

7.27 Motori brushless

Gli azionamenti per servomotori sono progettati in funzione di un insieme di esigenze che li differenziano considerevolmente dai motori elettrici tradizionali.

Il servomotore, infatti, è un dispositivo concepito per funzionare in un ampio campo di condizioni operative e per modificare le stesse (per esempio, velocità e coppia) alla massima rapidità possibile.

Il motore ritenuto più adeguato a questo tipo di servizio è stato per molto tempo quello a corrente continua, inizialmente a eccitazione separata e, più di recente, a magneti permanenti.

Le limitazioni intrinseche di questa macchina, legate alla presenza di un commutatore meccanico (collettore e spazzole), hanno portato alla sua progressiva sostituzione con motori a commutazione elettronica ad elevate prestazioni.

I motori a corrente continua brushless, o a commutazione elettronica, sono oggetto di studio e sperimentazione da diversi anni, ma solo recentemente il progresso di questa particolare tecnologia, nonché della necessaria componentistica elettronica di potenza, ha reso possibile la loro evoluzione in azionamenti dalle prestazioni molto elevate.

Le particolari caratteristiche costruttive e le possibilità offerte da questi motori consentono oggi una vasta gamma di applicazioni, con una progressiva sostituzione dei motori a corrente continua tradizionali.

La disponibilità di una nuova generazione di trasduttori di posizione ha consentito, inoltre, lo sviluppo di robot, controlli numerici, linee di produzione flessibili, automazione industriale, dispositivi automatici in genere, attuatori dotati di affidabilità, capacità e prestazioni dinamiche molto superiori alle precedenti.

Poiché il motore brushless è tecnologicamente assimilabile a una macchina a corrente continua, il suo principio di funzionamento può essere descritto per analogia a quello di un motore a corrente continua con commutatore elettromeccanico.

In questo motore, mostrato nella fig. 7.120a, il campo magnetico fisso, imposto nello spazio dai magneti permanenti, interagisce con quello generato dalle correnti che circolano nell'avvolgimento di indotto, per dare luogo a una coppia per la rotazione del motore.

Tale rotazione tende a ridurre l'angolo esistente tra il campo magnetico e il sistema di correnti rotoriche, così che, in assenza di altri fenomeni, la coppia diverrebbe nulla dopo aver compiuto un arco di 90 gradi elettrici.

Per questo motivo, il motore a corrente continua è dotato di un collettore solidale con il rotore, che modifica il flusso delle correnti nell'indotto, invertendo il senso della corrente nei vari avvolgimenti a mano a mano che questi ruotano. Il campo risultante da tutte le correnti rotoriche è mantenuto sempre perpendicolare al campo magnetico imposto dai magneti permanenti, indipendentemente dalla velocità.

Di conseguenza, la corrente, all'interno di ogni avvolgimento, è alternata, mentre la frequenza è proporzionale al numero dei poli della macchina e alla sua velocità.

Da un altro punto di vista, se si assume come sistema di riferimento fisso il rotore, si può osservare come un motore a corrente continua non sia altro che un motore sincrono a magneti permanenti, azionato a corrente alternata e frequenza variabile, in modo tale che l'angolo di fase tra campo rotorico e statorico sia costante.

In altri termini, il collettore elettromeccanico ha la funzione di invertitore meccanico con frequenza e fase vincolate alla rotazione del motore.

