



Università degli studi di Padova

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea Triennale in  
Ingegneria Meccanica e Meccatronica

*“Controllo del moto coordinato in sistemi multi-asse mediante Electronic Line Shafting”*

*“Coordinated motion control in multi-axis systems through Electronic Line Shafting”*

RELATORE: Ch.mo prof. Richiedei Dario

LAUREANDO: Sinigaglia Edoardo

ANNO ACCADEMICO: 2012-2013



## INDICE DELLE PAGINE

Sommario	p. 5
Introduzione	p. 7
1. Sincronismo e camme elettroniche	
1.1 Sistemi multi-asse	p. 9
1.1.1 Tecniche per il sincronismo: <i>Cross Coupling</i>	p. 15
1.1.2 Tecniche per il sincronismo: <i>ELS</i>	p. 15
1.1.3 Tecniche per il sisncronismo: <i>Relative Coupling</i>	p. 17
1.2 Concetti generali sul sincronismo	p. 13
2. <i>Electronic Line Shafting</i>	
2.1 <i>Electronic Line Shafting</i> in letteratura	p. 21
2.1.1 Applicazione in macchina cartiera	p. 24
2.1.2 Applicazione in macchina tessile	p. 30
2.2 Applicazioni industriali dell' <i>Electronic Line Shafting</i>	p. 36
2.2.1 L'esempio Bosch Rexrtoh	p. 36
2.2.2 L'esempio Siemens	p. 39
2.2.3 Altre realtà industriali	p. 40
3. Simulazione	
3.1 Confronto tra sistema <i>Master Slave</i> ed <i>ELS</i>	p. 43
3.1.1 Sistema <i>MS</i> , disturbo su asse master	p. 45
3.1.2 Sistema <i>MS</i> , disturbo su asse slave	p. 49
3.1.3 Sistema con <i>ELS</i> , disturbo su di un asse	p. 54
3.1.4 Caso particolare: due disturbi di valore opposto	p. 59
3.2 Scelta dei parametri per l'albero virtuale	p. 63
4. Conclusioni	

4.1 Principali limiti	p. 65
4.2 Possibili migliorie	p. 68
Bibliografia	p. 71
Appendice	p. 73

## SOMMARIO

Oggetto di questa trattazione è lo studio della tecnica di controllo denominata *Electronic Line Shafting*, atta al controllo del moto coordinato in sistemi multi-asse.

In primis ci si focalizza sul concetto di camma elettronica, su come essa sostituisce gli accoppiamenti meccanici per il trasferimento di potenza e la generazione del moto coordinato. Si discute inoltre sull'importanza del sincronismo e sulle principali tecniche esistenti per il suo mantenimento.

L'attenzione si sposta quindi al reale oggetto della tesi: si descrivono i concetti generali che ne stanno alla base e il principio di funzionamento, le applicazioni teoriche e le simulazioni tratte dalla letteratura, gli esempi di realizzazione industriale.

Vengono condotte alcune simulazioni al calcolatore per verificare le reali prestazioni di tale tecnica – soprattutto in corrispondenza di situazioni non considerate in letteratura – e si discutono pregi e difetti, limiti e considerazioni per l'implementazione pratica.



## INTRODUZIONE

Nel settore manifatturiero odierno si assiste ad un continuo avanzamento dei sistemi elettronici a bordo dei macchinari, con risvolti notevoli in campo prestazionale ed economico.

La gran parte di essi ha da tempo abbandonato i tradizionali sistemi meccanici per la trasmissione del moto, come alberi, cinematismi, camme, cinghie, croci di malta. Questi ultimi sono spesso rimpiazzati da azionamenti elettrici controllati da dispositivi real-time, che si propongono di migliorare le performance offerte dalle precedenti realizzazioni.

E' questo l'esempio delle camme elettroniche, il cui compito risiede nella movimentazione di più assi in maniera sincrona senza che tra di essi vi sia un vincolo fisico. Come si vedrà in seguito, molti progressi sono stati fatti in termini energetici, progettuali, cinematici e dinamici grazie ad esse.

Vi è spesso la tendenza a considerare i sistemi meccanici obsoleti in toto, senza chiedersi realmente se le moderne controparti elettroniche sopperiscano realmente a tutte le funzioni dei primi. Alcune caratteristiche dei primi tuttavia non sono intrinseche delle camme elettroniche: un esempio è dato dalla capacità di trasmettere il moto coordinato, proprietà questa che risiede direttamente nella struttura fisica di essi.

Ci si concentrerà nel corso di questa trattazione su quest'ultimo aspetto, esaminando una tecnica di controllo ideata e proposta dal prof. Robert Lorenz dal nome di *Electronic Line Shafting*.

Trascurando in gran parte gli aspetti energetici – pure molto interessanti – verrà descritto con maggior cura l'ambito cinematico e dinamico di tale realizzazione, valutandone l'effettiva realizzabilità, pregi e difetti.

Si vuole sottolineare dunque come, a fronte di un continuo ed ingente avanzamento tecnologico, permane la necessità di chiedersi se, in quali casi e sotto quali ipotesi i sistemi moderni portino esclusivamente migliorie rispetto ai precedenti. In tal modo è possibile prevedere le loro possibili mancanze e colmarle, ove possibile, al fine di consolidarli e favorirne sviluppo e diffusione.



# CAPITOLO UNO

## SINCRONISMO E CAMME ELETTRONICHE

### 1.1 Sistemi multi-asse

Diffusissimi sono nell'industria gli esempi di macchinari con più assi: tra i più comuni macchine piegatrici, etichettatrici, imballatrici, stampanti industriali, macchine tessili. In tali sistemi il sincronismo del moto è spesso una necessità, talvolta solo in termini di velocità ma spesso anche in termini di posizione. Alcune tecniche di controllo garantiscono entrambe le richieste, altre soltanto la prima, producendo una differenza di posizione angolare tra gli assi.

La camma elettronica è una tecnica di controllo e pianificazione del moto applicabile ad un macchinario

con due o più assi, basata a sua volta – tra quelle esistenti per il sincronismo – sulla tecnica del “following”.

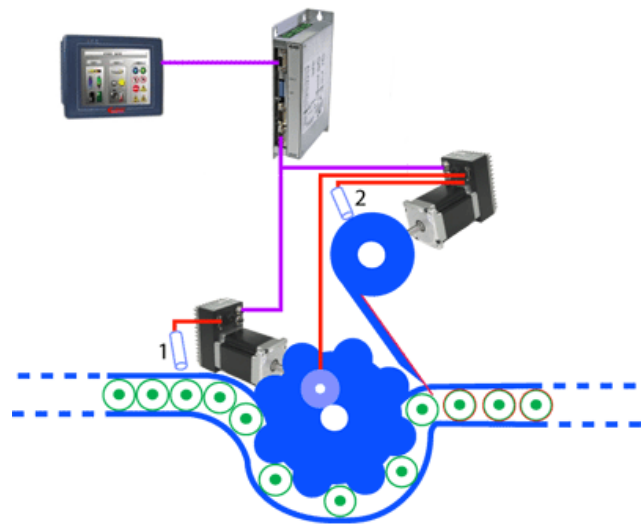


Fig. 1 - Etichettatrice realizzata con camme elettroniche (Everelettronica)

Si tratta essenzialmente di un azionamento elettrico atto a riprodurre una legge di moto – anche detta *motion plan* – prefissata, generalmente memorizzata in un processore. Da qui il nome che ricorda la versione meccanica: la funzione è infatti in molti casi la medesima anche se il principio è piuttosto differente.

Si compone innanzitutto di un asse “master”, che può essere virtuale o fisico – qualora sia movimentato da un motore come nella realizzazione meccanica tradizionale. Questo è l’asse di riferimento che, invece di porre in rotazione un elemento eccentrico calettato su di sé, fornisce il riferimento per il moto di un asse “slave”. Quest’ultimo rappresenta il cedente della versione meccanica, e il suo movimento avviene seguendo la legge di moto di cui sopra: è in tal modo funzione del movimento dell’asse master – talvolta del tempo<sup>1</sup> – ,

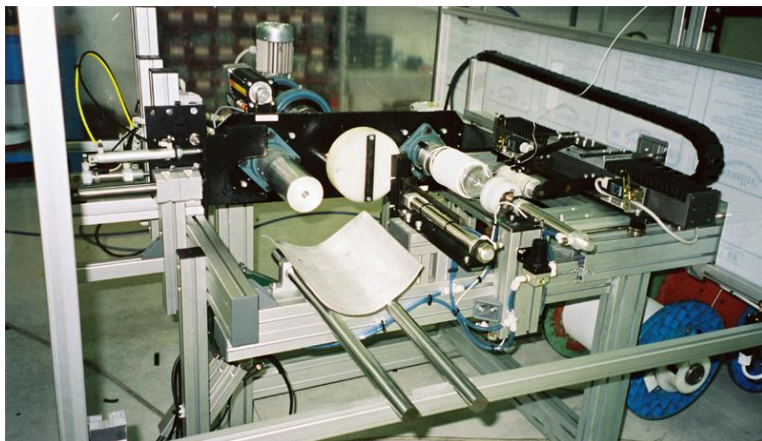


Fig. 2 - Camma elettronica di una bobinatrice (s.m.r.e. Engineering)

hoc il profilo dell’elemento eccentrico.

