

Progetto di un banco prova per l'analisi del comportamento dinamico di servomotori elettrici

Paolo Righettini, Roberto Strada, Vittorio Lorenzi

Dipartimento di Progettazione e Tecnologie, Università degli Studi di Bergamo, Italia

E-mail: paolo.righettini@unibg.it, roberto.strada@unibg.it, vittorio.lorenzi@unibg.it

Keywords: Banco prova, servomotori, prestazioni dinamiche.

SOMMARIO. Nell'ambito dell'automazione industriale, ogniqualvolta si vuole realizzare un asse lineare per il controllo del moto di un end-effector, si fa generalmente ricorso a servomotori elettrici, siano essi brushless o asincroni a controllo vettoriale del flusso. Nella maggior parte dei casi, per la scelta del tipo e della taglia di motore più adeguato, è sufficiente affidarsi ai dati forniti dai costruttori. Quando, però, si tratta di applicazioni in cui le prestazioni dinamiche sono di importanza fondamentale, occorre conoscere in maniera accurata il comportamento del motore, in particolare la sua risposta a carichi variabili. In questo lavoro viene presentato il progetto preliminare di un banco prova che consente, oltre alla determinazione delle caratteristiche di funzionamento a regime di motori elettrici, anche l'applicazione di carichi variabili con legge armonica a frequenza variabile o di generici spettri di carico con cui poter simulare reali condizioni di funzionamento.

1 INTRODUZIONE

I criteri di scelta di servomotori elettrici fanno generalmente riferimento ai dati riportati sui cataloghi dei costruttori; nella maggior parte dei casi, i cataloghi riportano i dati relativi alle condizioni di funzionamento nominale, le coppie massime erogabili e le curve di coppia relative a diversi tipi di servizio, solitamente il servizio continuo S1 e il servizio intermittente periodico S3. Quando, però, ci si trova di fronte ad applicazioni che richiedono prestazioni dinamiche molto elevate, le indicazioni "tradizionali" non sono più sufficienti; occorre conoscere in maniera accurata il comportamento del motore soggetto a carichi variabili. In particolare, è necessario caratterizzare l'intero sistema composto da motore e azionamento determinandone, ad esempio, la funzione di trasferimento tra coppia applicata e velocità di rotazione.

Per la caratterizzazione dinamica dell'intero sistema di azionamento si può seguire un approccio di tipo teorico, sviluppando modelli matematici che consentano di riprodurre in maniera accurata il comportamento del sistema. Una delle difficoltà associate a questo tipo di approccio è l'individuazione del set di parametri per la completa determinazione del modello, non sempre desumibili dai cataloghi del motore e dell'azionamento. Inoltre, anche nell'ipotesi di conoscere tutti i parametri del modello, è sempre indispensabile procedere con una fase di validazione sperimentale dello stesso.

In questo lavoro viene presentato il progetto preliminare di un banco prova dedicato all'analisi sperimentale del comportamento dinamico di servomotori elettrici. Oltre alla determinazione delle caratteristiche di funzionamento a regime, il banco proposto consente anche l'applicazione di carichi variabili con legge armonica a frequenza variabile o di generici spettri di carico con cui poter simulare reali condizioni di funzionamento.

2 CONFIGURAZIONE DEL BANCO PROVA

Lo schema funzionale del banco prova progettato è rappresentato in Figura 1; la sua struttura è di tipo modulare, in modo da poter essere agevolmente configurata a seconda del tipo di misura

che si vuole eseguire. Per quanto riguarda la taglia dei motori, il banco prova è pensato per la caratterizzazione di motori di piccola taglia con potenze nominali che si aggirano attorno a 1 kW.

