesso ad una camera di prova emulante l'aspirapolvere (il diametro D_h del foro della camera corrisponde al riempimento del sacchetto di raccolta polvere).

Questa constatazione ha suggerito di approfondire le possibilità di miglioramento della turbina: ciò non significa rinunciare al miglioramento delle prestazioni motore, ma agire sul componente che prevalentemente limita le prestazioni energetiche del sistema. Naturalmente, non essendo specialisti della parte aeraulica, si è ritenuto opportuno coinvolgere competenze di quel settore.

Le attività hanno condotto alla progettazione di un primo prototipo di turbina: sono state studiate alcune modifiche strutturali alla turbina attualmente impiegata (inserimento di palette intermedie direttrici del flusso d'aria, riduzione del diametro esterno della turbina, aumento della bocca di aspirazione).

Sul sistema motore-turbina basato su questo primo progetto sono state svolte alcune prove preliminari, utilizzando il primo prototipo di turbina: tali prove hanno però dato risultati non del tutto soddisfacenti, soprattutto per problemi meccanici alle alte velocità: sono dunque in corso attività di miglioramento del progetto della turbina, con l'obiettivo di irrobustirne la tenuta meccanica e di incrementarne l'efficienza nella zona energeticamente più significativa.

In effetti, lo studio di sistema ha mostrato che l'aumento del rendimento di turbina implica numerosi vantaggi:

- miglioramento del rendimento complessivo del sistema;
- riduzione della potenza convertita dal motore (a pari potenza aeraleica resa), con miglioramento dello stesso rendimento di motore e sue migliori condizioni di raffreddamento;
- contenimento della corrente assorbita lato rete: questo aspetto è particolarmente importante qualora si tenga conto anche dei livelli di distorsione armonica e del fatto che, nel caso di regolazione con TRIAC, gli attuali assorbimenti di armoniche sono troppo spesso ai limiti o al di sopra della soglia di accettabilità;

A questo proposito, va osservato che, in termini di grandezze di interesse commerciale (ai fini della targhetatura del dispositivo) è, a tutt'oggi, ancora in vigore la definizione della potenza nominale come potenza assorbita: vi è dunque una certa difficoltà a far accettare una riduzione di tale valore (che invece si tende ad incrementare), mentre è naturalmente possibile, a pari potenza assorbita, perseguire un incremento della potenza resa.

D. Realizzazione di un banco prova per motori ad alta velocità.

Le prove finora eseguite sui sistemi motore-turbina, condotte c/o il partner industriale, hanno consentito di caratterizzare globalmente le prestazioni attraverso la misura della potenza elettrica assorbita e della potenza aeraleica resa. Solo attraverso la valutazione indiretta delle perdite del motore, si è potuto separare, a livello di calcolo, la curva di rendimento motore da quella di rendimento turbina.

D'altra parte, è apparsa assai auspicabile anche una caratterizzazione energetica diretta del motore, per verificare in dettaglio i miglioramenti conseguibili con diverse strategie di riprogettazione della macchina elettrica: peraltro, queste prove a carico sono rese assai delicate dalle seguenti esigenze:

- realizzazione di accurati accoppiamenti motore-freno a velocità di rotazione anche oltre 60000 giri/min;
- raffreddamento efficace del motore in assenza della turbina, che usualmente ha anche funzioni di ventilazione interna.

A tale proposito, non esistono soluzioni standard commerciali di banco prove motori, soprattutto con le seguenti specificità:

- semplicità di accoppiamento (senza apparecchiature sofisticate, procedure laboriose e personale specializzato);
- modularità di impiego (per la prova di motori ad alta velocità anche di forma e caratteristiche diverse).

Il soddisfacimento di questi due requisiti, considerando anche i limiti di spesa, ha richiesto diversi approfondimenti, in collaborazione con specialisti meccanici: si è infine optato per una soluzione in cui il motore ad alta velocità da provare è accoppiato con il freno (fig.18) attraverso un sistema doppio di riduttori ad ingranaggi (fig.19).

Questa soluzione (con il freno disposto su un sistema basculante, e vincolato alla parte fissa del banco con una cella di carico) si è rivelata un buon compromesso tra esigenze contrastanti.

