

TECNOLOGIA FULL DIGITAL E MOTORI PASSO PASSO IN LOOP CHIUSO

SOMMARIO

La pratica corrente di usare il motore passo passo in anello aperto non può e non deve precludere la possibilità di utilizzare tali motori in anello chiuso. Le prestazioni ottenibili in tale modalità da un motore passo passo pilotato da un azionamento full digital di Ever Elettronica, dimostrano infatti che tali sistemi sono in grado di rendere velocemente stabile al valore desiderato l'inseguimento di un riferimento di posizione anche in condizioni d'uso che, specialmente in condizioni di direct driving e sino a velocità di 2000 rpm, sarebbero impegnative per un motore brushless. Il motore passo passo, inoltre, pur restando per tipologia costruttiva uno dei tipi di attuatori più adatti al controllo di cicli di posizionamento, con la modalità di controllo in loop chiuso, può essere preso in considerazione anche per il controllo molto preciso di velocità. Il tutto a costi che, aspetto sicuramente non trascurabile, si avvicinano più a quelli di un drive in anello aperto che a quelli tipici per un comune servoazionamento di uguale potenza.

PROGETTAZIONE MECCATRONICA

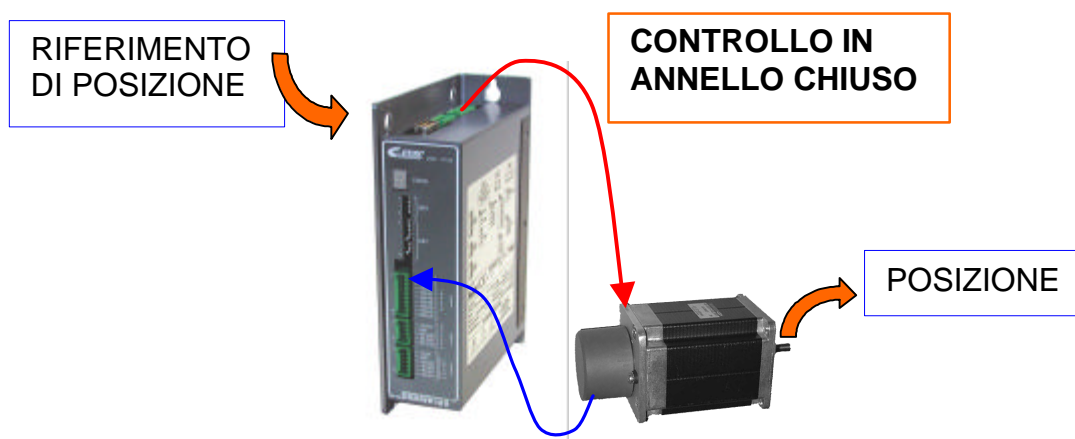
Le attuali condizioni di mercato impongono alle macchine livelli di produttività e di flessibilità sempre crescenti assieme a una migliore qualità del prodotto finito. Inoltre, negli ultimi anni, la progettazione di macchine sempre più sofisticate ha portato all'integrazione di tecnologie che permettono la realizzazione di cinematismi ad alte prestazioni: veri e propri sistemi definiti in modo meccatronico e adottando strategie di sviluppo integrato fra meccanica ed elettronica adeguate al livello di integrazione desiderato.

AZIONAMENTI FULL DIGITAL

Ever Elettronica propone, per questo scopo, nuove soluzioni per lo sviluppo delle macchine ad alte prestazioni: il controllo del motore passo passo in anello chiuso. Implementato negli azionamenti "full digital" di ultima generazione di Ever, il controllo in anello chiuso permette di migliorare le prestazioni del servomotore, in relazione alla precisione di posizionamento, alla dinamica (velocità di risposta) e all'efficienza. L'ottimizzazione delle prestazioni del motore passo passo è ottenuta mediante una gestione real-time dei parametri di controllo del motore (corrente, velocità, posizione) e rappresenta una risposta concreta alla crescente richiesta di miglioramento delle prestazioni di controllo e velocità dei sistemi passo passo in anello aperto, senza l'obbligo di dover aumentare significativamente i costi, ed esporsi ai rischi connessi con il cambio, adottando una soluzione di controllo del moto con motore brushless. La nuova soluzione è infatti perfettamente intercambiabile con le soluzioni passo passo pre-esistenti e semplice da implementare e parametrizzare in funzione dell'applicazione.

AZIONAMENTI PASSO PASSO IN LOOP CHIUSO

Il sistema di controllo di moto presentato viene realizzato reazionando il motore con un encoder incrementale con risoluzione dipendente dalla precisione richiesta dall'applicazione. In genere, grazie al sofisticato algoritmo di controllo implementato, è possibile ottenere buone prestazioni anche con poco costosi encoder a bassa risoluzione (500 imp/giro), evitando l'impiego di encoder a grande risoluzione quali quelli necessari ad esempio ai sistemi brushless per simulare il funzionamento di un motore passo passo.



La funzione dell'encoder non consiste semplicemente nella soluzione del problema della "perdita di passo" controllando i passi effettuati alla fine del movimento del motore, ma garantisce soprattutto posizionamenti precisi (il grado di precisione può essere definito in funzione dell'applicazione) monitorando in tempo reale lo spostamento che il motore è in grado di effettuare.