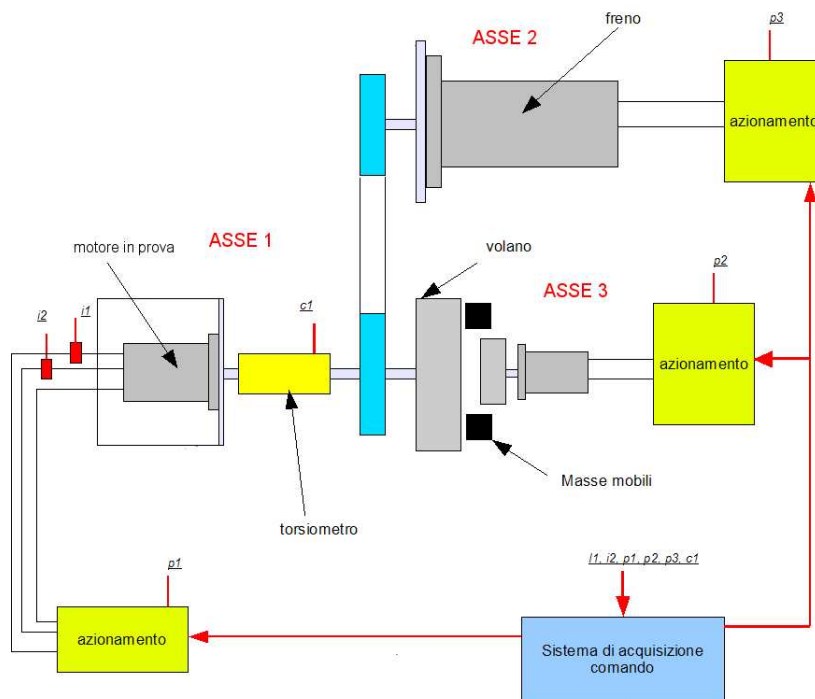


Figura 1: Schema funzionale del banco prova

Il progetto è stato sviluppato in modo da poter ottenere uno strumento che consenta l'esecuzione di tre differenti tipi di prove:

- prove per la determinazione dei campi di funzionamento del motore relativi a differenti tipi di servizio;
- prove in cui il motore viene sottoposto ad un carico con andamento generico in funzione del tempo;
- prove in cui il motore viene sottoposto a carichi variabili con legge armonica.

Per la generazione delle coppie di carico, il progetto prevede l'utilizzo di un altro servomotore collegato all'albero del motore in prova; controllando in coppia questo motore, è possibile applicare le più svariate coppie resistenti: costanti, ad esempio per la determinazione delle caratteristiche di funzionamento a regime; armoniche, per la determinazione del comportamento in frequenza del motore; coppie variabili con legge generica che riproducano determinate condizioni di funzionamento. In Figura 2 è mostrata la configurazione scelta per gli assi 1 e 2 in cui sono evidenziati: il servomotore in prova, montato su una slitta in modo da facilitarne la sostituzione (1); il torsiometro per la misura della coppia motrice erogata (2); la trasmissione a cinghia dentata, con relativo sistema di tensionamento (3); il volano (4); il servomotore per la generazione del carico (5).