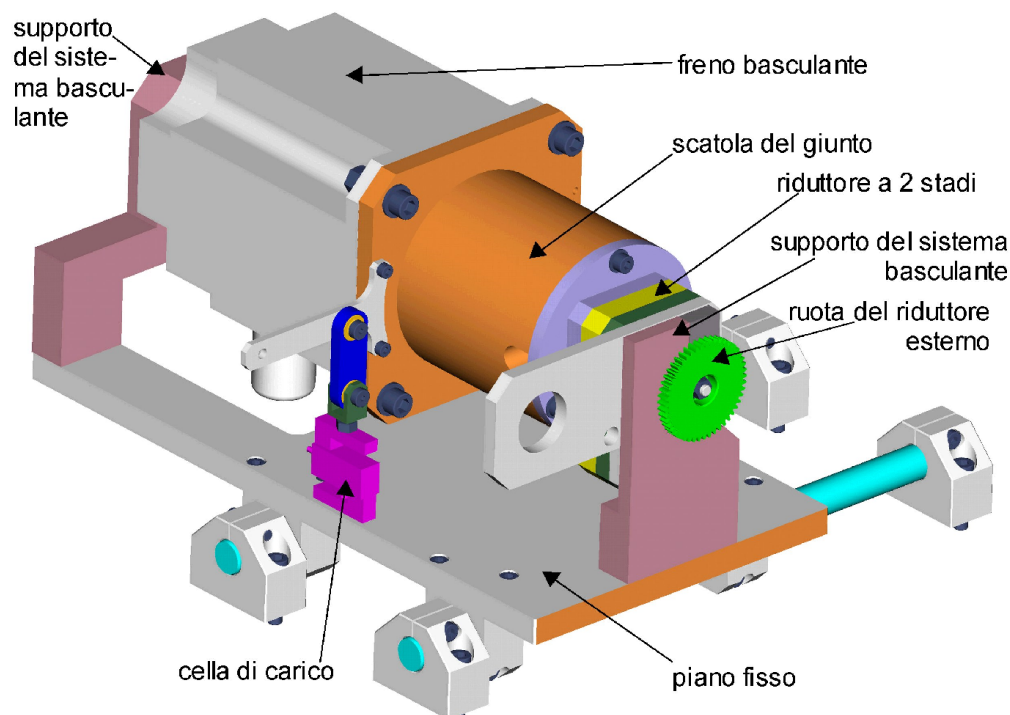


Fig.18 – Vista assonometrica del banco freno per prova motori ad alta velocità progettato e realizzato (per $N_{max} = 70000$ rpm): il riduttore esterno (rapporto 1/2) ha rendimento elevato; il riduttore interno, a 2 stadi (rapporto 1/12.25) non influisce sull'errore di coppia misurata, perché la coppia dovuta ai suoi attriti è trasmessa dal sistema basculante alla cella di carico.

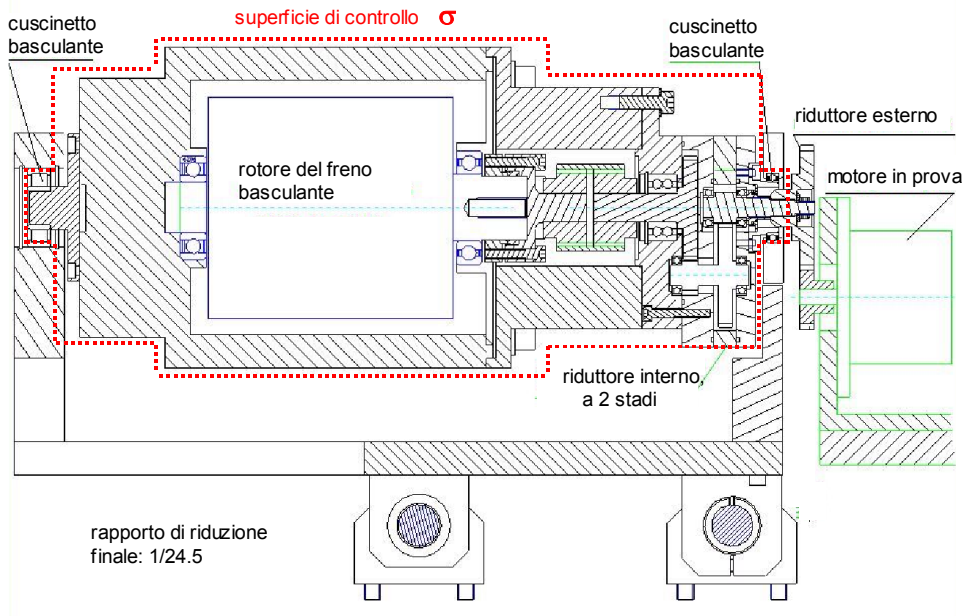


Fig.19 – Vista in sezione laterale del banco freno di fig.18: il riduttore esterno alla superficie σ (con rapporto 1/2) ha rendimento elevato ($\eta > 0.98$); inoltre, la sua incidenza sull'errore di misura della coppia è prevedibile; il riduttore interno alla superficie σ (con rapporto 1/12.25), non influisce sull'errore di coppia misurata, perché la coppia dovuta ai suoi attriti è trasmessa dal sistema basculante alla cella di carico.