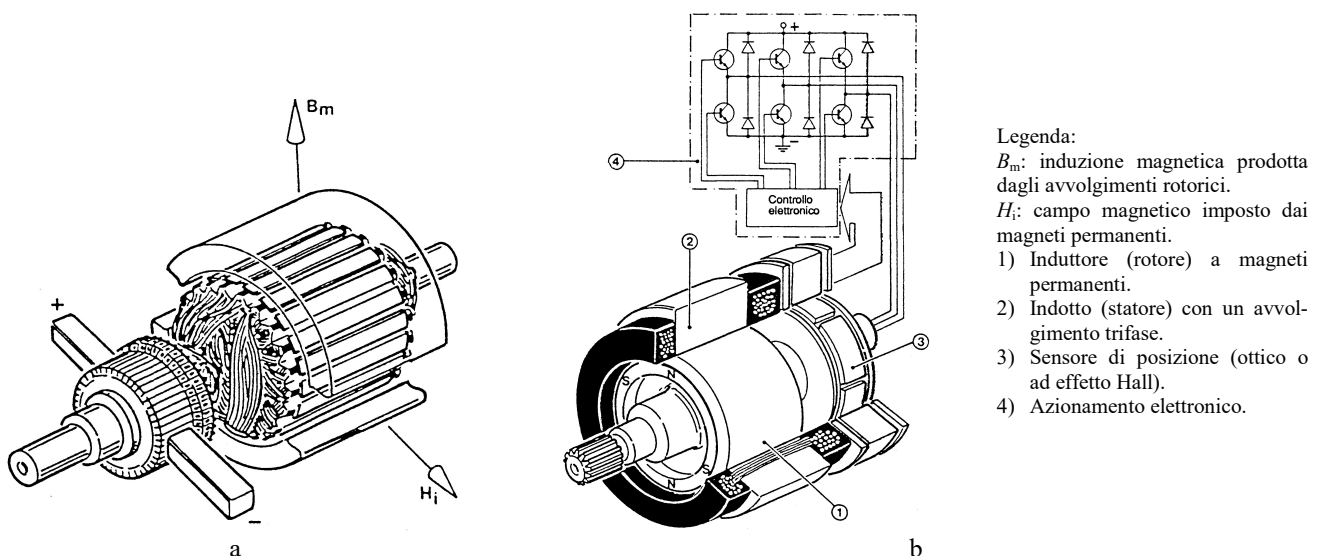


Fig. 7.120 - a) Motore a corrente continua tradizionale - b) Motore a corrente continua brushless.

La realizzazione pratica di questa funzione costituisce la limitazione principale del motore a corrente continua: il collettore deve essere posto in rotazione, rendendo così necessario far ruotare l'intera parte avvolta del motore, con conseguente usura, riduzione della vita della macchina e prestazioni elettriche e termiche limitate.

Tutti questi inconvenienti possono essere superati sostituendo il commutatore elettromeccanico con un opportuno invertitore elettronico.

Nella sua forma più semplice, il motore a corrente continua a commutazione elettronica è costituito da un induttore a magneti permanenti, da un indotto recante un avvolgimento trifase e da un commutatore elettronico, come mostrato nella fig. 7.120b.

Il commutatore elettronico, a sua volta, è formato da un sensore di posizione solidale con l'asse del motore e da una matrice di interruttori elettronici, in grado di alimentare ogni avvolgimento di statore.

Il funzionamento è assai simile a quello di un motore a corrente continua. Il controllo elettronico, tramite il sensore di posizione, identifica il sistema di avvolgimenti perpendicolare al campo magnetico del rotore e lo alimenta con la corrente richiesta.

A seguito della rotazione, il modulo elettronico commuta la corrente nelle varie fasi, così che il campo risultante dalle correnti di indotto sia sempre mantenuto perpendicolare a quello dei magneti.

Poiché il commutatore elettronico, al contrario del suo analogo elettromeccanico, non è fisicamente solidale con la parte rotante, non è più necessario avvolgere il rotore che incorpora i magneti permanenti, mentre gli avvolgimenti di armatura sono trasferiti sullo statore.

Prestazioni simili a quelle di un servomotore a corrente continua possono essere ottenute anche con un sistema comprendente un motore asincrono trifase e un convertitore di frequenza, opportunamente controllato.

Questa soluzione è stata studiata per trarre il massimo vantaggio dalla vasta esperienza raggiunta nel campo dei motori asincroni trifase.

Gli azionamenti di questo tipo sono talvolta denominati "AC brushless", o "brushless", anche se è opportuno definire azionamenti "brushless" esclusivamente gli azionamenti costituiti da un motore sincrono e un commutatore elettronico, la cui fase sia rigidamente vincolata alla posizione del rotore.

Dal punto di vista costruttivo, il motore brushless si compone di:

- 1) uno statore recante un avvolgimento multipolare, solitamente trifase;
- 2) un rotore a magneti permanenti dalle 2 alle 8 paia di poli;
- 3) un sensore di posizione dell'albero motore assoluto nell'arco polare.

Grazie all'assenza di problemi di commutazione, il motore brushless può essere realizzato quasi in ogni tipo di forma fisica. Benché la maggioranza delle realizzazioni sia di modello tradizionale (v. fig. 7.121a), con statore e rotore cilindrici e statore esterno, è spesso adottata anche la costruzione inversa, che consente un agevole ancoraggio dei magneti e una notevole uniformità di rotazione, con qualche limitazione alle caratteristiche termiche del motore.

Sono stati proposti **motori a disco** (v. fig. 7.121b), che utilizzano un semplice anello di ferrite come rotore, e **motori a tazza** (v. fig. 7.212c), con rotore interposto tra due avvolgimenti statorici, per particolari applicazioni richiedenti la massima coppia nell'unità di volume.