Tale funzione è definita in un’apposita tabella detta “cam table”, la quale rappresenta il diagramma delle alzate di una camma

meccanica. Essa realizza la relazione tra posizione assoluta – talvolta velocità – dell’asse master e dell’asse slave, ed è divisa in settori diversi che soddisfano le specifiche del processo, come accelerazione, velocità costante, decelerazione, arresto.

<sup>1</sup> K. C. Craig, *Mechatronics: trajectory planning with electronic cams* in [www.controleng.com](http://www.controleng.com), 2010

L'esecuzione del moto è regolata da un controllore – ad esempio un PID<sup>2</sup> – che sulla base del riferimento dell'asse master ne fornisce in uscita uno usato per pilotare il servomotore dell'asse slave.

I motori utilizzati sono del tipo sincro a magneti permanenti – detti anche *brushless sinusoidali* – caratterizzati solitamente da compattezza, eccellenti caratteristiche dinamiche, buona efficienza ed alto fattore di potenza, anche se leggermente più costosi degli altri e necessitanti il controllo in orientamento di campo.<sup>3</sup> Talvolta a valle di tali servomotori è presente un riduttore meccanico.

Nelle realizzazioni con più di due assi più slave seguono coordinatamente il master: in questo caso ciascuno di essi possiede un blocco logico che realizza la relazione che sarebbe stata definita – nella realizzazione meccanica – da componenti per il trasferimento di potenza come cinghie, ruote dentate, catene o altro.

Risulta evidente il vantaggio derivante dall'assenza di accoppiamento meccanico: non vi è bisogno di una sistematica manutenzione e vengono eliminati i problemi ad esso legati, come un calo del rendimento e in alcuni casi la maggiore rumorosità.<sup>4</sup> Vi sono inoltre meno masse in gioco – che comportano meno vibrazioni – e dimensioni di macchina ridotte<sup>5</sup>.

Le camme elettroniche occupano oggi una posizione di rilievo – e insostituibile – in campo industriale, principalmente grazie alle loro caratteristiche di flessibilità in esercizio.<sup>6</sup> Infatti per una modifica della legge di moto – a fronte di una modifica del processo, ad esempio del prodotto in questione – è sufficiente agire per via informatica sulla memoria del controllore che governa il servomotore dell'asse slave. Nella realizzazione meccanica un simile intervento avrebbe richiesto la sintesi di un nuovo profilo di camma, con tempi e costi significativamente superiori.

---

<sup>2</sup> R. Accomando, *Meccatronico è meglio* in *AutomazioneOggi*, p. 136

<sup>3</sup> M. Zigliotto, *Dispense del corso di Macchine ed Azionamenti Elettrici*, pp. 3-10

<sup>4</sup> K. C. Craig, *Mechatronics: trajectory planning with electronic cams* in *www.controleng.com*, 2010

<sup>5</sup> D. Richiedei, *Dispense del corso di Controllo dei Sistemi Meccanici: "Camme elettroniche"*, p. 4

<sup>6</sup> F. Viadero, M. Ceccarelli, *New Trends in Mechanisms and Machine Science*, p.290

In secondo luogo la progettazione con camme elettroniche è facilitata dalla presenza di software – spesso forniti dai sistemi industriali – di simulazione ed editor grafici. Questo risulta particolarmente utile in fase di modifica del processo – ad esempio dato dalla modifica del prodotto in questione oppure dalla modifica del ritmo di produzione – dal momento che velocizza di molto la sintesi della nuova legge di moto.

In ultima, grazie al controllo elettronico si ha la possibilità di gestire diverse funzioni e di ottenere un controllo del moto molto preciso, grazie all'interpolazione di migliaia di punti.<sup>7</sup>

D'altro canto le camme elettroniche presentano alcuni difetti: in primo luogo vi è la necessità di installare un servomotore per ciascun asse slave, quando nelle realizzazioni meccaniche era il solo attuatore dell'asse master a fornire la coppia necessaria alla rotazione di essi. E' indubbio che questo è uno svantaggio dal punto di vista degli ingombri e dei costi, ma non necessariamente da un punto di vista energetico: avendo eliminato gli accoppiamenti meccanici si sono ridotti i fattori dissipativi.

In secondo luogo è presente una limitazione nei valori di accelerazione possibili per l'asse slave: ciò deriva dal valore massimo di coppia erogabile dai servomotori e da limiti sulla banda passante del sistema. In alcuni casi infatti tale coppia erogata non è sufficiente a soddisfare le esigenze dell'installazione, e pare che questo problema non sia risolvibile nell'immediato futuro. Deriva infatti da un limite fisico dei magneti permanenti di cui sono costituiti i rotor dei motori in questione.<sup>8</sup> Il limite sulla banda passante è invece determinato dall'esigenza di limitare i transitori: i sistemi con banda passante limitata sono soggetti ad un funzionamento più regolare rispetto a quelli con larghezza di banda elevata.

---

<sup>7</sup> D. Richiedei, *Dispense del corso di Controllo dei Sistemi Meccanici: "Camme elettroniche"*, p. 4

<sup>8</sup> F. Viadero, M. Ceccarelli, *New Trends in Mechanisms and Machine Science*, p.290

## 1.2 Concetti generali sul sincronismo

Nei sistemi multi-asse il sincronismo è una specifica essenziale, in termini di velocità e posizione: si tratta di una condizione necessaria per il loro corretto funzionamento.

Si pensi ad un macchinario per la termosaldatura degli imballaggi in nylon: nel caso di perdita di sincronismo tra asse master ed asse slave si rischierebbe la collisione tra elemento termosaldante e prodotto da imballare, con possibile danneggiamento di entrambi. Nel caso di un meccanismo per la riempitura di contenitori di liquido – ad esempio bibite – la perdita di sincronismo tra asse master ed asse slave comporterebbe l'errato allineamento di ugelli e contenitori, e di conseguenza la caduta di liquido al suolo o sul macchinario.

Quando gli assi del macchinario sono più di due il problema si fa sentire ancor più pesantemente: infatti nel caso in cui uno degli assi slave perda il sincronismo, esso non solo diverrebbe scoordinato rispetto all'asse master, ma anche rispetto a tutti gli altri assi slave. Ciò potrebbe comportare conseguenze forse ancora peggiori del caso sopra citato.

Si prenda come esempio una macchina rotativa per l'editoria, avente diversi rulli – e quindi diversi assi. In caso di perdita di sincronismo di uno dei essi non solo si otterrebbe una stampa errata, ma si incorrerebbe nel problema della rottura della bobina di carta. Si renderebbe perciò necessario un fermo-macchina – operazione generalmente costosa – per ristabilire le condizioni di operatività della stampante.