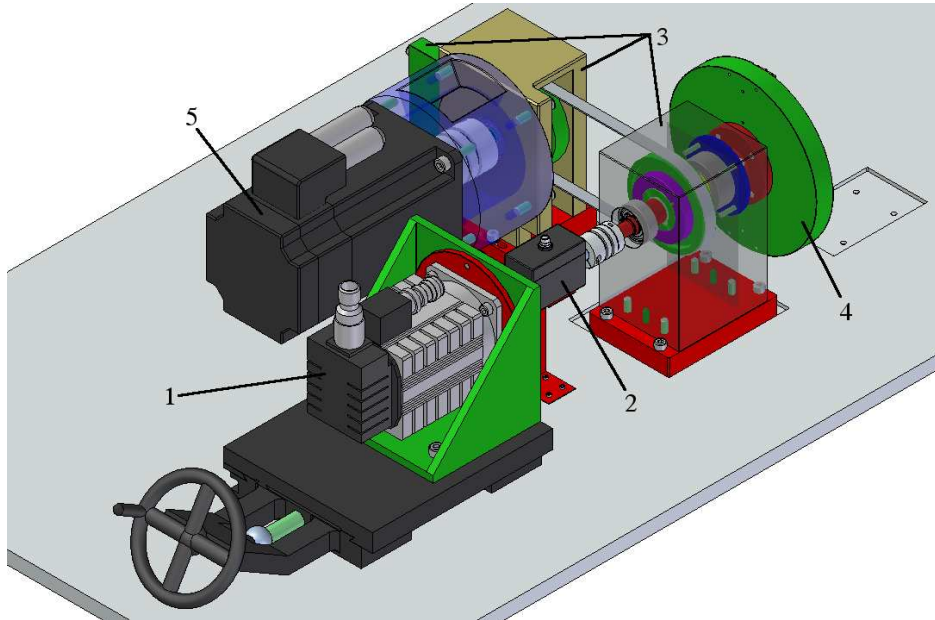


Figura 2: Configurazione scelta per gli assi 1 e 2

La frequenza della coppia resistente che può essere applicata con il motore (5) ha, però, un limite superiore legato in particolare al tempo di campionamento dell'anello di controllo in coppia. Per poter estendere il campo di frequenze in cui indagare il comportamento del motore, il progetto prevede l'impiego di un dispositivo ad hoc per la generazione di carichi armonici ad alta frequenza.

In definitiva, per poter garantire tutte le funzionalità sopra descritte, il banco prova è costituito da tre assi (Figura 1): l'asse 1 a cui è collegato il motore in prova; l'asse 2 su cui è montato il servomotore che ha la funzione di agire da carico; l'asse 3 su cui è montato il dispositivo per la generazione dei carichi armonici ad alta frequenza.

Gli assi 1 e 3 sono indipendenti l'uno dall'altro e sono collegati fra loro mediante un sistema appositamente progettato che consente di applicare all'albero motore una coppia resistente armonica a frequenza variabile. La coppia resistente viene generata per effetto della variazione del momento d'inerzia del volano calettato sull'asse 1 ottenuta grazie alla variazione della posizione di due masse traslanti mosse da un motore collocato sull'asse 3.

3 PRINCIPIO DI GENERAZIONE DEL CARICO AD ALTA FREQUENZA

Come accennato nel paragrafo precedente, per la generazione di carichi variabili sinusoidalmente, anche ad alta frequenza, si sfrutta la variazione del momento d'inerzia di un volano calettato sull'albero del motore in prova ottenuta mediante la traslazione di due masse mobili montate sul volano stesso. In Figura 3 è rappresentato schematicamente il sistema volano-masse mobili.

La coppia di carico a cui il motore deve far fronte, a causa delle inerzie collegate al suo albero, può essere scritta come:

$$C_i = \frac{d}{dt} (J_T \omega_m) \quad (1)$$

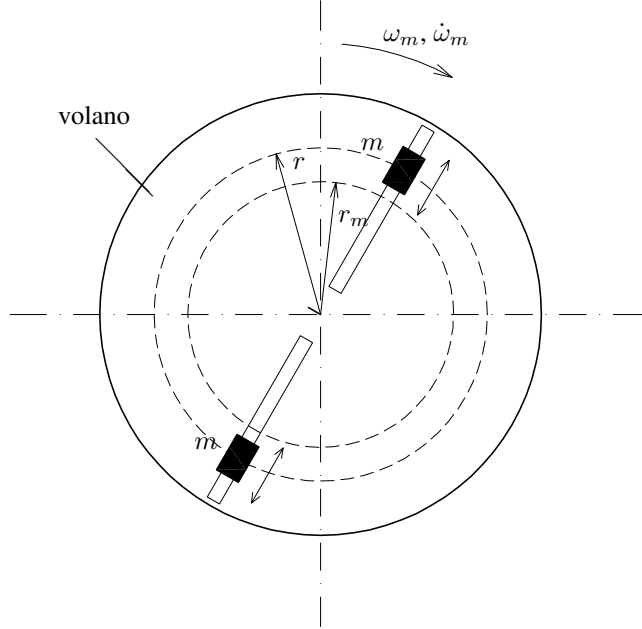


Figura 3: Schema del sistema volano/masse mobili

dove ω_m è la velocità di rotazione del motore e il momento d'inerzia J_T può essere scritto come:

$$J_T = J_V + 2mr^2 \quad (2)$$

dove J_V è il momento d'inerzia del volano e di tutto ciò che è calettato sull'albero motore tranne le masse mobili, il cui contributo è rappresentato dal secondo termine a destra dell'equazione (2).

Sviluppando l'equazione (1) si ottiene:

$$C_i = \frac{dJ_T}{dt} \omega_m + J_T \dot{\omega}_m = C_{iJ} + C_{ia} \quad (3)$$

dove il primo termine a destra è il contributo dovuto alla variazione del momento d'inerzia.

Considerando che la posizione di entrambe le masse varia secondo una legge armonica del tipo:

$$r = r_m + h \sin(\omega_e t) \quad (4)$$

dove r_m è il raggio medio di posizionamento, h è l'ampiezza di oscillazione e ω_e è la pulsazione di oscillazione delle masse, lo sviluppo del termine C_{iJ} porta all'espressione:

$$C_{iJ} = 4mh r_m \omega_m \omega_e \left[\cos(\omega_e t) + \frac{h}{r_m} \sin(\omega_e t) \cos(\omega_e t) \right] \quad (5)$$

Nell'ipotesi in cui $h \ll r_m$, il secondo termine fra parentesi dell'equazione (5) diventa trascurabile rispetto al primo termine e la coppia può essere quindi approssimata come:

$$C_{i,j} \approx 4 m h r_m \omega_m \omega_e \cos(\omega_e t) \quad (6)$$

Si ottiene quindi una coppia applicata al motore in prova di tipo armonico con pulsazione pari alla pulsazione di eccitazione delle masse traslanti e ampiezza dipendente dalla massa m , dal raggio medio r_m , dall'ampiezza di oscillazione h , dalla pulsazione di oscillazione ω_e e dalla velocità di rotazione del motore ω_m . In generale, la velocità di rotazione del motore sarà soggetta a variazioni a causa proprio della coppia armonica applicata; trattandosi però di servomotori, l'ampiezza di oscillazione della velocità può essere ritenuta sufficientemente piccola da fare in modo che l'ampiezza della coppia $C_{i,j}$ possa essere ritenuta costante.

Applicando al banco prova il principio di generazione della coppia illustrato, si può applicare al motore una coppia armonica con qualsivoglia pulsazione, limitata solo dalla frequenza massima di oscillazione delle masse che si riesce a realizzare. Nei paragrafi seguenti saranno mostrate due possibili soluzioni costruttive.

3.1 Prima soluzione: albero a gomiti

La prima soluzione proposta per la movimentazione delle masse mobili montate sul volano prevede l'utilizzo di un altro servomotore che mette in rotazione l'asse 3 (coassiale all'asse 1) alla cui estremità è montato un albero a gomiti a cui sono collegate le masse da movimentare. La figura 4 mostra la configurazione proposta in cui sono evidenziati: il servomotore per la rotazione dell'asse (1); l'albero a gomiti (2); le masse collegate all'albero a gomiti da due bielle (3).