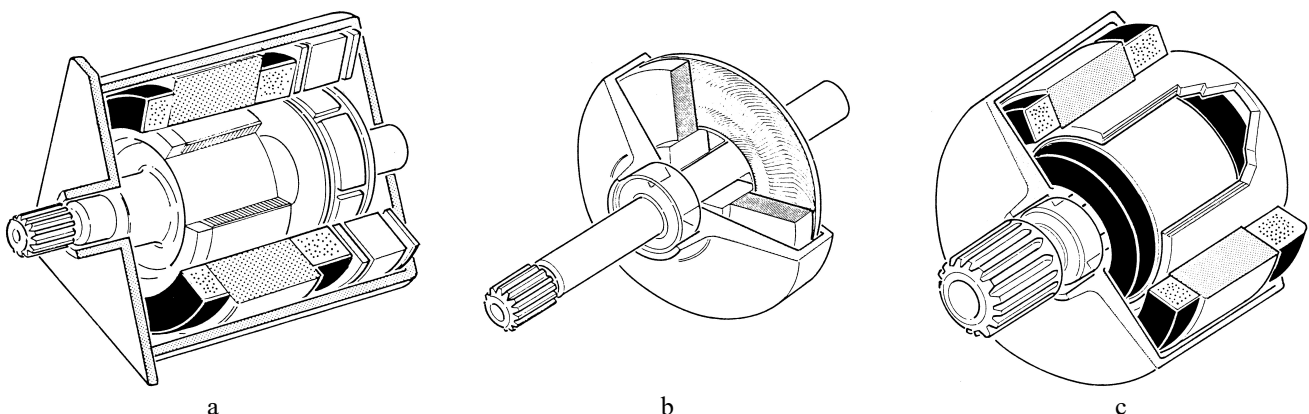


Fig. 7.121 - Varie forme dei motori brushless: a) Convenzionale - b) A disco - c) A tazza con rotore tubolare interposto tra i due statori.

La tensione di alimentazione del motore, non più vincolata a problemi di commutazione, può essere adeguata alla tensione di rete, evitando così l'impiego di trasformatori di alimentazione nell'azionamento e riducendo la sezione dei cavi di collegamento al motore.

Inoltre, cambiando semplicemente i parametri di avvolgimento, è possibile ottimizzare l'accoppiamento tra moduli elettronici e motori in funzione delle velocità e delle potenze richieste.

Poiché lo statore è l'unico organo del motore percorso da corrente elettrica e sede di perdite, il raffreddamento a fluido, associato allo statore, è particolarmente efficace.

Sigillando gli avvolgimenti, è possibile costruire motori atti al funzionamento sommerso.

La fabbricazione dello statore è simile a quella di un motore asincrono trifase tradizionale e, di conseguenza, è agevolmente automatizzabile.

Solitamente l'avvolgimento reca sensori di temperatura, che consentono un'efficace protezione termica, molto difficilmente ottenibile nei servomotori a corrente continua tradizionali.

La realizzazione del rotore, che deve produrre tutto il flusso utile della macchina, rappresenta un notevole problema elettromeccanico. In particolare, la scelta, in fase di progettazione del motore, del tipo di magneti e del suo metodo di montaggio incide in modo predominante sulle dimensioni, sulle prestazioni e sul costo della macchina elettrica, così da costituirne l'elemento qualificante.

I magneti maggiormente utilizzati appartengono a due categorie: magneti a terre rare oppure magneti ceramici.

I magneti a terre rare hanno caratteristiche meccaniche notevoli, ma hanno un costo molto elevato, dovuto a una limitata disponibilità delle materie prime che li compongono.

I magneti ceramici, al contrario, uniscono a caratteristiche magnetiche assai inferiori un costo modesto e una disponibilità molto elevata.

Dal punto di vista progettuale, l'adozione di magneti ad alto flusso consente di minimizzare tutte le dimensioni della macchina e, in particolare, il momento di inerzia, permettendo, così, il recupero delle differenze di costo tra i due materiali.

Il maggior problema nella costruzione del rotore consiste nell'assicurare i magneti, costruiti con materiale fragile e meccanicamente labile, al rotore, in modo rigido, preciso e con il minor traferro possibile.

Per velocità e prestazioni ridotte, i magneti sono generalmente fabbricati a segmenti e incollati al rotore. Nelle realizzazioni più qualificate, questa struttura è resa più affidabile da un sottile anello di acciaio amagnetico.

Il sensore di posizione può essere ottico (encoder rotativo) o ad effetto Hall.