In effetti:

- il riduttore esterno (rapporto 1/2) ha rendimento elevato ($\eta > 0.98$); inoltre, la sua incidenza sull'errore di misura della coppia è prevedibile;
- per quanto riguarda il riduttore interno, a 2 stadi (rapporto 1/12.25), esso non influisce sull'errore di coppia misurata, perché la coppia dovuta ai suoi attriti è trasmessa dal sistema basculante alla cella di carico: infatti, tutta la potenza, convertita o persa, che si sviluppa all'interno della superficie di controllo σ di fig.19, contenente la parte basculante, dà contributo alla coppia misurata;
- il sistema di serraggio del motore (non mostrato nelle figure citate) è adatto a fissare motori diversi;
- infine, il posizionamento del motore (allineamento e centratura rispetto al freno) è ottenuto mediante comparatori centesimali, di facile uso;
- per quanto riguarda le condizioni di raffreddamento del motore, si è adottato un sistema di ventilazione autonomo, con regolazione della portata d'aria.

Questo banco è stato recentemente realizzato, completato con trasduttori elettrici e meccanici, e interfacciato con un sistema di acquisizione residente su un PC dedicato: con esso si controllano le condizioni di test, si rilevano ed elaborano i segnali di prova. La messa a punto e il collaudo del sistema è in fase avanzata.

La presentazione dei risultati teorici, numerici e sperimentali raggiunti nelle ultime fasi della ricerca sarà prossimamente oggetto di memorie presentate a Convegno e su Riviste.

Difficoltà incontrate durante lo svolgimento della ricerca

L'elevato valore della velocità di rotazione del motore ha implicato problemi di natura meccanica.

In primo luogo è stato difficile realizzare un banco freno di costo contenuto, prestazioni soddisfacenti, adeguata adattabilità e facile utilizzo.

In secondo luogo, la costruzione di una nuova turbina di aspirazione in lamiera ha evidenziato problemi di tenuta meccanica. In effetti, nel primo prototipo realizzato si è adottato lo stesso sistema di graffettatura delle palette impiegato nelle ventole già in commercio: tale assemblaggio meccanico si però è rilevato insufficiente, con distruzione della ventola per effetto centrifugo. Nelle successive realizzazioni tale inconveniente è stato corretto: attualmente il nuovo prototipo di turbina è nella fase delle prove preliminari.

Un ulteriore aspetto riguarda i vincoli dimensionali imposti nell'ambito degli studi di riprogettazione. Il motore e la turbina devono essere collocati all'interno di un aspirapolvere, con predefinite dimensioni a loro disposizione; inoltre, il costo dello stampo dell'involucro motore è troppo alto per ipotizzarne una modifica. Tali vincoli non hanno consentito di perseguire alcune linee di riprogettazione, ad esempio l'allungamento assiale del pacco lamiere del motore.

Un altro obiettivo, particolarmente sentito dall'azienda partner che ha partecipato al cofinanziamento, consisteva nel ridurre il contenuto armonico della corrente assorbita. Infatti, la regolazione del motore avviene attualmente tramite un TRIAC, dispositivo a basso costo, ma fortemente distorcente la corrente assorbita. Dopo diversi studi, si è concluso che, con l'impiego del TRIAC, l'obiettivo di avere un'alta potenza in ingresso (cosa richiesta dal mercato) e un alto rendimento è in contrasto con la specifica di un basso contenuto armonico della corrente. Anche cercando di de-saturare il nucleo magnetico del motore, non si riesce a ridurre sensibilmente la distorsione della corrente; l'unica soluzione consisterebbe nel sostituire l'attuale dispositivo elettronico di alimentazione con uno più sofisticato (tipicamente un "Power Factor Corrector", che però nell'ambito applicativo considerato è attualmente fuori mercato).

Prodotti della Ricerca eseguita

I prodotti della ricerca riguardano metodologie, prototipi e banchi prova per la caratterizzazione, la progettazione e la verifica sperimentale di motori ad alta velocità ad efficienza migliorata: si è fatto particolare riferimento a motori universali, accoppiati con turbine, impiegati in sistemi aspirapolvere per uso nel settore domestico.