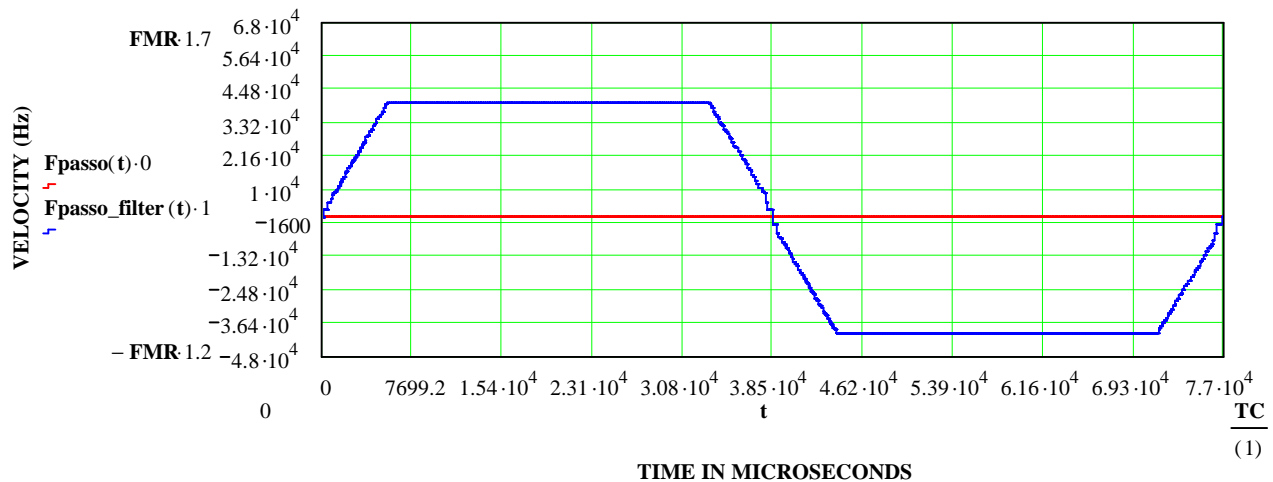
Il sistema in anello chiuso è stato sviluppato in modo che si possano avere reazioni istantanee a variazioni di carico sul motore, ottenendo ottimi risultati anche per i carichi tipicamente inerziali, senza pregiudicare il buon funzionamento dell'applicazione. Si evitano in tal modo i sovradimensionamenti necessari per molti sistemi passo passo in anello aperto e brushless, per garantire il corretto funzionamento in tutte le situazioni di carico. In questo modo inoltre non sono necessarie ricerche di risonanza meccanica (FFT) o analisi di modulo e fase che vengono effettuate per gli azionamenti brushless. In presenza di carichi variabili un'analisi di questo tipo non è peraltro utilizzabile, perché il punto di risonanza cambia in funzione del carico applicato al motore mentre la parametrizzazione dell'applicazione tramite i sistemi automatici di apprendimento previsti per molti azionamenti brushless è utile solo nel caso in cui il carico del sistema non sia variabile o comunque non subisca variazioni significative durante il funzionamento.

Tramite il controllo in anello chiuso è inoltre possibile evitare le risonanze dovute alla struttura del motore passo passo, come anche per i motori brushless, che viene controllato ottimizzando l'angolo dell'eccitazione, evitando le pendolazioni del rotore nell'intorno della posizione finale. A tale caratteristica si aggiunge anche la possibilità di effettuare il micropasso, che grazie all'alta risoluzione, può spingersi fino a 25600 passi/giro.

Il sistema è molto flessibile, potendo l'utilizzatore decidere se il motore deve raggiungere una certa posizione in modo dolce (basse vibrazioni) o veloce (alta precisione).

Tutte le regolazioni necessarie per il controllo con feedback avvengono tramite l'interfaccia seriale RS232/485 oppure tramite bus di campo CANbus in funzione della versione di azionamento utilizzata.

Tramite tali interfacce è possibile parametrizzare infatti i dati specifici relativi al controllo in anello chiuso così come tutti i dati relativi all'azionamento e all'applicativo utente dal momento che la funzione controllo in anello chiuso è stata aggiunta al firmware di cui sono dotati gli azionamenti Ever.