Dovendo essere incorporato nel motore, che è solitamente isolato in classe F, esso deve funzionare entro lo stesso campo di temperatura, che si estende fino a 155 °C, nonché essere affidabile e insensibile a sporcizia e contaminazioni da lubrificante.

Per tutte queste ragioni, il sensore a effetto Hall, unito a una ruota magnetizzata con lo stesso numero dei poli del motore e calettata sul motore stesso, è, di norma, la soluzione preferita.

I principali vantaggi applicativi offerti dall'adozione della tecnologia brushless possono essere così elencati:

- maggiore affidabilità, migliori prestazioni e maggiore rendimento;
- minori ingombri e pesi e minima manutenzione;
- alte accelerazioni continuative e bassa inerzia;
- disponibilità della piena coppia sino alla massima velocità;
- completa proteggibilità termica;
- versatilità nella tensione di alimentazione;
- alto rapporto coppia di picco/coppia nominale a tutte le velocità;
- alta velocità;
- maggiore silenziosità;
- facilità di esecuzione stagna e antideflagrante;
- possibilità di raffreddamento a fluido.

Per i motori brushless sono state sviluppate due differenti tecniche di controllo che prendono il nome dalla forma d'onda della forza elettromotrice presente negli avvolgimenti di statore.

Fem trapezoidale. Il motore brushless a forza elettromotrice trapezoidale viene solitamente alimentato mediante un convertitore monofase o trifase a transistor (es. IGBT), come mostrato nella fig. 7.122a.

Nei grafici mostrati nella fig. 7.122b, sono rappresentate le forme d'onda delle tre fasi concatenate applicate al motore, in quelli di fig. 7.122c le sequenze di commutazione delle fasi, realizzate tramite dei sensori ad effetto Hall che controllano i transistor; la forza elettromotrice di azionamento (v. fig. 7.122d) risultante dal sistema motore più elettronica di controllo è composta dai contributi sincroni delle fem delle singole fasi.

Il convertitore per motori brushless di fig. 7.122a è caratterizzato da due stadi, uno di alimentazione e uno in grado di gestire l'azionamento e la potenza del motore. Il circuito sfrutta un ponte raddrizzatore trifase associato ad un gruppo di condensatori elettrolitici che costituiscono una batteria capacitiva.

I transistor in grado di alimentare il motore sono in genere del tipo IGBT di potenza, dotati di protezione a diodi collegati in antiparallelo, vista l'entità del carico induttivo.

L'azionamento del motore prevede che gli avvolgimenti trifase dello statore siano alimentati secondo un certo criterio, legato a degli istanti in cui avvengono le commutazioni delle correnti in funzione della posizione del rotore.