Volendo progettare tali sistemi con camme elettroniche va tenuto in considerazione un aspetto fondamentale: nelle comuni realizzazioni con sistema *Master Slave*, se l'asse slave subisce un'alterazione del proprio moto – dovuto ad esempio ad una variazione del carico, o dell'inerzia, o dell'attrito – l'asse master non ne ha riscontro in catena aperta. Tale problematica costituisce il

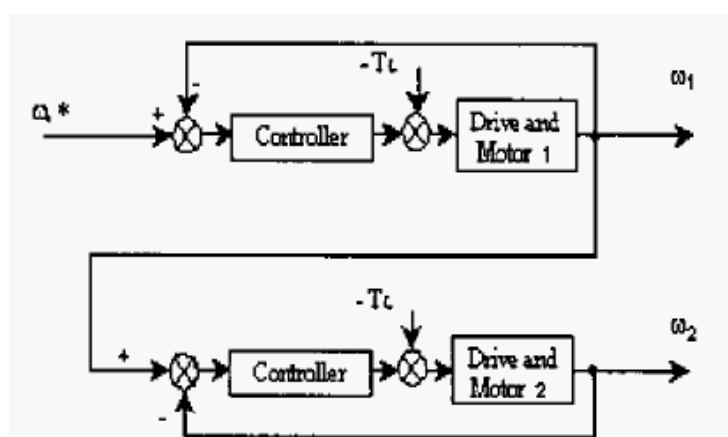


Fig. 3 - Schema a blocchi della tecnica di controllo Master Slave, applicata ad un sistema a due assi

principale limite di questo primo sistema di controllo, che si trova peraltro ad essere il più semplice (Fig. 3). Risulta dunque attuabile soltanto in installazioni ove non vi siano disturbi agenti sugli assi slave, dal momento che nelle situazioni suddette non può essere garantito. In applicazioni più elaborate – ove il sincronismo debba esser garantito anche in presenza di disturbi sull'asse slave – è necessario adottare tecniche di controllo più sofisticate. Ciò in modo tale da assicurare la modifica della velocità di rotazione dell'asse master a fronte di una modifica del moto dell'asse slave, così da preservare tale sincronismo.

Alcuni sistemi di controllo sono stati studiati al fine di superare questa limitazione: tra questi si ricordano le tecniche del *Cross Coupling*, dell'*Electronic Line Shafting* e del *Relative Coupling*.

### 1.2.1 Tecniche per il sincronismo: *Cross Coupling*

Il *Cross Coupling* (Fig. 4) si distingue dal sistema *Master Slave* per la presenza di un ramo di retroazione in comune a più assi, in cui il segnale di feedback è prodotto dalla differenza delle velocità o delle posizioni dei due assi suddetti. Tale accorgimento consente, data una variazione di carico vista da un asse, di riportarla anche all'altro. È possibile ottenere in tal modo un buon sincronismo tra i due – previo un adeguato valore, e solitamente molto alto, dei guadagni  $k_1$  e  $k_2$ <sup>9</sup>.

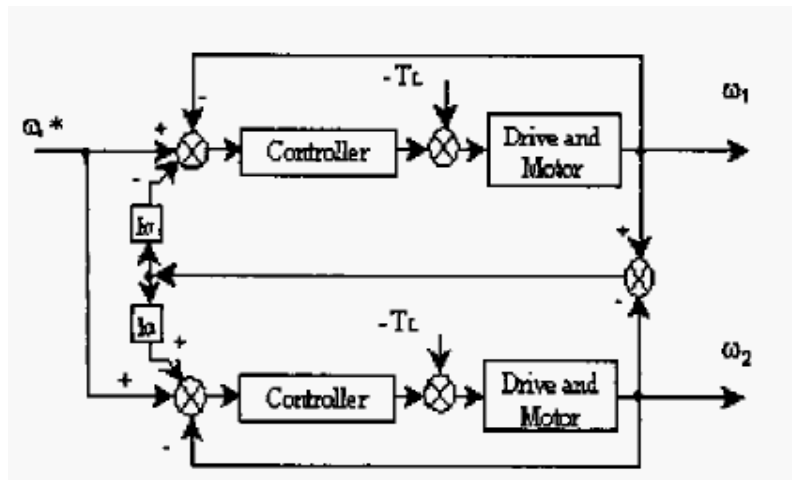


Fig. 4 - Schema a blocchi della tecnica di controllo *Cross Coupling*, applicata ad un sistema a due assi nel caso di legge di moto identica per entrambi

### 1.2.2 Tecniche per il sincronismo: *Electronic Line Shafting*

La tecnica dell'*Electronic Line Shafting* – o più precisamente *Electronic Virtual Line Shafting*, *EVLS* – si propone di mantenere il sincronismo tra gli assi mediante l'introduzione di un albero virtuale (Fig. 5), il quale riproduca il comportamento dinamico di quello meccanico di interconnessione proprio delle realizzazioni tradizionali.

<sup>9</sup> Alvarez et al., *Comparison of Multi-motor Synchronization Techniques*, p. 1671

Un controllore fornisce un riferimento di velocità per gli assi, il quale poi viene integrato per ottenere anche un riferimento di posizione. La particolarità di tale sistema risiede nella presenza di un ramo di retroazione in ingresso all'albero virtuale, il quale riporta - sottraendolo rispetto al riferimento di velocità del master - un segnale di feedback dato dalla somma dei valori di coppia erogata dai motori degli assi slave.

In tal modo si ottengono delle buone performance in termini di sincronismo, specialmente nelle situazioni di variazione del carico applicato ad uno qualsiasi dei motori. Inoltre tale tecnica non pone un limite intrinseco al numero degli assi controllabili.

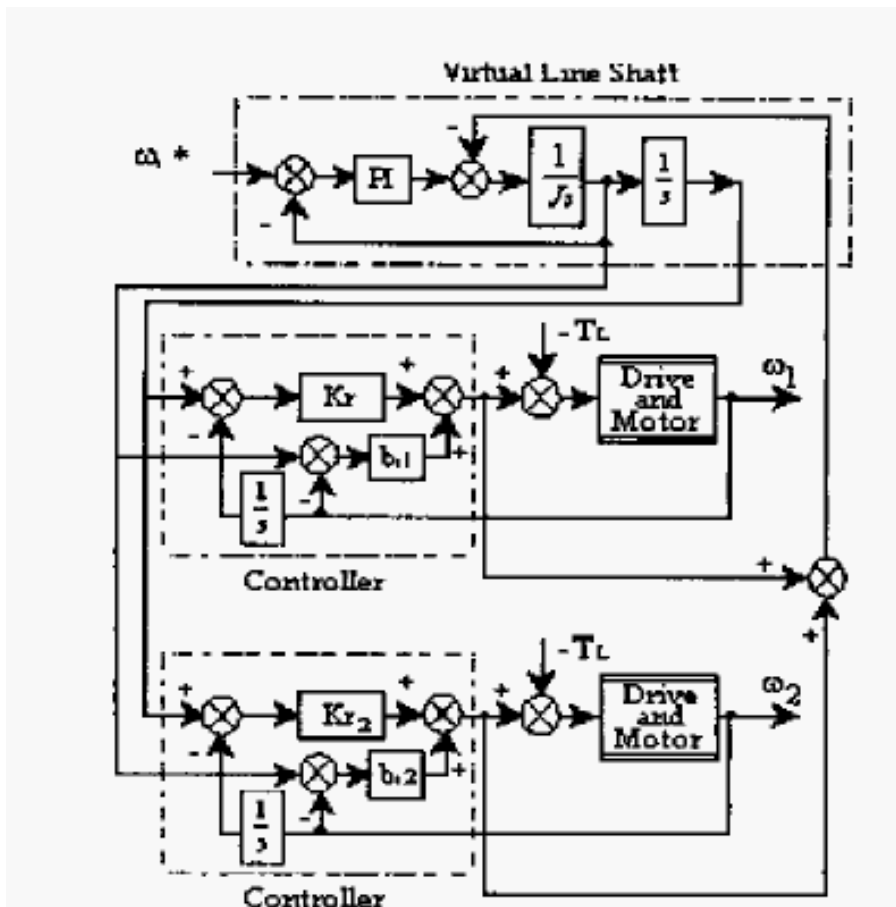


Fig. 5 - Schema a blocchi della tecnica di controllo *Electronic Line Shafting*, applicata ad un sistema a due assi nel caso di legge di moto identica per entrambi



1.2.3 Tecniche per il sincronismo: *Relative Coupling*

L'ultima tecnica qui presa in considerazione è quella del *Relative Coupling*. Differisce dalla precedente in quanto non è presente l'albero virtuale, bensì un blocco "velocità relativa" per ogni asse slave. Tale blocco computa la differenza tra le loro velocità angolari e la sottrae, assieme alla velocità dell'asse stesso - al riferimento di velocità del master. Viene in tal modo implementato il concetto di fondo di tale tecnica, ossia quello del momento d'inerzia relativo "visto" da ciascun asse.

Per fare ciò ci si avvale (Fig. 6) di un multiplexer che accetta come input il riferimento di velocità dell'asse master e i due segnali di velocità degli assi slave, li riportati attraverso due rami di retroazione. Per ciascuno di essi è inoltre necessario un demultiplexer, per estrarre i tre segnali distinti, e del blocco "velocità relativa" per il calcolo della differenza di velocità.