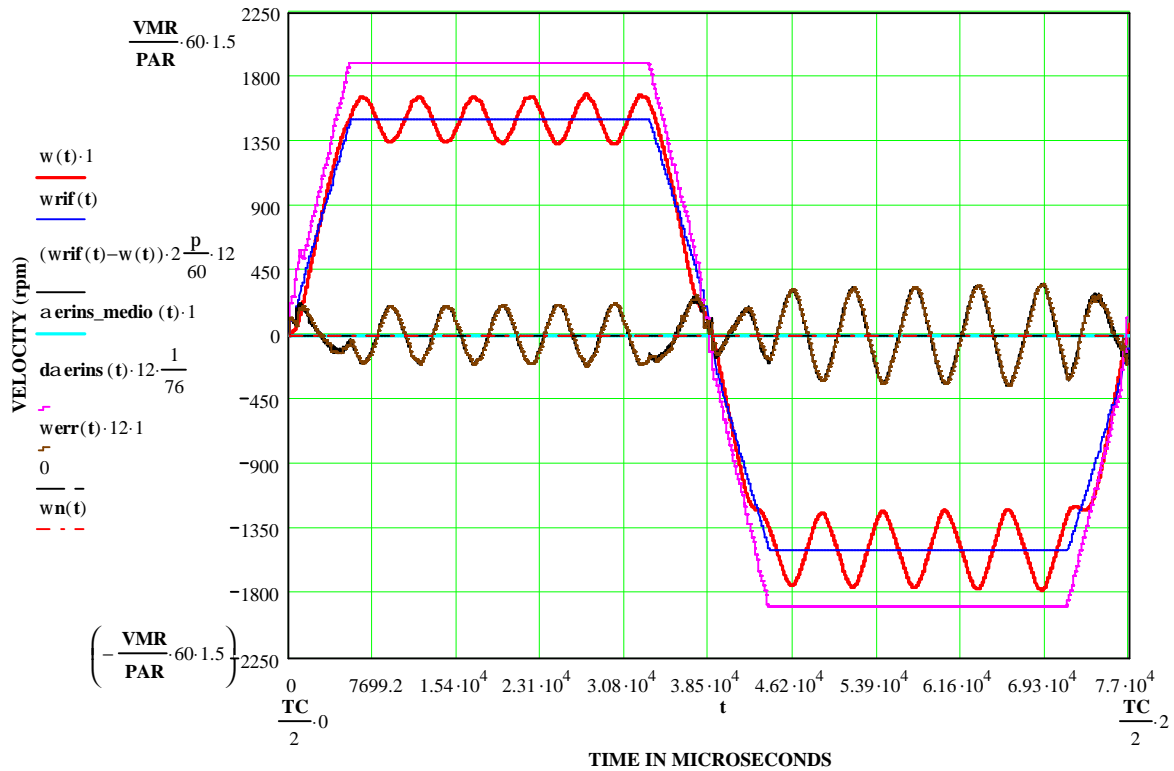
PRESTAZIONI DEL MOTORE PASSO PASSO IN ANELLO APERTO

Analizzando il comportamento di un motore passo passo comandato in anello aperto nell'inseguimento di un profilo di velocità tipico, quale ad esempio quello riportato nella figura precedente, si trova che la velocità del motore non converge al valore di riferimento, ma continua ad oscillare attorno a quest'ultimo. Inoltre è dimostrabile che una variazione dell'inerzia del carico oppure un aumento della coppia resistente, possono portare il sistema in una condizione di instabilità. Il modo più economico in queste condizioni per portare il sistema in uno stato stabile è agire sulla corrente e tensione applicate al motore, oppure rallentare la velocità di funzionamento. Dalla relazione che esprime in funzione delle coppie T_m e T_r e l'inerzia totale J l'accelerazione imposta al motore

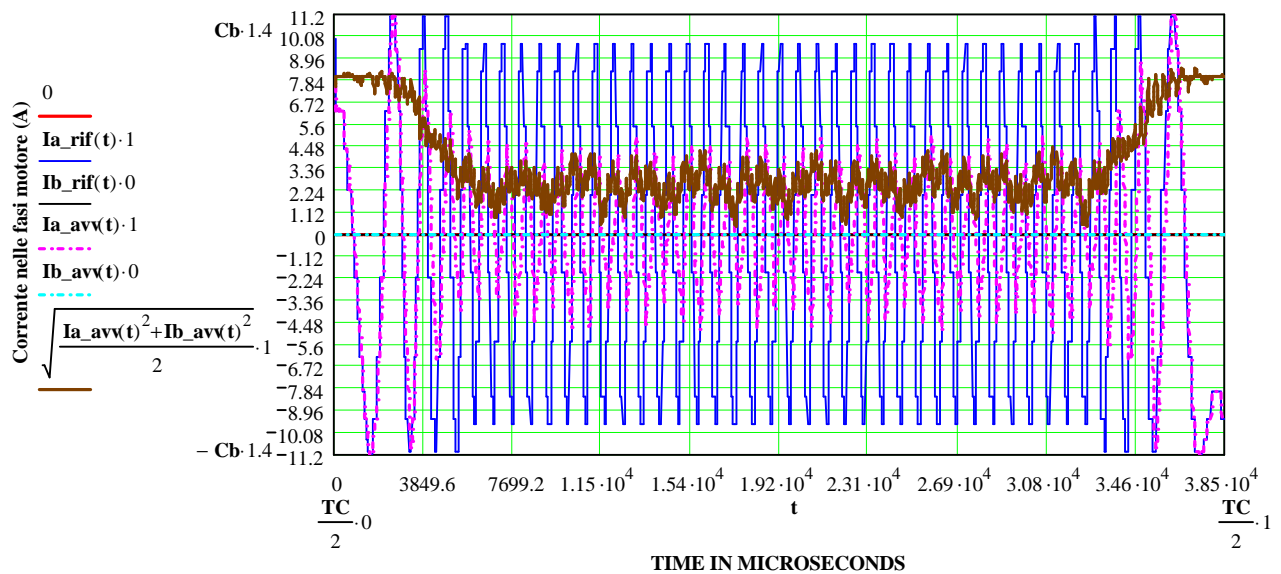
$$Dw/dt = (T_m - T_r) / J$$

risultano chiari i motivi per cui, in presenza di una coppia motrice T_m in esubero rispetto alla coppia di carico resistente rappresentata nella formula da T_r , oppure di variazioni di T_r , la velocità del motore sia soggetta a variazioni. Per ottenere un posizionamento sicuro infatti in anello aperto si deve utilizzare una corrente di fase I_F in grado di garantire una coppia T_m tale che il motore non si blocchi per variazioni del carico, essendo l'ampiezza della coppia sviluppata dal motore espressa come: $T_m = K_e \times I_F$

Dalla figura che segue risulta evidente l'andamento reale della velocità del motore in tale situazione.



La figura seguente evidenzia invece l'andamento della corrente di fase durante il movimento che non può, per i motivi sopra esposti, essere ridotta significativamente durante il movimento a velocità costante rispetto al valore utilizzato per accelerare il carico.