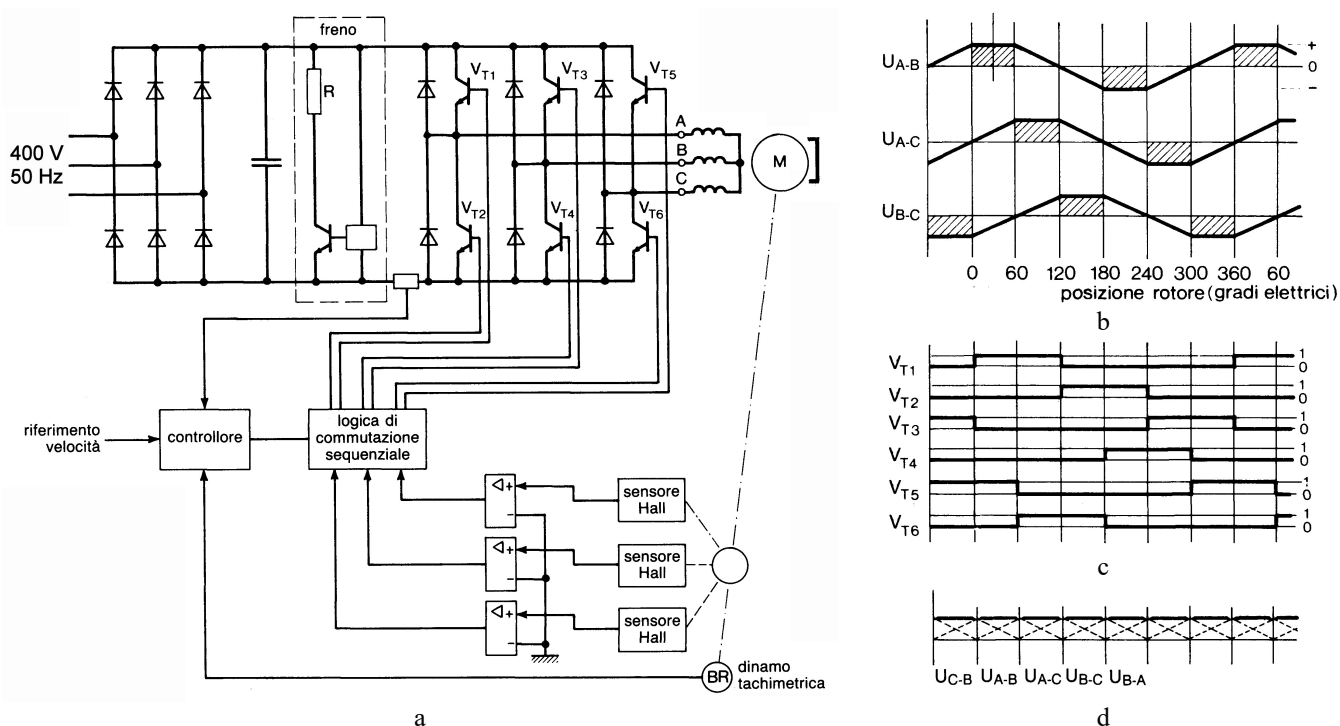


Fig. 7.122 - Sistema brushless a fem trapezoidale: a) Schema a blocchi di un azionamento - b) Forze elettromotrici concatenate - c) Tensioni di controllo dei 6 transistor componenti il convertitore (1 = conduzione, 0 = interdizione) - d) Forza elettromotrice risultante.

Nello schema a blocchi dell'azionamento, all'anello di retroazione formato dai sensori ad effetto Hall (solitamente tre disposti sulla calotta di chiusura del motore), necessari per conoscere il posizionamento del rotore, si aggiunge quello della dinamo tachimetrica, che consente un controllo ad anello chiuso della velocità impressa al motore.

Nella fase di frenatura entra in funzione l'apposito circuito che dissipa, sulla resistenza R, l'energia recuperata dal motore brushless.

La forma d'onda trapezoidale viene utilizzata per eliminare l'ondulazione di coppia che si verrebbe a creare con una forma d'onda sinusoidale, ma non attenua del tutto la pulsazione di coppia dovuta all'induttanza del motore.

La condizione necessaria per poter avere una coppia uscente costante in un motore a corrente continua, è che i campi magnetici statorico e rotorico siano costanti sia in grandezza che in orientamento, ma questo aspetto ideale non è confermato in pratica.

Appena l'armatura inizia a ruotare, il relativo orientamento dei campi magnetici cambia irrimediabilmente e questo aspetto si manifesta in piccoli cambi di coppia sull'albero, chiamati ondulazione di coppia. L'effetto si manifesta in un piccolo contraccolpo nei punti di commutazione, che può risultare rilevante quando il motore funziona molto lentamente.

Ma il principale inconveniente del motore brushless a fem trapezoidale è che, dovendo ottimizzare il disegno costruttivo del motore in funzione della forma d'onda, si è costretti ad un sottoutilizzo del motore in termini di momento d'inerzia, rendimento e rapporto peso/prestazioni.

Fem sinusoidale. Il motore brushless a forza elettromotrice sinusoidale richiede che la tensione applicata agli avvolgimenti sia, appunto, di forma il più possibile prossima alla sinusoidale.

La tecnica a fem sinusoidale è più costosa rispetto alla precedente, comporta meno ondulazione di coppia e quindi una rotazione migliore alle basse velocità, un rendimento più alto e più risoluzione nei controlli di posizione. La tecnica di controllo del convertitore deve essere perciò del tipo PWM (*Pulse Width Modulation*), a modulazione della larghezza d'impulso, che più di altre consente la ricostruzione della forma di tensione sinusoidale.

Anche dal trasduttore di posizione angolare è richiesta un'elevata precisione, per cui si rende necessario l'impiego di encoder ad esempio di tipo synchro o resolver.

Le fasi del motore possono essere 2 oppure 3 (v. fig. 7.123a). Nel caso del motore bifase le due sinusoidi sono sfasate di 90° elettrici, mentre nel caso del trifase le tre sinusoidi devono essere sfasate tra loro di 120° elettrici. I grafici di fig. 7.123, riferiti ad un motore brushless a 3 avvolgimenti, rappresentano gli andamenti delle fem concatenate (v. fig. 7.123a) e della fem risultante (v. fig. 7.123b).

Solitamente il convertitore è del tipo a corrente impressa e la fase della corrente è rigidamente vincolata alla posizione del rotore, mentre l'ampiezza della sinusoide funge da parametro di controllo.

Valori più elevati di accelerazione sono possibili quando il sistema è in grado di controllare anche l'angolo di fase fra la corrente ed il campo del motore.