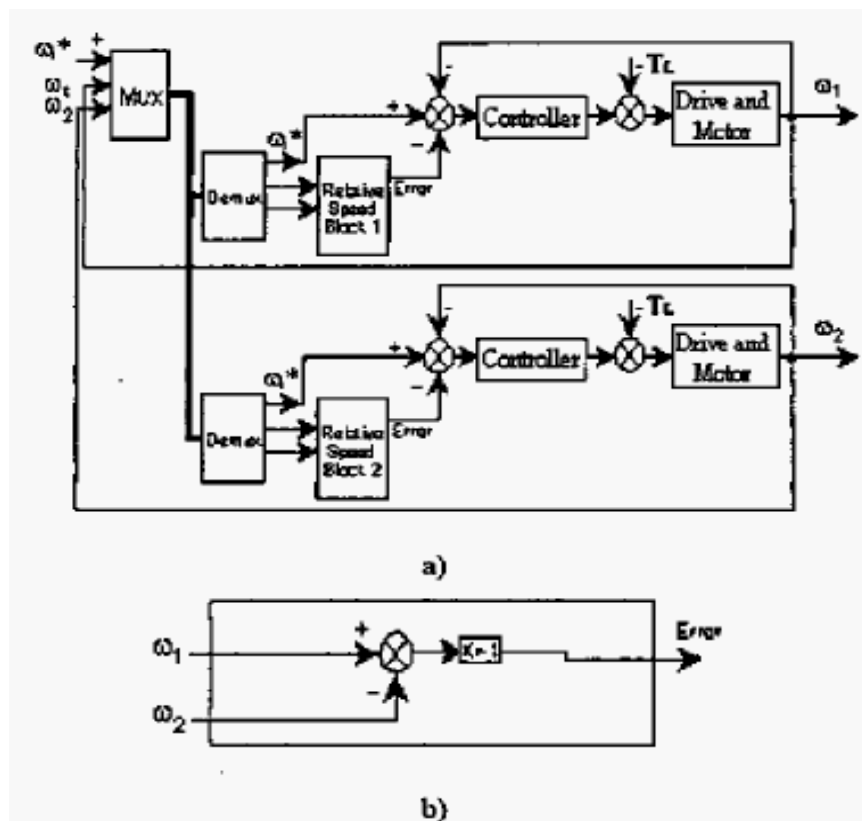


Fig. 6 - Schema a blocchi della tecnica di controllo Relative Coupling, applicata ad un sistema a due assi nel caso di legge di moto identica per entrambi

In tal modo se uno degli assi slave subisce un rallentamento – ad esempio a causa di un aumento della coppia di carico – il blocco “velocità relativa” di tale asse produrrà un segnale di errore minore, mentre maggiore sarà lo stesso segnale sull’altro. Al controllore dell’asse rallentato giungerà pertanto un riferimento di velocità superiore a quello precedente il rallentamento, dal momento che i termini della sottrazione a monte di esso sono diminuiti.

Al controllore dell’altro asse giungerà invece un riferimento di velocità minore, in quanto il segnale di errore sottraendo è cresciuto e che l’altro – la velocità dell’asse stesso – è rimasto invariato. In tal modo viene ristabilito rapidamente il sincronismo, a fronte tuttavia di una certa complessità del sistema risultante. Infatti anche tale metodo – come l’*Electronic Line Shafting* – è potenzialmente espandibile ad un numero ingente di assi slave, ma la complessità sarebbe enorme.

Di tali tecniche soltanto la seconda verrà trattata nel seguito, dal momento che rappresenta il miglior compromesso tra realizzabilità, semplicità e prestazioni. Infatti – posto che il semplice sistema *Master Slave* è insufficiente per molte applicazioni – la tecnica del *Cross Coupling* offre la maggior semplicità e un buon sincronismo di velocità, ma al contempo le peggiori prestazioni per quanto riguarda lo stesso obiettivo in termini di posizione. Inoltre, come suddetto, non è chiaro come si potrebbe estendere la tecnica ad un numero di assi superiore a due.

D’altra parte la tecnica del *Relative Coupling* le migliori performance per quanto riguarda il sincronismo di velocità e posizione, ma al contempo la maggior complessità.

L’*Electronic Line Shafting* offre le migliori performance in termini di sincronismo ma un angolo relativo tra gli assi che non viene corretto fino alla successiva variazione del carico. Trovandosi ad essere però il miglior *trade-off* tra le caratteristiche d’interesse, è la tecnica che ha riscosso maggior successo.

Tale aspetto sarà trattato in maniera più estesa nel prossimo capitolo, assieme ad una dettagliata descrizione di tale sistema di controllo e ad alcuni esempi di implementazione da parte di produttori industriali.