PRESTAZIONI DEL MOTORE PASSO PASSO PILOTATO IN LOOP CHIUSO CON FIRMWARE FULL DIGITAL DI EVER ELETTRONICA

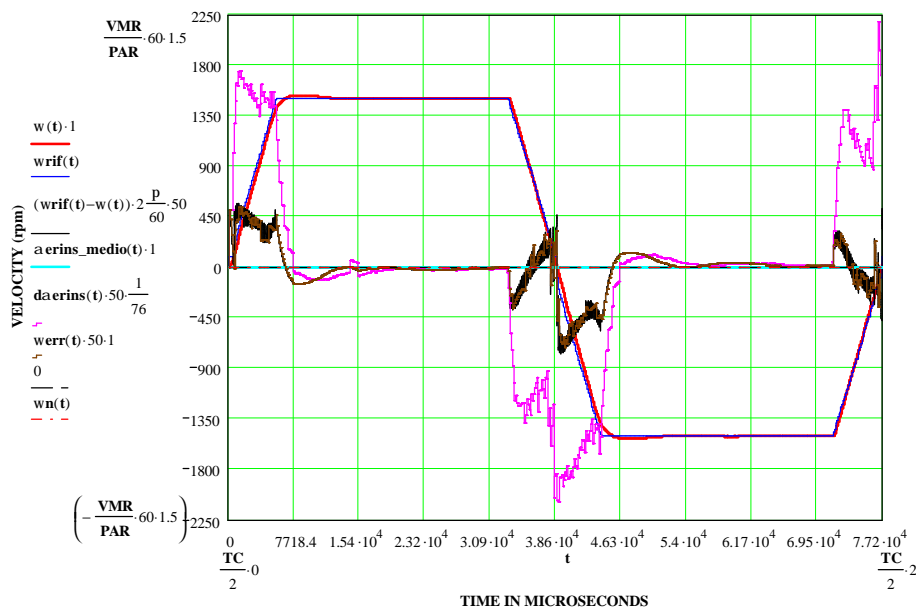
Le differenze prestazionali principali di un controllo full digital del motore passo passo in anello chiuso rispetto ad un controllo in l'anello aperto sono relative a:

- la precisione di posizionamento;
- la stabilità della velocità;
- l'ottimizzazione della corrente di fase del motore;
- il mantenimento del passo;
- la riduzione della potenza assorbita dalla rete;
- il minor riscaldamento del motore.

Precisione e stabilità delle prestazioni

Il controllo in anello chiuso permette infatti di ottenere un inseguimento preciso e stabile del profilo di velocità teorico evitando le oscillazioni di velocità e riducendo l'errore istantaneo di inseguimento. Il sistema risultante è robusto rispetto alle variazioni di inerzia di carico e immune ai disturbi di coppia, quali quelli causati ad esempio da un aumento imprevisto degli attriti. È importante notare come un tale sistema, anche qualora si presentassero delle situazioni di carico proibitive (aumenti oltre i parametri ammessi di alcuni valori di carico dell'applicazione), è in grado di adattare le condizioni di funzionamento del motore allo scopo di non perdere il passo e realizzare un autotuning dell'inseguimento. La figura seguente mostra il comportamento tipico di un controllo in anello chiuso, come si vede, significativamente migliore rispetto ala quello di un azionamento in anello aperto a parità di condizioni di funzionamento (velocità, accelerazione e inerzie).

Il valore di corrente di fase I_F nell' inseguimento del riferimento di posizione viene ottimizzato tramite una relazione del tipo: $I_F = K_p \cdot e_\theta + K_d \cdot de_\theta / dt + K_f \cdot d^2e_\theta / dt^2$ in cui il valore e_θ , che esprime l'errore di posizione istantaneo è determinato, così come la sua derivata $de_\theta/dt = \dot{e}_\theta$, che esprime invece l'errore istantaneo di velocità, ogni $100\mu s$ in modo di consentire all'azionamento un inseguimento molto reattivo ed accurato. A titolo di confronto si osserva che i servosistemi per motori brushless più diffusi hanno un evento di lettura dei suddetti parametri mediamente ogni in $250\mu s$.



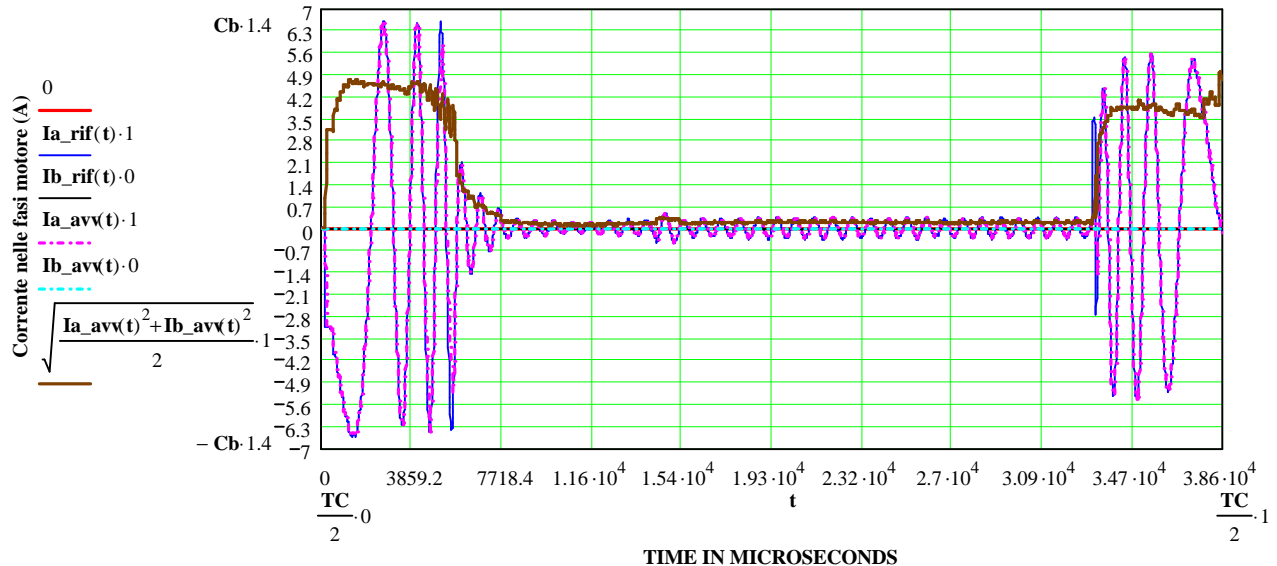
Dato che in un servo azionamento che controlla la posizione del motore, la precisione di inseguimento della posizione di riferimento dipende anche dalla stabilità della velocità del motore, nel senso che se la velocità non è stabilmente agganciata al valore di riferimento l'errore istantaneo di posizione aumenta all'aumentare della velocità, si può capire l'importanza di un ciclo di regolazione veloce quale quello implementato negli azionamenti full digital di Ever Elettronica.