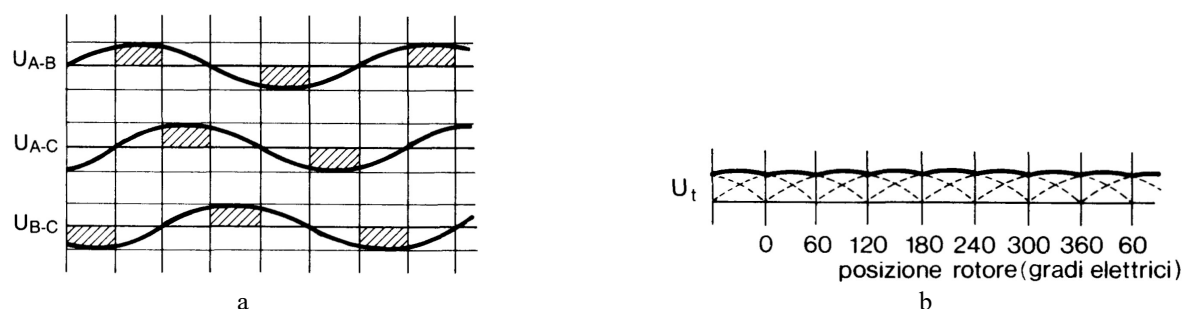


Fig. 7.123 - Forme d'onda di un sistema brushless a fem sinusoidale: a) Forze elettromotrici concatenate - b) Forza elettromotrice risultante.

Il motore brushless trova applicazione nei settori in cui è richiesta una dinamica elevata come nell'automazione industriale, nella robotica, nelle macchine utensili, ecc.

Quindi questo motore deve avere un'inerzia molto bassa, proprio per favorire la dinamicità degli azionamenti e viene perciò inserito per gestire importanti controlli, come ad esempio quelli di seguito elencati.

- Controllo per ventilatori, compressori, pompe, dove è necessaria la variazione di velocità, in cui il carico è direttamente accoppiato all'albero motore e dove non è richiesta precisione operativa.
- Controllo in quelle applicazioni dove viene richiesta una rapida risposta dinamica della macchina e dispositivi di retroazione di velocità. Le applicazioni sono previste in campo automobilistico, aerospaziale e nella domotica. I sistemi di controllo sono, però, più complessi e costosi.
- Controllo e posizionamento. In quelle applicazioni, rivolte essenzialmente al campo industriale, che richiedono spesso l'inversione del senso di marcia del motore, la dinamicità, la velocità e la coppia sono fondamentali. Le applicazioni di posizionamento prevedono le seguenti fasi: accelerazione, velocità costante, decelerazione e fase di posizionamento. Il carico meccanico sul motore può essere soggetto a variazioni.

È grazie a queste caratteristiche che i servomotori brushless hanno rimpiazzato i servomotori a collettore nel campo dell'automazione, come illustrato, per esempio, nella fig. 7.124.

Con l'uso di questi servomotori è possibile:

- ridurre i tempi di ciclo delle macchine utensili (CNC), grazie all'adozione di mandrini superveloci, macchine multi-mandrino e per i tempi di posizionamento del cambio utensile;
- migliorare l'accelerazione dei movimenti dei robot, grazie all'adozione di motori più leggeri, di minore inerzia e con potenza più alta;
- semplificare o eliminare i riduttori e i cambi meccanici di velocità, grazie alla disponibilità, in ingombri limitati, di coppie elevate e di velocità infinitamente variabili;
- sostituire attuatori pneumatici o idraulici per la realizzazione di impianti automatici più flessibili ed efficienti.