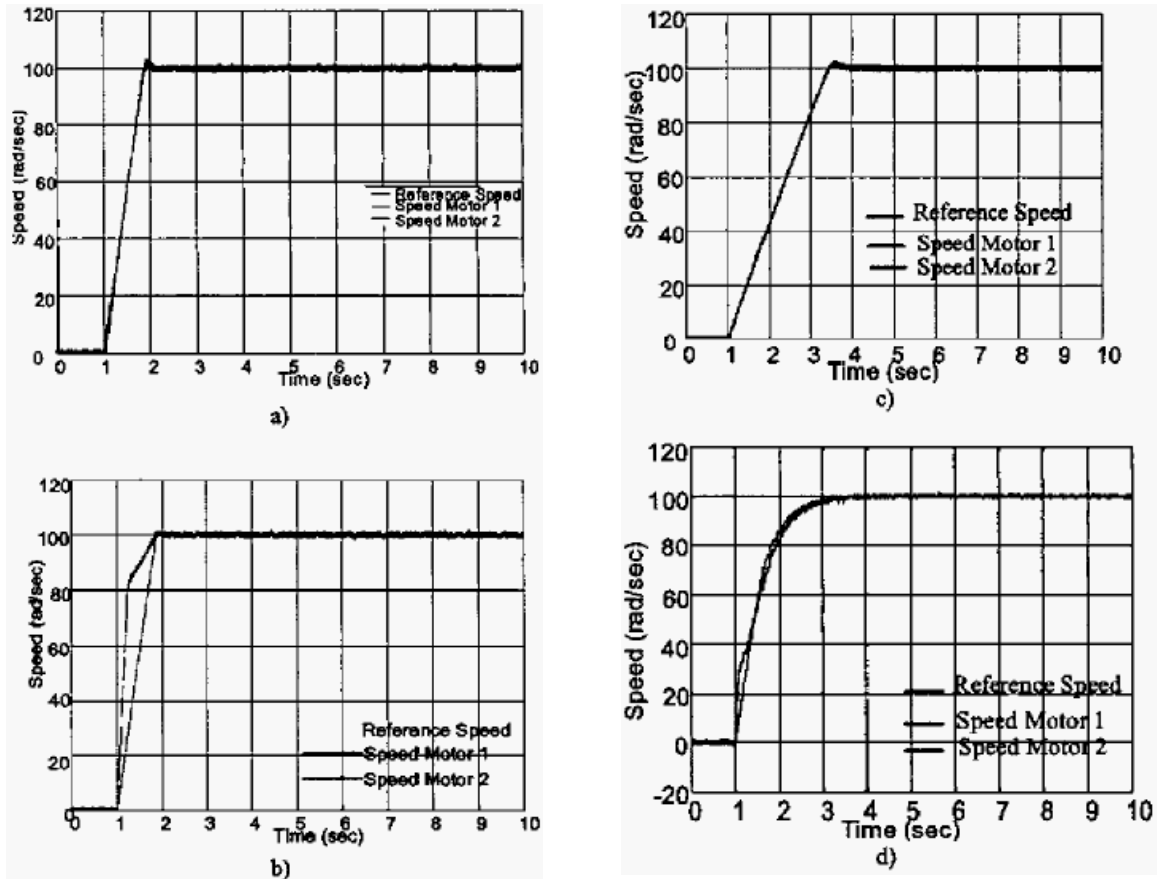


Fig. 7 - Risposta in transitorio con le quattro tecniche espote, in ordine

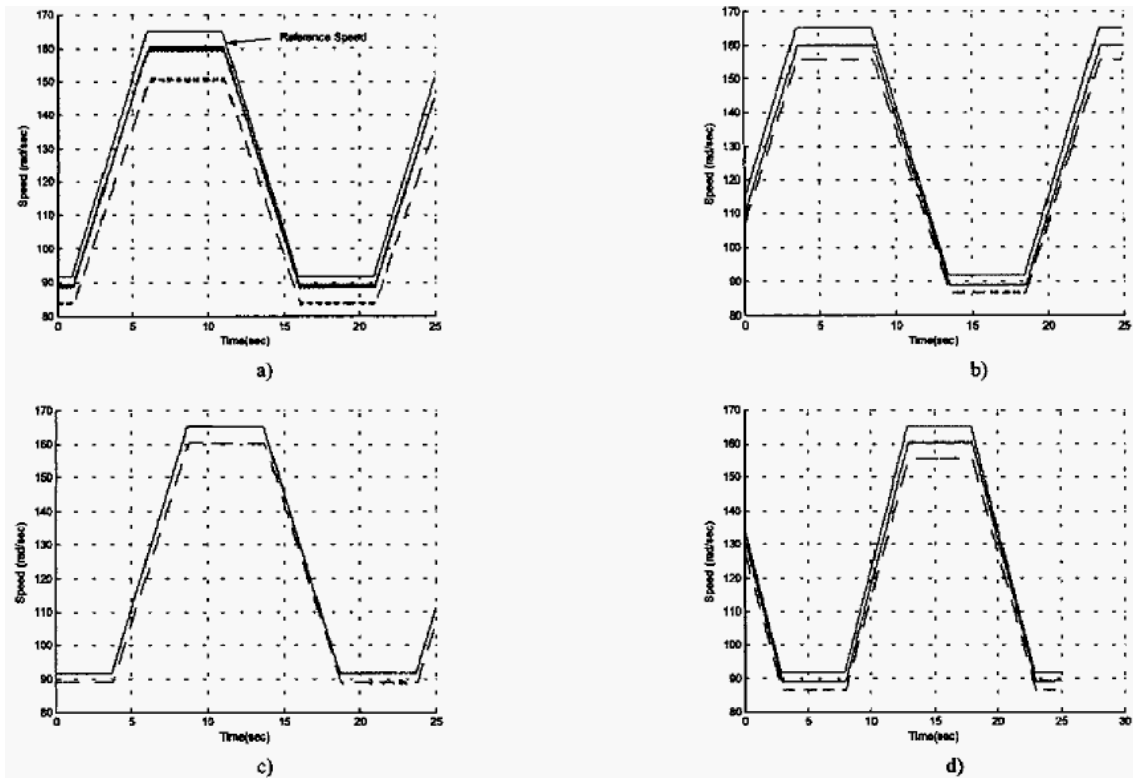


Fig. 8 - Risposta ad una collisione del motore uno con le quattro tecniche espote, in ordine

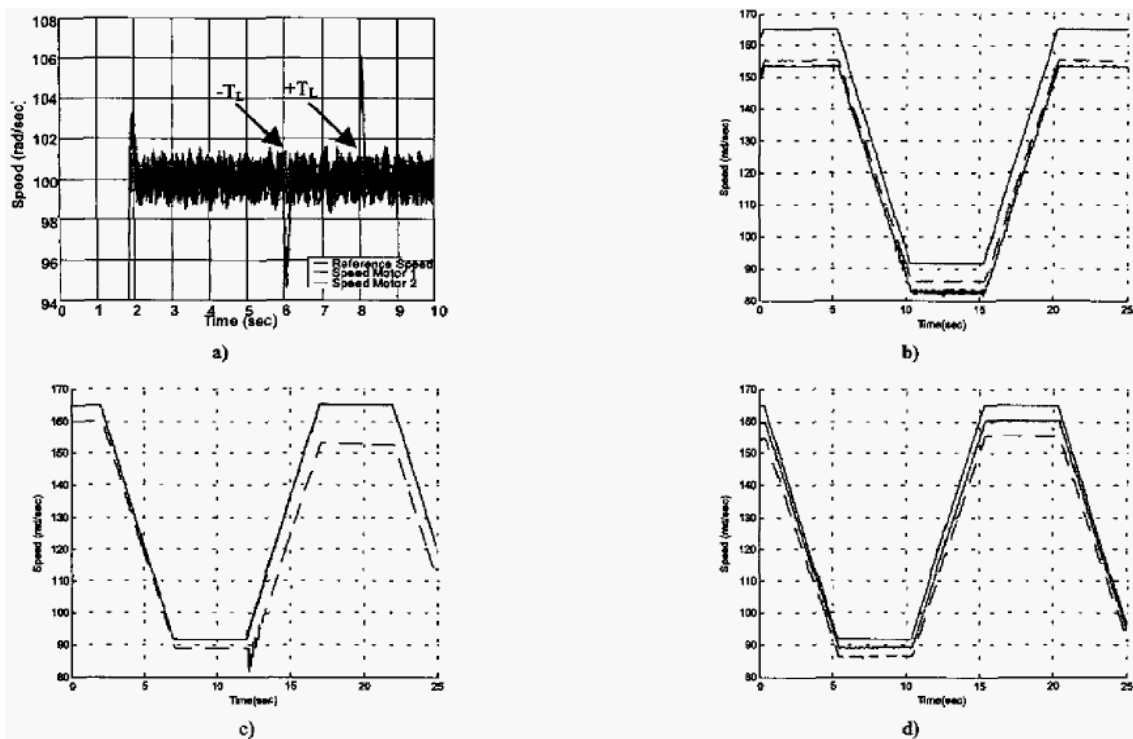


Fig. 8 - Risposta ad una collisione del motore due con le quattro tecniche espote, in ordine

## CAPITOLO DUE

# ELECTRONIC LINE SHAFTING

### 2.1 *Electronic Line Shafting* in letteratura

La tecnica dell'*Electronic Line Shafting* fu un primo momento ideata dal professor Robert D. Lorenz (Departments of Mechanical and Electrical Engineering, University of Winconsin) e dal professor M. Anibal Valenzuela (Department Electronic Engineering, University of Concepción).

Essa nasceva dall'intento di garantire un accurato moto coordinato in sistemi multi-asse affinando la tecnica delle camme elettroniche al posto dell'utilizzo di organi meccanici per il trasferimento di potenza e la generazione del moto coordinato.

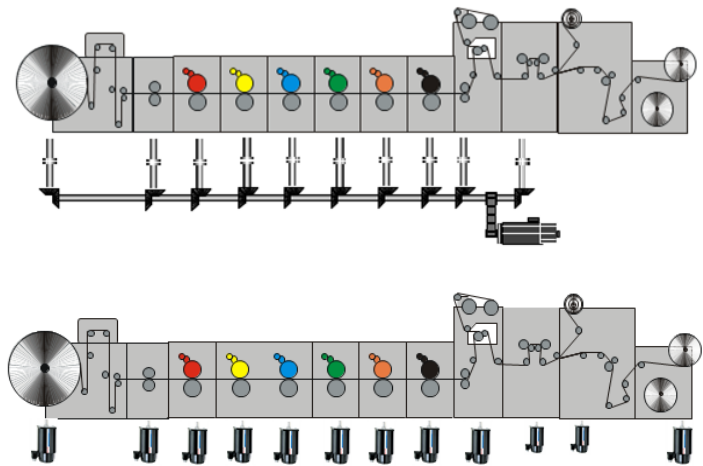


Fig. 9 - Schema di una macchina per la stampa a sei colori – sei assi – con albero meccanico (sopra) ed *Electronic Line Shafting* (sotto)

L'idea era quella di

progettare un sistema di controllo elettronico che emulasse le caratteristiche dell'accoppiamento meccanico di interconnessione dal punto di vista del sincronismo, migliorandone ove possibile le prestazioni dinamiche. La strategia

scelta per attuare ciò fu la realizzazione di un albero virtuale che riproducesse il comportamento dinamico di uno fisico.

Esso viene controllato in velocità e genera un riferimento di velocità e posizione per gli assi del sistema e accetta in ingresso la somma dei valori di coppia erogata dal motore di ciascun asse. A fronte di una modifica del moto di un asse il valore di coppia appena citato si modifica: si modifica di conseguenza il valore del segnale di feedback in ingresso all'albero virtuale.

Esso è caratterizzato da parametri inerziali e viscosi – seppur fittizi – al pari di un albero meccanico, vale infatti la relazione:

$$\tau_m^{VS} - \sum_i \tau_{m,i} = J^{VS} \cdot \theta^{\ddot{VS}}$$

dalla quale si nota l'analogia con un albero fisico. Vale inoltre, per il controllo di velocità:

$$\tau_m^{VS} = k_p \cdot (\omega_{ref}^{VS} - \omega^{VS}) + \frac{k_p}{T_i} \cdot \int (\omega_{ref}^{VS} - \omega^{VS}) dt$$

dalla quale risulta immediato intuire che si tratta di controllo proporzionale-integrale.