Poiché inoltre con il controllo in anello chiuso si possono raggiungere accelerazioni maggiori di quello ottenibili in anello aperto grazie al mantenimento del sincronismo del moto in ogni condizione di carico, è possibile incrementare le prestazioni dinamiche del motore sfruttando le sue caratteristiche di coppia in modo ottimale e mantenendo stabile la risposta del motore anche in movimenti soggetti a continue fluttuazioni di coppia richiesta.

Ottimizzazione della corrente di fase del motore e mantenimento del passo

L'incremento delle prestazioni è relativo anche alla ottimizzazione della corrente negli avvolgimenti del motore: in anello chiuso, allorché si è agganciato il riferimento di velocità, si insegue quest'ultimo con una sensibile diminuzione della corrente di avvolgimento rispetto al valore erogato durante l'accelerazione.

La figura che segue evidenzia come, con gli stessi parametri di moto e con lo stesso motore analizzati nel movimento in loop aperto, basti alimentare quest'ultimo con una corrente di fase molto più bassa nel caso di controllo in anello chiuso, rispetto a quella necessaria in anello aperto, per ottenere prestazioni dinamicamente superiori.



Riduzione della potenza assorbita dalla rete e del riscaldamento del motore

Ciò ha come conseguenze positive la diminuzione dell'energia dispersa in calore e quindi della temperatura di esercizio del motore e la non generazione di coppia in esubero che si tradurrebbe, come visto nel controllo in anello aperto, in continue accelerazioni e decelerazioni non volute del motore. Questa caratteristica è importante soprattutto in movimenti con cicli di spostamento continui dove si possono ottenere risparmi energetici considerevoli.

Dall'ultimo grafico relativo alla corrente istantanea in anello chiuso, ottenuto impostando un valore massimo di corrente erogabile durante i transitori di accelerazione e decelerazione di 5 Arms e una corrente minima erogabile a regime di 0 Arms, si rileva un valore di corrente media $I_{rmsa} = 2,218$ Arms per la fase a e $I_{rmsb} = 2,239$ Arms per la fase b ed i seguenti dati per potenze e innalzamento della temperatura del motore:

Potenza_assorbita = 19,132
Potenza_meccanica = 11,47
Pj_diss = 7,662
DELTA_Temperatura_Motore_Ambiente = 15,324

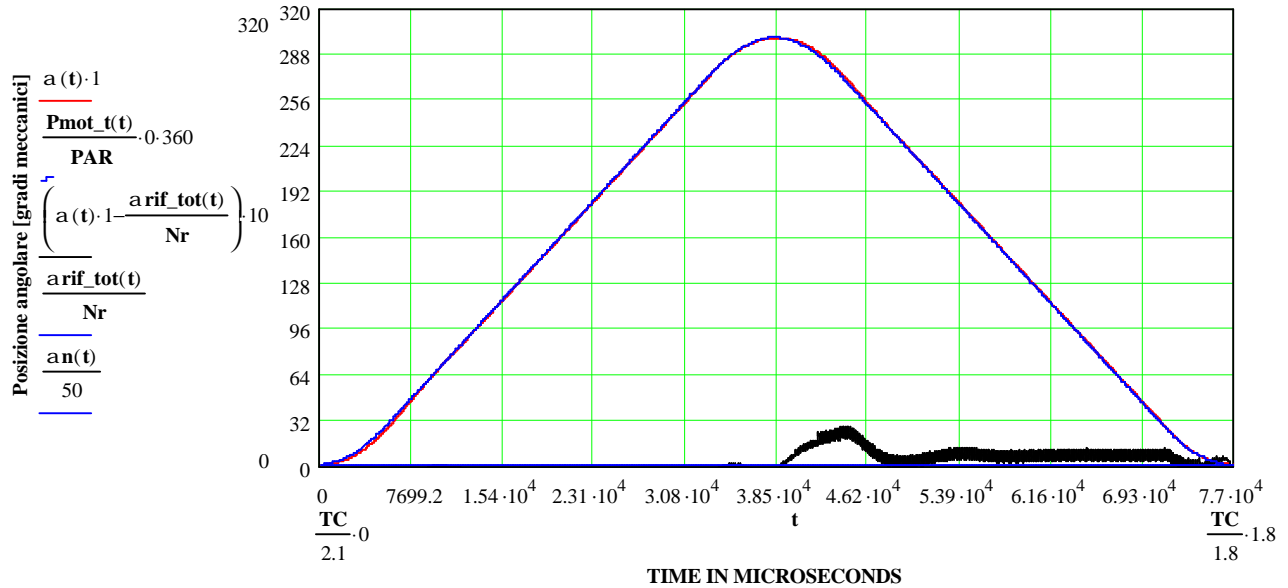
Avendo impostato una corrente massima erogabile durante i transitori di accelerazione e decelerazione uguale a 8 Arms e una corrente minima erogabile a transitorio esaurito uguale a 7 Arms, dal precedente grafico relativo all'andamento della corrente di fase in anello aperto, si leggono, per le fasi a e b rispettivamente, le correnti $I_{rmsa} = 4.202$ Arms e $I_{rmsb} = 4.261$ Arms, ed i seguenti dati per potenze e innalzamento della temperatura del motore:

Potenza_assorbita = 31,268
Potenza_meccanica = 11,47
Pj_diss = 19,798
DELTA_Temperatura_Motore_Ambiente = 39,596

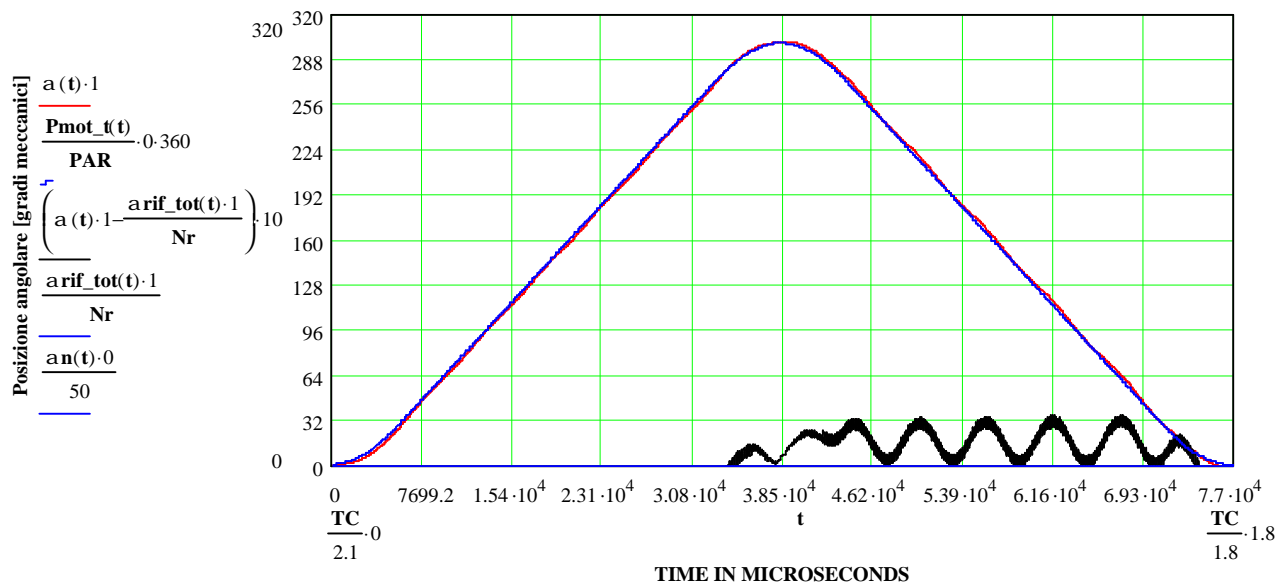
Risulta evidente la differenza fra le due soluzioni in termini di "potenza assorbita" dalla rete, potenza dissipata (P_{j_diss}) dal motore e innalzamento termico del motore stesso rispetto all'ambiente esterno a tutto vantaggio della soluzione in anello chiuso.

PRECISIONE DELL' INSEGUIMENTO DI POSIZIONE

Grazie all'espressione dell'algoritmo di controllo della corrente implementato da Ever Elettronica, di tipo proporzionale e derivativo, con feedforward di velocità ed accelerazione, e la frequenza di lettura dell'errore di posizione e chiusura del relativo anello di regolazione, la posizione del motore risulta costantemente controllata e corretta. Questa è una caratteristica prestazionale importante perché in una macchina in cui il carico all'albero motore non è costante influenza direttamente la qualità di lavorazione. È importante notare, dal grafico che segue, come le oscillazioni nell'errore di inseguimento vengono smorzate dopo pochi cicli di regolazione.