Dal punto di vista delle metodologie, i prodotti si possono così classificare:

- sviluppo di un modello circuitale equivalente complessivo del motore universale;
- studio teorico e sperimentale della commutazione in c.a., ai fini della stima della durata di vita delle spazzole;
- con riferimento al sistema aspirapolvere, sviluppo di un modello della turbina accoppiata;
- sviluppo di programmi di riprogettazione del motore universale, per un aumento delle prestazioni energetiche del motore e del sistema aspirapolvere.

Per quanto riguarda lo sviluppo di prototipi, nel corso della ricerca sono stati realizzati numerosi prototipi di motore ed alcuni prototipi di turbina, in collaborazione con il partner aziendale, per effettuare prove di caratterizzazione e di verifica del miglioramento delle prestazioni, a seguito di variazioni di progetto rispetto al sistema attualmente prodotto.

Relativamente ai motori, sono stati costruiti più di 20 esemplari, secondo le seguenti varianti:

- motori con lamierino e lunghezza pacco invariati, con modifica dei dati di avvolgimento (N° spire di campo e di armatura, a sezione di rame totale invariata), per incrementare l'efficienza e/o la potenza del motore;
- motori con lamierino e lunghezza pacco invariati, con spostamento dell'angolo equivalente di contatto spazzole-collettore, al fine di verificare le condizioni di commutazione, al variare del fattore di reazione (legato al rapporto fra il N° spire di indotto e di campo);
- motori con lamierino invariato come dimensioni statoriche esterne e lunghezza pacco, ma struttura magnetica asimmetrica, al fine di ridistribuire più uniformemente l'induzione nel nucleo, riducendo il livello di saturazione, migliorando le prestazioni.

Per quanto concerne la turbina, constatata la importanza di un aumento della sua efficienza aeraulica, è stata avviata una collaborazione con specialisti di macchine fluidodinamiche, allo scopo di migliorare in modo significativo l'efficienza globale del sistema ed anche le condizioni di funzionamento del motore: sulla base di un primo progetto di una nuova turbina, sono state realizzate alcune turbine di prova, che hanno evidenziato elementi di interesse, ma hanno richiesto una serie di correzioni, soprattutto dal punto di vista della solidità meccanica.

Infine, tra i prodotti della ricerca si può annoverare un banco prova motori ad alta velocità, in grado di operare una caratterizzazione energetica diretta del motore, per verificare in dettaglio i miglioramenti conseguibili con le diverse strategie di riprogettazione adottate per il motore. Nella soluzione realizzata, si è optato per un accoppiamento motore – freno attraverso un riduttore ad ingranaggi. Il freno presenta le seguenti caratteristiche: coppie fino a 0.6 Nm, con velocità oltre i 60000 giri/min (lato motore); freno disposto su un sistema basculante, e vincolato alla parte fissa del banco con una cella di carico; elevato (e prevedibile) rendimento del riduttore; sistema di serraggio del motore adatto a fissare motori diversi; posizionamento del motore (allineamento e centratura rispetto al freno) ottenuto mediante comparatori centesimali, di facile uso; raffreddamento del motore mediante sistema di ventilazione autonomo, con regolazione della portata d'aria; controllo di prova, acquisizione ed elaborazione dei segnali mediante in PC dedicato.

Bibliografia

- [1] A. Di Gerlando, R. Perini, G. Rapi: “*Equivalent Circuit for the Performance Analysis of Universal Motors*”, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.19, N.1, March 2004.
- [2] A. Di Gerlando, R. Perini: “*Model of the Commutation Phenomena in a Universal Motor*”, IEMDC03, International Electric Machines and Drives Conference, Madison (Wisconsin, USA), 1-4 giugno 2003.
- [3] A. Di Gerlando, R. Perini: “*A Model for the Operation Analysis of High Speed Universal Motors with Triac Regulated Mains Voltage Supply*”, SPEEDAM 2002, Proceedings of the International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation, Motion: Ravello, Italy, June 11-14, 2002.
- [4] A. Di Gerlando, R. Perini: “*Modelling and Experimental Analysis of Core Saturation and Losses of Universal Motors*”, ICEM 2002, Proceeding of the International Conference on Electrical Machines; Brugge, Belgium, 25-28 August 2002; Conf. Record on CD: Paper N° 090.
- [5] A. Di Gerlando, R. Perini: “*Low-Cost Redesign Criteria for the Efficiency Improvement of Universal Motors used in Domestic Appliances*”, EEDAL'03, 3rd International Conference on Energy Efficiency in Domestic Appliances and Lighting, Torino, Italy, 1-4 october 2003.