Nello schema più generale (fig. 2) è evidenziato il ruolo di controllo del sincronismo dell'albero virtuale: mediante la propria inerzia tende a dare un unico riferimento a tutti gli assi. Allorché vi sia un disturbo su di uno di essi, si dimostra ricettivo grazie al feedback di coppia e impone una modifica del moto a tutti gli altri allo scopo di mantenere il sincronismo.

I principali pregi dell'albero meccanico sono la solidità e l'affidabilità, unite ad una maggior familiarità degli operatori con tale tipo di tecnologia. Quest'ultimo aspetto si fa sentire particolarmente in fase di manutenzione oppure di rottura.

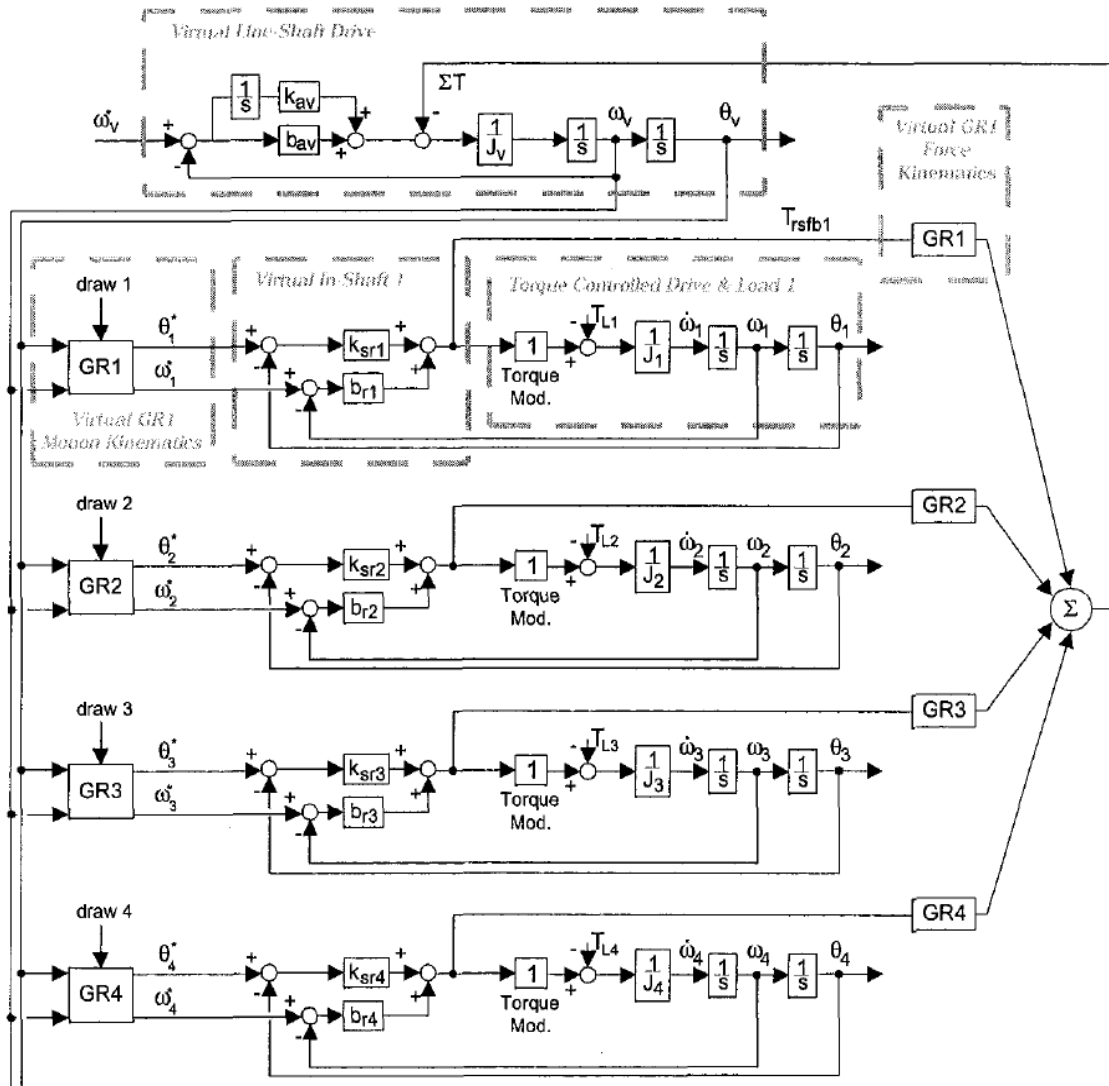


Fig. 2- Schema a blocchi dell'*Electronic Line Shifting* per un sistema a quattro assi

Tuttavia tale realizzazione ha due principali difetti intrinseci: da una parte l'assoluta inflessibilità in esercizio, dall'altra l'usura dei componenti. In un contesto industriale ove la richiesta da parte della clientela è spesso di piccole e veloci produzioni e di ridotti tempi di cambio di formato, i sistemi con albero meccanico risultano obsoleti. D'altra parte il maggior numero di componenti meccanici in movimento aumenta i costi di manutenzione e la probabilità di rotture, assieme alla potenza dissipata negli organi di trasmissione.

In ultima, la presenza dell'albero meccanico funge da via preferenziale per la propagazione dei disturbi – generalmente di coppia o di forza – tra i vari assi,

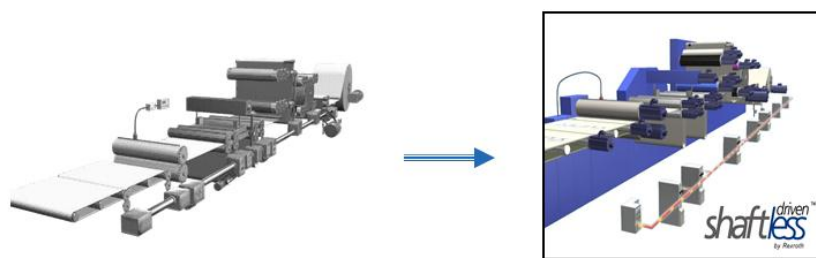


Fig. 3 - Sostituzione dell'accoppiamento meccanico (albero di interconnessione) con l'*Electronic Line Shafting*

con effetti non indifferenti sulla qualità del loro moto. Ad essi si aggiungono gli

errori dovuti alle tolleranze di

fabbricazione dei vari componenti meccanici, che si trasmettono lungo l'albero: un gioco inferiore ad un grado in un riduttore, ad esempio, può risultare in un'impresione notevole nel processo.

I benefici derivanti dall'adozione dell'*Electronic Line Shafting* sono numerosi: oltre ai già citati pregi delle camme elettroniche (flessibilità, riduzione delle masse, degli ingombri, della rumorosità, delle vibrazioni, della manutenzione, aumento del rendimento) vengono risolte agilmente le problematiche sopra elencate.

### 2.1.1 Applicazione in macchina cartiera<sup>10</sup>

Una delle applicazioni di spicco della tecnica ideata dal professor Lorenz è la pianificazione ed il controllo del moto in macchinari per la produzione carta. Essi non possedevano infatti generalmente dei dispositivi di controllo in grado di replicare le proprietà di rigidità di un albero meccanico, con conseguenze sull'accuratezza del moto e del sincronismo in particolare. In particolare, se tali proprietà vengono a mancare si incorre nei seguenti problemi:

- Rottura della carta
- Spessore del foglio non costante

<sup>10</sup> R. D. Lorenz, M. A. Valenzuela, *Electronic Line-Shafting Control for Paper Machine Drives*, pp. 158-164



- Qualità della carta scadente

Ciò porterebbe a dei fermo-macchina o all'eliminazione di una bobina di carta insoddisfacente, o peggio ancora ad entrambe le cose. In ogni caso i costi derivanti da tali inconvenienti – sia in termini economici che organizzativi – non sarebbero trascurabili.