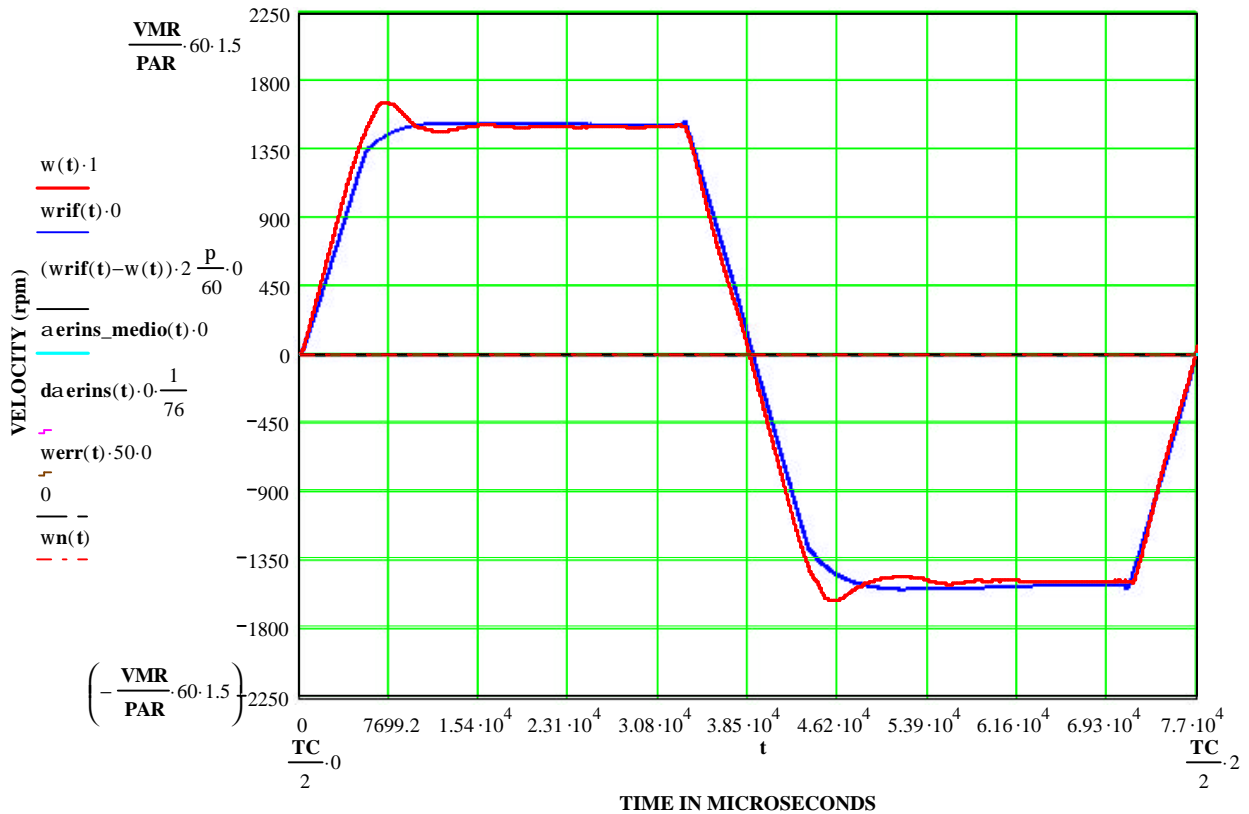
Con il controllo in anello aperto, se necessario, un metodo per minimizzare gli errori di posizionamento sta nell'adottare sistemi di smorzamento delle oscillazioni di tipo meccanico pur essendo tale soluzione non è sempre utilizzabile sia per motivi di costo sia per ragioni tecniche in applicazioni che necessitano di alta velocità, precisione e comunque per macchine con carichi variabili.



CONFRONTO CON LE PRESTAZIONI TIPICHE DEL SERVOAZIONAMENTO BRUSHLESS

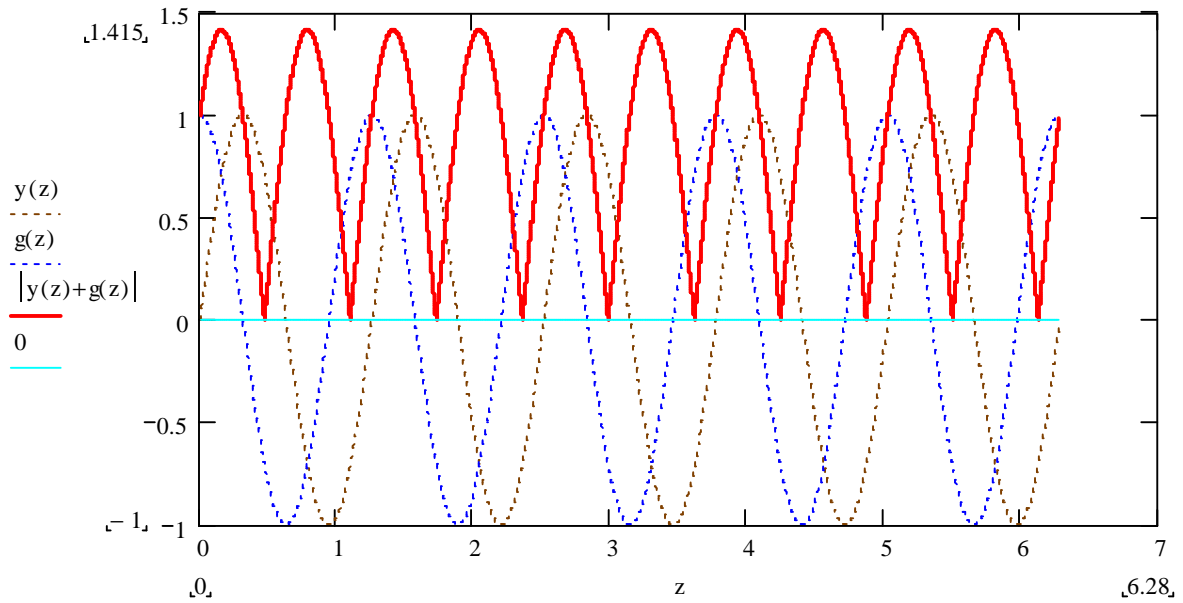
Analizzando le prestazioni dinamiche raggiungibili con un sistema di controllo del movimento con motore passo passo in anello chiuso risultano evidenti alcune differenze prestazionali rispetto al servomotore brushless.