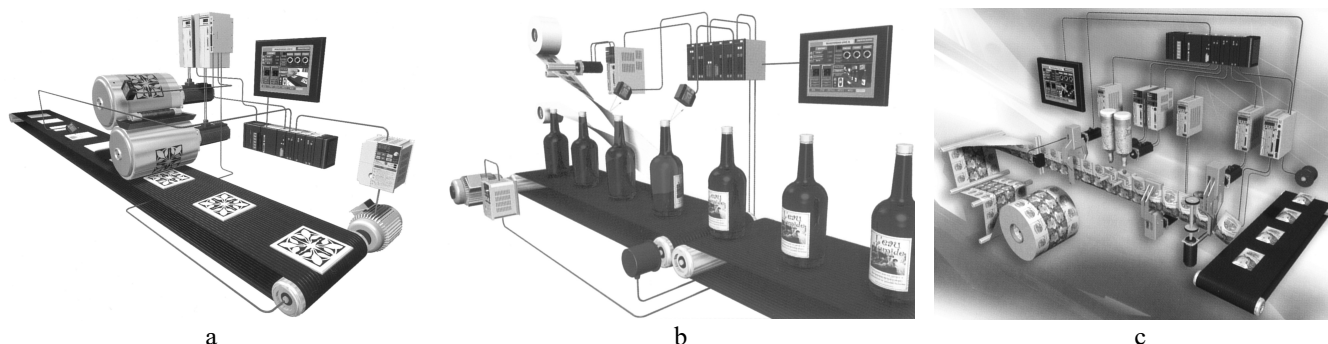


Fig. 7.124 - Esempi di applicazione di servomotori brushless: a) Stampa di piastrelle mediante un processo di stampa rotativo - b) Applicazione di etichette adesive su bottiglie - c) Sincronizzazione tra una confezionatrice a pellicola e il nastro trasportatore di alimentazione (Omron).

Nella fig. 7.125 è mostrato un esempio di configurazione di un servosistema brushless monofase entry level. Questa configurazione consente di sostituire i motori passo-passo, descritti successivamente, con una tecnologia più avanzata, quale è quella dei servosistemi brushless.

Nella fig. 7.126 sono riportate le curve caratteristiche di alcuni tipi di motori brushless compatti a media inerzia, adatti per essere alimentati mediante l'azionamento Junma. Per alcuni tipi di motori è previsto un freno.

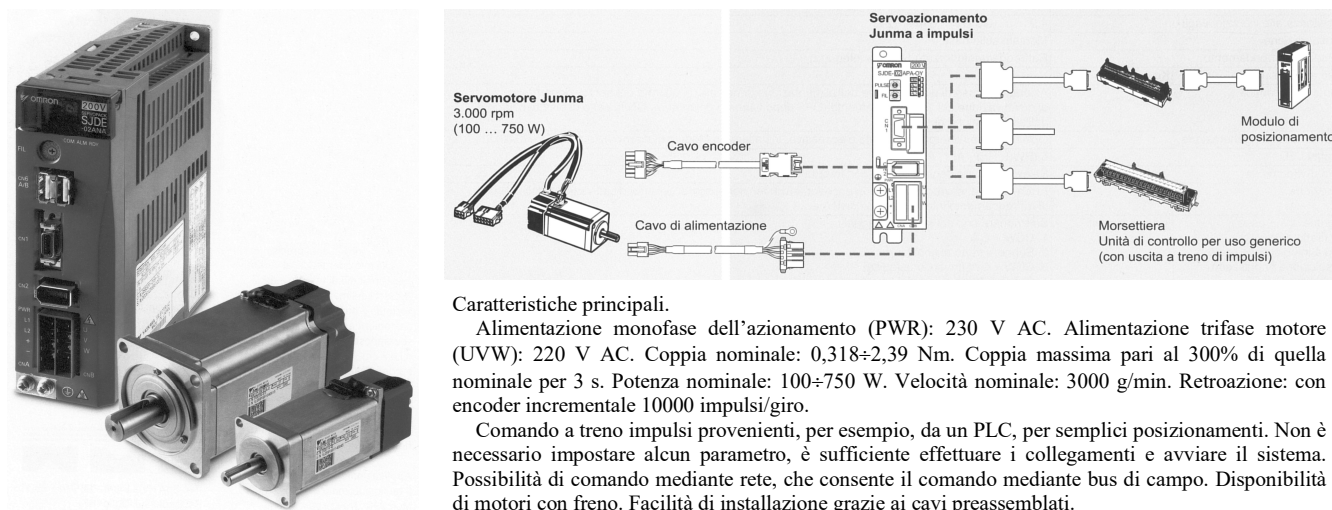


Fig. 7.125 - Esempio di servosistema entry level: azionamento elettronico Junma, motore brushless e relativa configurazione (Omron).

Questi motori sono caratterizzati da un tipo di servizio continuo e da una classe di isolamento B.

Presentano un encoder interno con uscita analogica. L'esecuzione è del tipo interamente chiuso, autoraffreddante e con grado di protezione IP55 (esclusi l'apertura dell'albero e i connettori).

L'installazione è facilitata dalla presenza di cavi di collegamento precablati e può essere effettuata fino 1000 m sul livello del mare senza variazioni delle caratteristiche del motore.