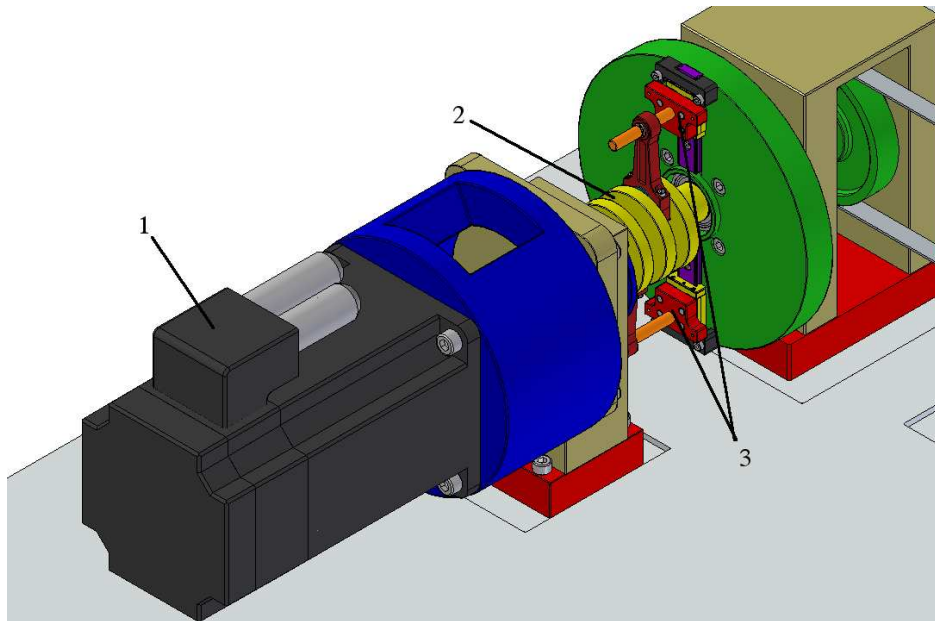
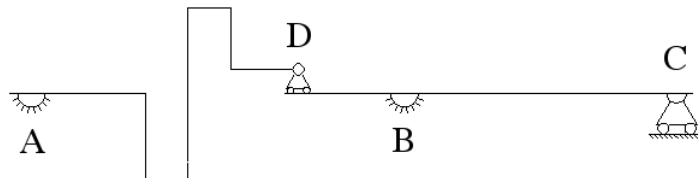


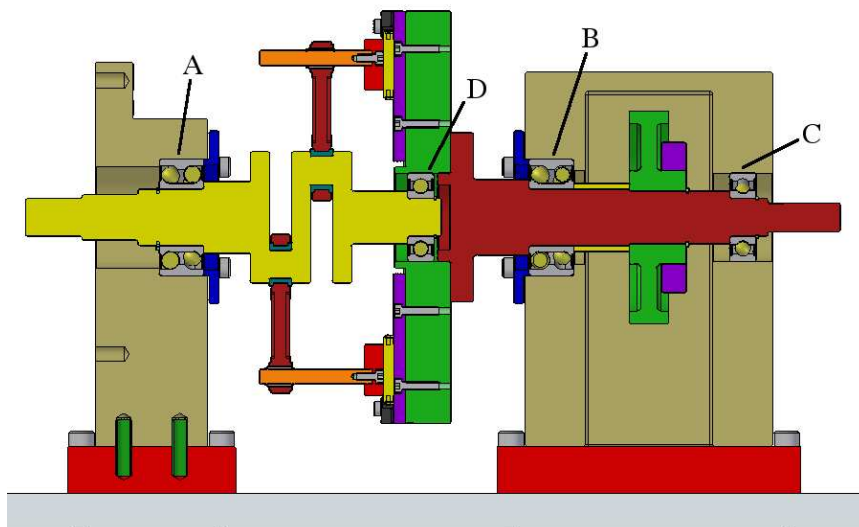
Figura 4: Asse 3 con albero a gomiti

L'albero a gomiti, collegato all'albero motore mediante un giunto torsionalmente rigido, è sostenuto da due cuscinetti, uno dei quali è alloggiato all'interno del volano. In questo modo si realizza

il sostegno dell'albero a gomiti e il disaccoppiamento delle rotazioni dei due assi. In Figura 5 è rappresentato lo schema dell'accoppiamento dei due assi nel piano verticale; la struttura così ottenuta è isostatica.