Per il confronto, nella figura seguente, viene riportato un profilo di velocità tipico per un motore brushless durante l'inseguimento di un riferimento di posizione: il ritardo di chiusura del loop di controllo unitamente alla presenza di un termine integrale dell'errore in posizione nella formula di calcolo della corrente di avvolgimento, del tipo $I_F = K_p * e_0 + K_i * \int e_0 dt$, non permette dei tempi di assestamento e valori di sovraelongazione ridotti quanto quelli ottenibili con gli algoritmi di controllo in anello chiuso del motore passo passo implementati dal Ever in cui è presente un termine derivativo utilizzato ogni 100µs, rispetto ai 250us tipici per i servoazionamenti con motore brushless.

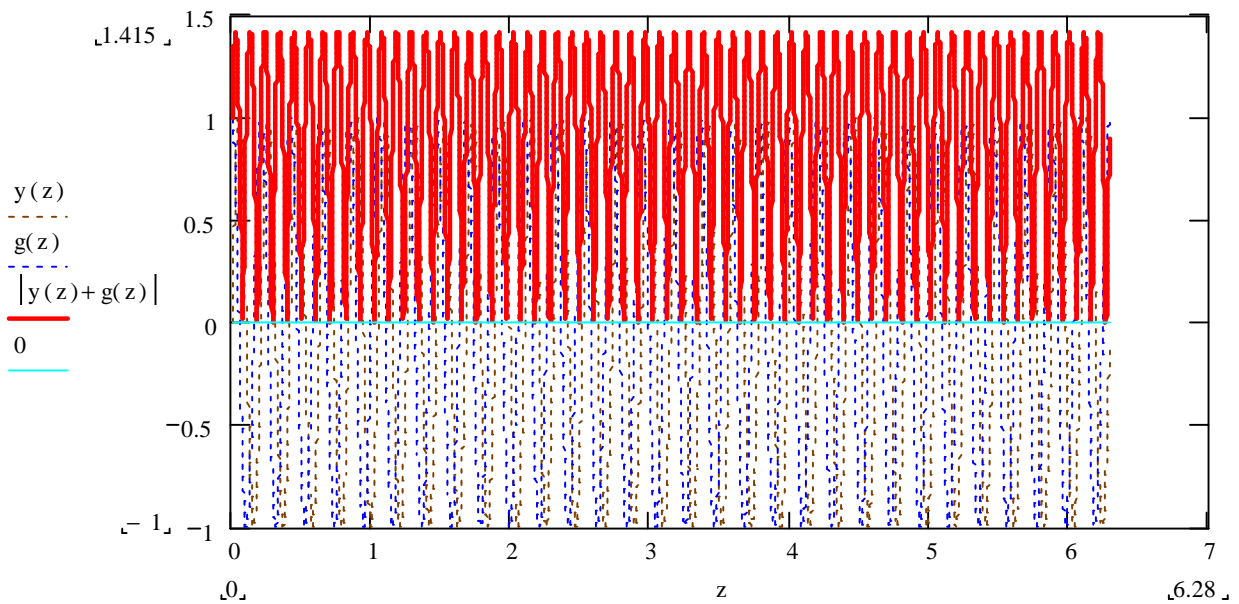


Un ulteriore vantaggio del servomotore di tipo passo passo rispetto al tipo brushless è conseguente alla struttura meccanica del primo che presenta un elevato numero di poli, usualmente 50 in un motore a 200 passi per giro, rispetto al numero di poli di un motore brushless, tipicamente uguale a sei.

Dipendendo il ripple di coppia da tale parametro, risulta evidente che il motore passo passo presenta una componente alternata della coppia con frequenza maggiore rispetto a quella del motore brushless e permette quindi un miglior controllo nei cicli di posizionamento.



Andamento della coppia in un motore brushless a 6 poli per 360° meccanici



Andamento della coppia in un motore passo passo a 50 poli per 360° meccanici

Le due curve che precedono esprimono il fatto che la coppia in un motore passo passo a due fasi è definita dalla relazione $T_m = I_a * K_e * \sin(Nr * \alpha) + I_b * K_e * \sin(Nr * \alpha + 90)$ con Nr tipicamente uguale a 50, mentre in un motore brushless la coppia è definita dalla somma di tre componenti sinusoidali sfasate di 120° e con Nr tipicamente uguale a 6.

CONCLUSIONI

La pratica corrente di usare il motore passo passo in anello aperto non può e non deve precludere la possibilità di utilizzare tali motori in anello chiuso. Tali sistemi infatti, come i dati sopra riportati, frutto dell'esperienza di Ever Elettronica, dimostrano, rappresentano uno strumento in grado di controllare con ottime performance il comportamento di un sistema dinamico. Tali sistemi infatti sono in grado di rendere velocemente stabile al valore desiderato l'inseguimento di un riferimento di posizione anche in condizioni d'uso che, specialmente in condizioni di direct driving e sino a velocità di 2000 rpm, sarebbero impegnative per un motore brushless. Il tutto a costi che, aspetto sicuramente non trascurabile si avvicinano più a quelli di un drive in anello aperto che a quelli tipici per un comune servoazionamento di uguale potenza.

Il controllo in anello chiuso è una funzionalità aggiuntiva in via di introduzione in tutte le tipologie di azionamenti prodotti da Ever Elettronica, che in tal modo consentirà agli utilizzatori dei propri azionamenti in anello aperto di incrementare facilmente le prestazioni della macchina senza dover sottostare ai rischi insiti in ogni cambio di tipologia di motore precedentemente utilizzato con successo.

Il motore passo passo, infine, pur restando per tipologia costruttiva uno dei tipi di attuatore più adatti al controllo di cicli di posizionamento, con la modalità di controllo in loop chiuso, può essere preso in considerazione anche per il controllo molto preciso di velocità a costi contenuti.