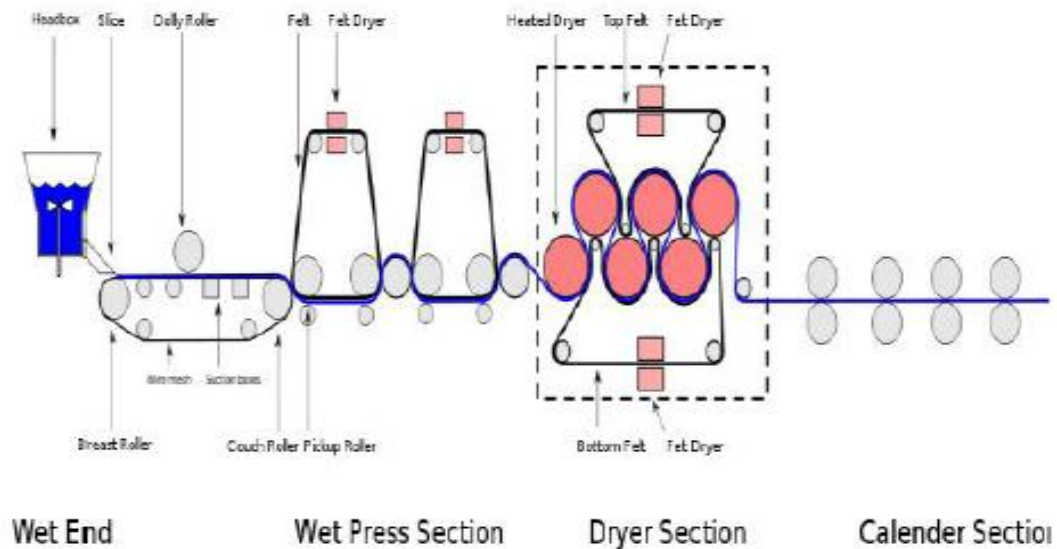


Fig. 10 - Schema di una macchina cartiera

Il processo di produzione della carta è composto di diversi stadi: inizialmente il composto cellulosico viene versato su di una tela che trattiene le fibre, drenando l'acqua in eccesso. Quello che diventerà il foglio viene ottenuto pressando il prodotto del primo stadio, cosicché le fibre leghino tra di loro. Successivamente esso viene essiccato attraverso il passaggio a contatto con rulli a temperatura elevata ed avvolto in una bobina.

Focalizzandosi sugli aspetti cinematici di tale operazione, lasciando perdere i processi chimici e termodinamici in essa presenti, si nota che un discreto numero di assi necessitano di ruotare in maniera sincrona per il trascinamento del prodotto. Non solo: gli appositi rulli non presentano tutti il medesimo diametro, quindi a parità di velocità tangenziale – condizione per il corretto

trascinamento – le velocità angolari risulteranno differenti tra rulli di differente raggio.

Inizialmente tali macchinari utilizzavano un sistema di distribuzione di tipo meccanico, che prevedeva la presenza di un albero di linea per la trasmissione del moto agli assi. Tale trasferimento di potenza veniva attuato, per ogni asse, solitamente mediante cinghie e pulegge o coppie coniche. A valle di ciò era presente un riduttore meccanico, sempre uno per ogni asse, atto a realizzare il rapporto tra le velocità definito dal progettista.

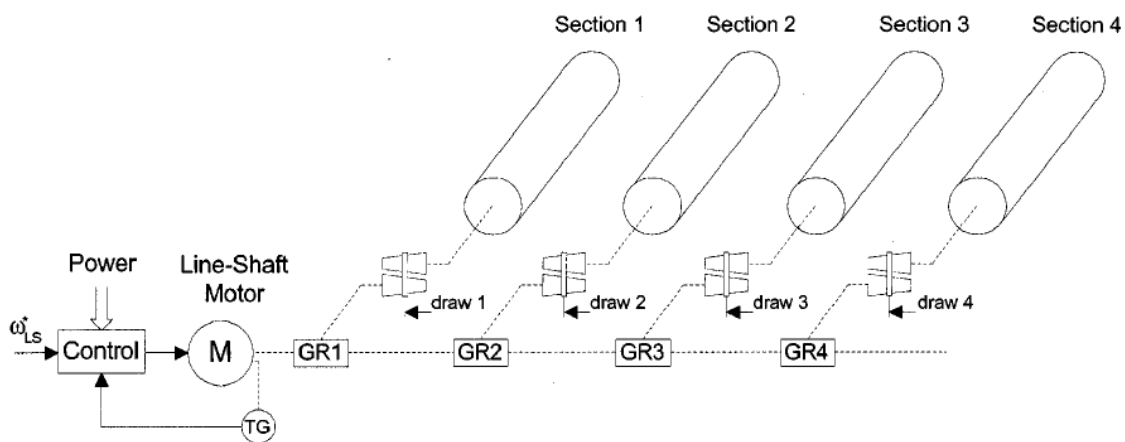


Fig. 11 - Schema di un macchinario con albero di linea

In tale modo – assumendo che la cinghia operasse in condizioni ottimali – ogni asse era solidale all'albero di linea, e di conseguenza a tutti gli altri. L'unico movimento relativo concesso era pertanto generato dall'elasticità torsionale dell'albero.

Volendo eliminare l'albero fisico, si nota che esso è schematizzabile come un riferimento di velocità ( $\omega$ ) e posizione angolare ( $\theta$ ) "master" per gli assi. Ognuno di essi viene movimentato da un proprio motore, il quale opera sotto la direzione di un controllore che accetta in input il riferimento per il moto.

Tale controllore prende il posto del riduttore meccanico, in quanto stabilisce il riferimento di coppia – e/o velocità – per il motore a partire da quello

proveniente dall'albero "elettronico". Anche la coppia cinghia-puleggia viene eliminata, tuttavia la sua funzione non è rimpiazzata per altre vie: il motore è accoppiato direttamente – o tramite riduzione – sull'asse da movimentare.

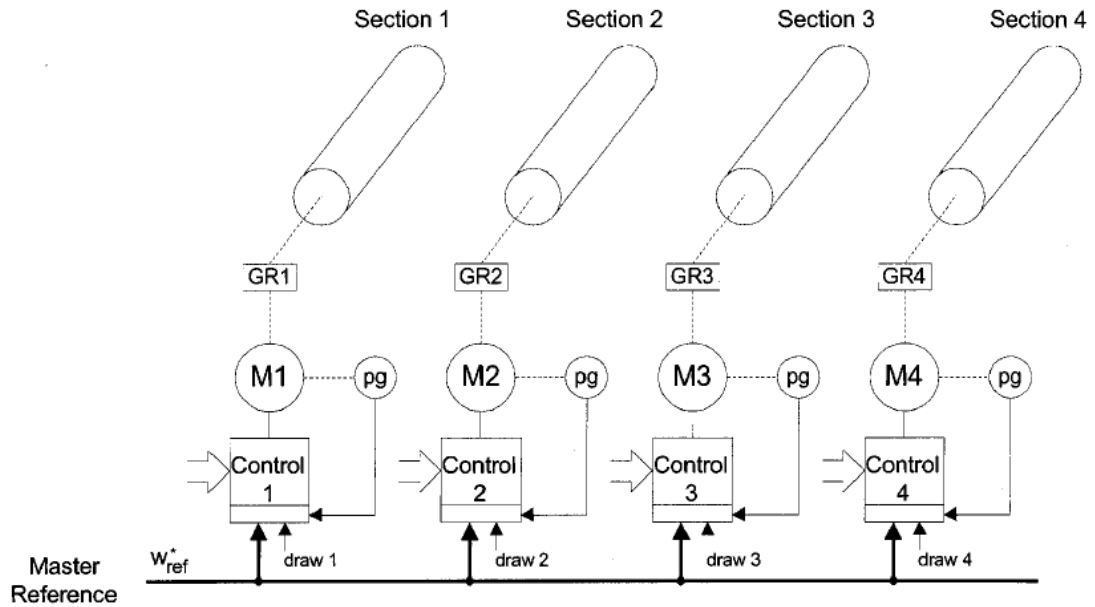


Fig. 12 - Schema di un macchinario con *Electronic Line Shafing*

Così facendo sicuramente si sono ottenuti dei vantaggi – di fatto si è realizzata una camma elettronica ove prima vi era un meccanismo – ma pure dei difetti, rispetto all'applicazione tradizionale.

Gli assi del macchinario sono sincronizzati elettronicamente rispetto all'asse master, che in questo caso è virtuale. Se esso subisce un rallentamento, quest'ultimo viene trasferito a tutti gli assi fintanto che il riferimento "master" non torna al suo valore nominale.

Tuttavia fin qui non si è risolto il problema principale del sistema *Master Slave*: se uno degli assi subisce un'alterazione del proprio moto, risulta sordinato sia rispetto a tutti gli altri sia al master. Si incorre dunque in una delle problematiche precedentemente elencate.