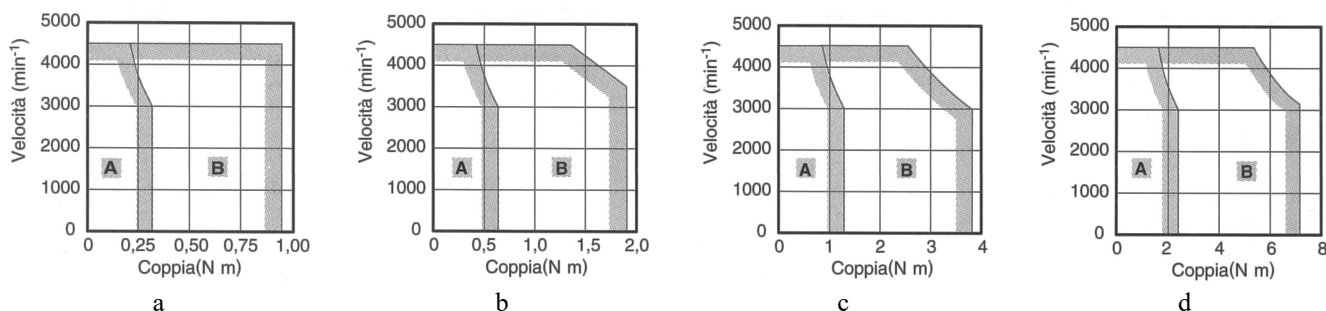


Fig. 7.126 - Caratteristiche coppia-velocità di motori brushless Junma: a) Da 100 W - b) Da 200 W - c) Da 400 W - d) Da 750 W. A: zona di lavoro continuo, B: zona di lavoro intermittente (Omron).

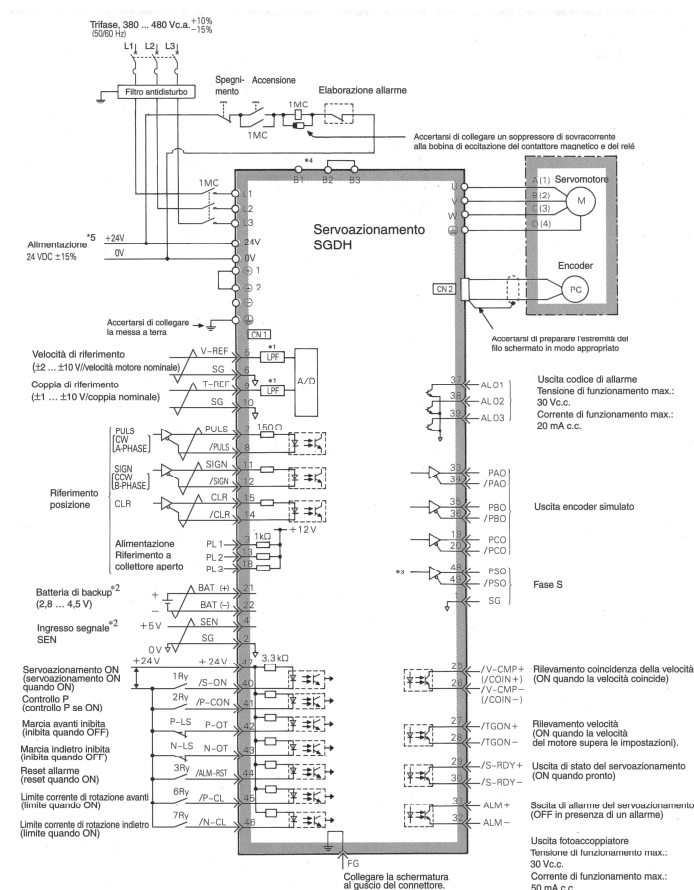
Nella fig. 7.127a è mostrato un servozionamento monofase o trifase di gamma superiore rispetto a quello mostrato nella fig. 7.125. Per questi modelli è riportato, nella fig. 7.127b, a titolo di esempio, lo schema di collegamento dei modelli trifase alimentati a 400 V AC con potenze del motore fino a 15 kW.



Caratteristiche principali.

- Gamma di motori compresa tra 30 e 55 kW.
- Velocità nominale del motore compresa tra 1000 e 6000 giri/min.
- Grado di protezione del motore IP67.
- Coppia massima pari al 300% di quella nominale.
- Controllo analogico della velocità e della coppia.
- Controllo a treno di impulsi del posizionamento.
- Risoluzione dell'encoder assoluto fino a 17 bit.
- Possibilità di impiego di encoder assoluto e incrementale.
- Connettività a bus di campo.
- Progettazione, configurazione e messa a punto mediante software.

a



b

Fig. 7.127 - a) Servosistema Sigma-II e relative caratteristiche principali - b) Schema di collegamento per modelli con alimentazione trifase, 400 V AC e con potenza fino a 15 kW (Omron).