(a) Schema di disposizione dei vincoli



(b) Sezione del gruppo "albero a gomiti/volano"

Figura 5: Soluzione con albero a gomiti

Come noto, con questo tipo di soluzione, il moto ottenibile per le masse mobili non sarà perfettamente armonico, ma per valori del rapporto tra lunghezza della manovella e della biella sufficientemente piccoli, l'approssimazione sarà adeguata all'applicazione. Per quanto riguarda la frequenza di oscillazione delle masse, essa è legata alla velocità di rotazione relativa tra l'albero collegato al motore in prova (asse 1) e l'albero a gomiti (asse 3).

3.2 Seconda soluzione: doppio piano inclinato

Anche questa seconda soluzione proposta prevede l'utilizzo di un servomotore per la generazione del moto alternato delle masse mobili. La Figura 6 mostra il particolare del volano accoppiato al

sistema per la movimentazione delle masse in cui sono evidenziati: il volano collegato all'albero del motore in prova (1); l'elemento a doppio piano inclinato per la movimentazione delle masse (2); le masse mobili (3). La funzione degli elementi (4) e (5) sarà spiegata nel seguito.

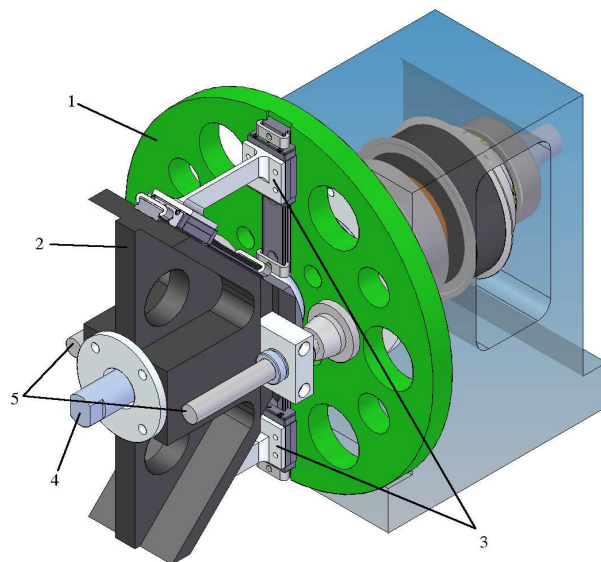
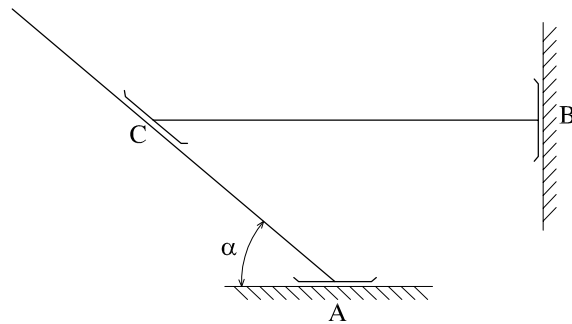


Figura 6: Gruppo “doppio piano inclinato/volano”

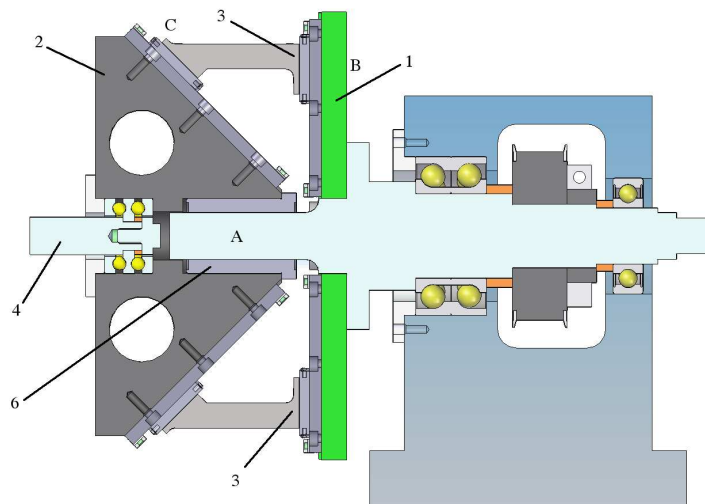
In questa seconda configurazione, il moto alternato delle masse è ottenuto muovendo l'elemento (2) con moto traslatorio alternato nella direzione dell'asse di rotazione del motore. Allontanando o avvicinando questo elemento al volano, si ottiene la traslazione in direzione radiale delle masse mobili. Lo schema cinematico del sistema, in un piano radiale a cui appartiene l'asse di movimento delle masse mobili, è rappresentato in figura 7(a), mentre la figura 7(b) mostra uno spaccato della soluzione realizzativa adottata.

Come si può notare dalle figure, il moto delle masse mobili, situate in corrispondenza del pattino *B*, può essere ottenuto muovendo nella direzione dell'asse di rotazione l'elemento inclinato che corrisponde all'asta *AC* dello schema di figura 7(a). L'angolo di inclinazione α è stato scelto pari a 45° , in modo da ottenere un rapporto di trasmissione unitario tra lo spostamento del piano inclinato e lo spostamento delle masse mobili. Dal punto di vista realizzativo, il moto traslatorio del doppio piano inclinato è fornito mediante l'alberino (4) (Figura 7(b)), vincolato all'elemento (2) con due cuscinetti assiali, che dovrà essere collegato, ad esempio, ad un manovellismo ordinario centrato per la generazione del moto armonico. Il moto traslatorio dell'elemento a doppio piano inclinato rispetto all'albero principale è consentito dal manicotto (6), che ha la funzione di disaccoppiare assialmente le due parti.

Per quanto riguarda il moto rotatorio del doppio piano inclinato, invece, la trasmissione avviene direttamente dal volano mediante i due alberi (3) evidenziati in Figura 6; in questo modo, le aste che collegano i carrelli collocati sul volano e sul doppio piano inclinato sono sgravate dai carichi dovuti alla trasmissione del moto tra i due elementi.



(a) Schema di disposizione dei vincoli



(b) Sezione del gruppo “doppio piano inclinato/volano”

Figura 7: Soluzione con doppio piano inclinato

Con questo tipo di soluzione, la pulsazione di oscillazione delle masse mobili dipende dalla velocità del servomotore che muove il sistema di generazione del moto alternato.

3.3 Confronto tra le soluzioni

La soluzione con albero a gomiti è sicuramente più “standard” per la generazione di moti alternati e anche dal punto di vista realizzativo non sembrano emergere particolari complicazioni. Dal punto di vista funzionale, invece, si deve tener presente che, come noto, occorre mantenere un rapporto tra lunghezza della manovella e lunghezza della biella sufficientemente piccolo da consentire di appros-

simare adeguatamente il moto delle masse ad un moto armonico. Inoltre, in questa configurazione, una volta stabilite le dimensioni di biella e manovella, non è possibile scegliere il raggio medio r_m attorno a cui far oscillare le masse; la sua posizione è strettamente dipendente dalla geometria del manovellismo scelto.

Nella soluzione con doppio piano inclinato, invece, è possibile stabilire su quale raggio medio lavorare, indipendentemente dalla geometria del meccanismo scelto prevedendo di spostare la cerniera a terra del manovellismo che, mediante l'alberino (4) (Figura 7(b)), movimenta il doppio piano inclinato. Dal punto di vista costruttivo, questa soluzione è sicuramente non convenzionale e, rispetto alla precedente, ha una complicazione in più: il sistema di generazione del moto alternato non è più "integrato", ma deve essere configurato e realizzato un sistema esterno.

4 CONCLUSIONI

In questo lavoro è stato presentato il progetto preliminare di un banco prova per la determinazione delle caratteristiche dinamiche di servomotori. Data la sua configurazione possono essere eseguite differenti tipologie di prove: può essere utilizzato per la determinazione dei tradizionali campi di funzionamento del motore oppure per valutarne il comportamento soggetto a spettri di carico qualunque o di tipo armonico anche ad alta frequenza, grazie all'impiego di un sistema basato sulla variazione del momento d'inerzia di un volano calettato sull'albero motore.

Dal punto di vista realizzativo, sono state presentate due soluzioni alternative per la variazione del momento d'inerzia, entrambe in corso di valutazione. A titolo d'esempio, la Figura 8 mostra la configurazione completa del banco in cui è adottata la soluzione ad albero a gomiti per la movimentazione delle masse mobili situate sul volano.

Attualmente, il progetto preliminare presentato è in corso di definizione finale; seguirà la fase realizzativa, la messa punto e l'esecuzione delle prime campagne di prova.

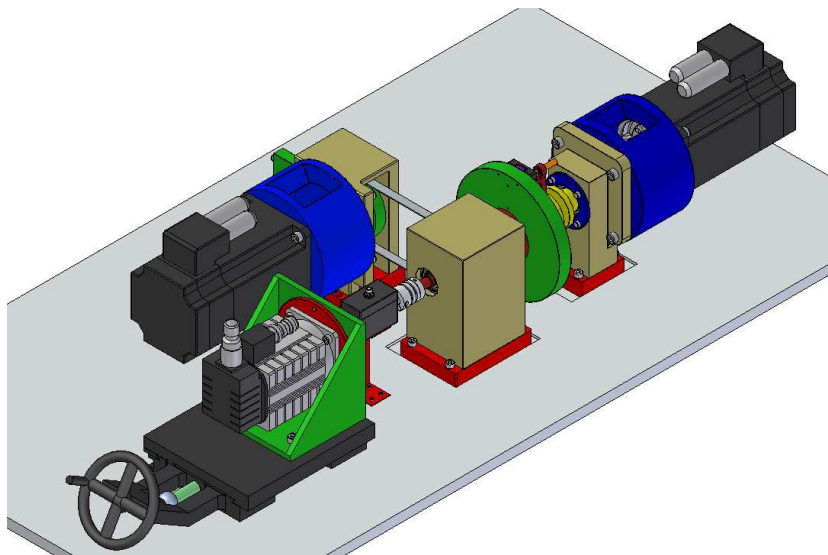


Figura 8: Configurazione completa del banco

Riferimenti bibliografici

- [1] Sgarbossa, L., Prè M., Bolognani S., “An automated quasi-static test bench for a detailed torque characterization of PM synchronous motors,” in *41st International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2006, Conference Proceedings (2006) vol. 2, pg. 758-763)*, .
- [2] Vittorio Lorenzi, Paolo Righettini, Roberto Strada, Bruno Zappa, “Analysis of the mechanical characteristics of stepper motor drives: design of an experimental test bench,” in *7th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*, June 15-16, 2006, Stockholm, Sweden.
- [3] Righettini, Strada, Lorenzi, Zappa, “Modelling and simulation of mechanical systems driven by stepper motor,” in *11th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2-4 September 2004, Riga, Latvia. .
- [4] Legnani, G., Tiboni, M. and Adamini, R., *Meccanica degli azionamenti elettrici vol. 1*, Esculapio Progetto Leonardo, Bologna (2002).
- [5] Cusimano, G., Strada, R., “Theoretical-experimental analysis of periodic running machines driven by asynchronous motor fed by inverter,” in *9th International Conference on Power Electronics and Motion Control (EPE-PEMC Conference Proceedings vol. 5, Kosice, 2000)*, Kosice, Slovak Republic, July 5-7 , 2000, 39-44 (2000).
- [6] Magnani, P.L., Ruggieri, G., *Meccanismi per macchine automatiche*, UTET (1986).