Mediante l'adozione dell'*Electronic Line Shafting* è possibile mantenere il sincronismo tra gli assi quand'anche siano essi stessi a subire un'alterazione del moto – non necessariamente il master. In particolare i benefici di tale tecnica – trascurabili a regime nominale – si fanno sentire durante i transitori: all'accensione e allo spegnimento del macchinario e a fronte di una variazione del carico (in senso generalizzato: inerzia e attrito).

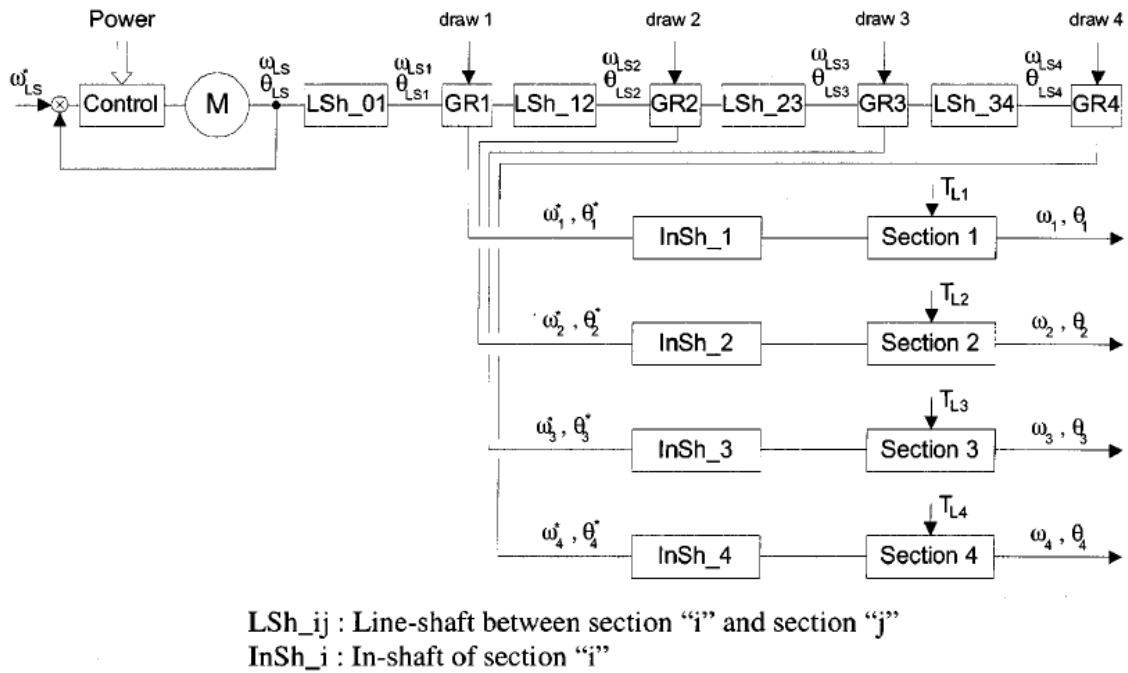


Fig. 13 - Schema a blocchi di una macchina cartiera a quattro assi con *Electronic Line Shafting*

Mediante l'applicazione di tale sistema il controllo del moto non avviene più sulla linea di trasmissione – come nel caso della versione ad albero meccanico – bensì per ogni asse, con benefici notevoli.

In primo luogo si evidenzia come il controllo di coppia e velocità di ogni singolo asse migliori la prontezza di risposta alla variazione dei carichi da parte dell'asse stesso. Inoltre permette di creare degli alberi – tramite un'adeguata sintonizzazione dei controllori – elettronici ben smorzati. Essi in tal modo non creano problemi di risonanza e forniscono intrinsecamente buone performance dinamiche.

L'assenza dell'albero fisico di linea elimina dal progetto due condizioni al contorno, che diventano ora parametri scelti dal progettista: il momento d'inerzia ( $J$ ) e l'attrito viscoso ( $b$ ). Essi possono essere variati a piacere al fine di ottenere le specifiche desiderate in termini di dinamica: si possono ottenere dinamiche più o meno smorzate, cosa che nel caso fisico non è possibile. Il tutto senza potenza meccanica dissipata, altro traguardo irraggiungibile per le realizzazioni fisiche.

Questi accorgimenti portano ad un significativo progresso nella tecnologia delle macchine cartiere: mediante l'adozione dell'*Electronic Line Shafting* diminuiscono drasticamente le rotture della carta e migliora la qualità del foglio. Questo proprio perché il sincronismo tra gli assi non viene mai meno.

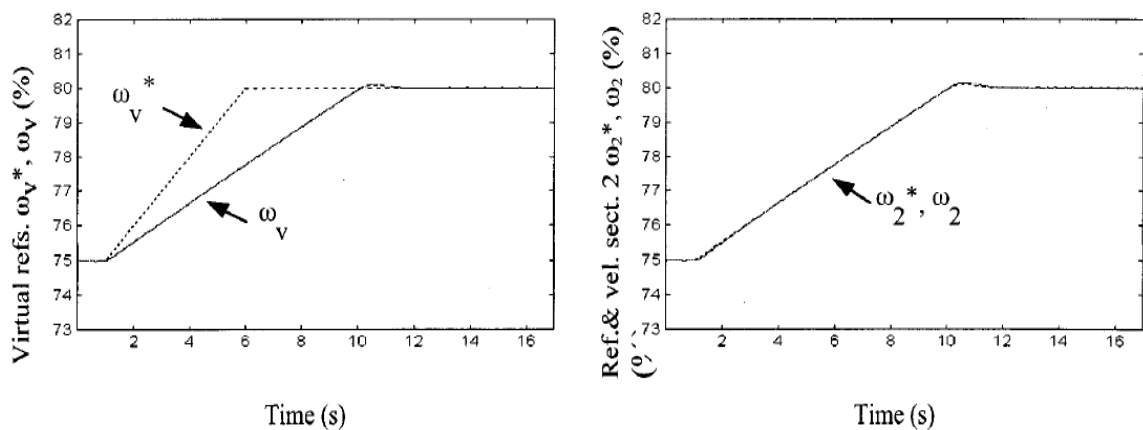


Fig. 14 - Risposta ad una limitazione di coppia dell'asse slave durante accelerazione con Electronic Line Shafting

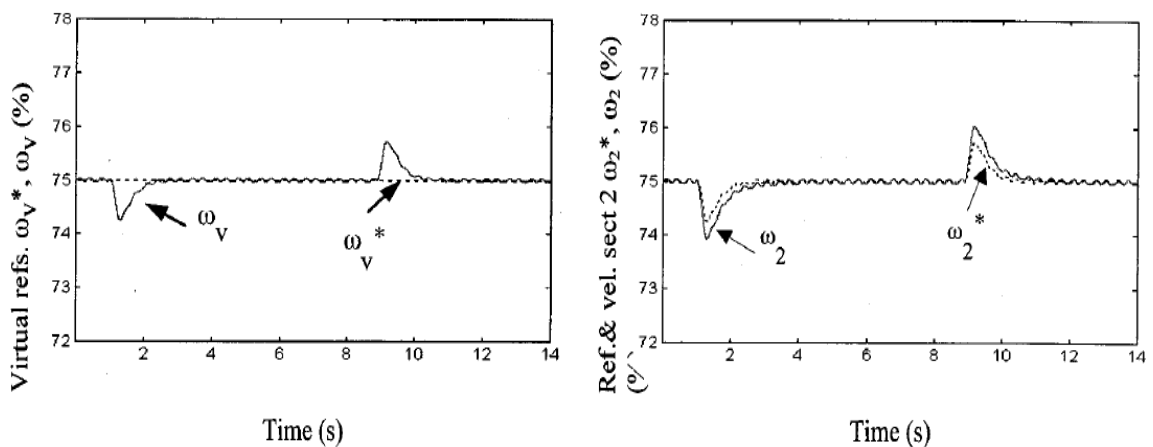


Fig. 15 - Risposta ad un disturbo a gradino sull'asse slave (a regime) con Electronic Line Shafting

## 2.1.2 Applicazione in macchina tessile<sup>11</sup>

La tecnica finora descritta è stata per la prima volta applicata a macchinari industriali nell'ambito del settore tessile. In particolare i proff. Anderson, Lorenz, Myers e Valenzuela ne simulano l'implementazione su di un macchinario per l'avvolgimento del filato a cinque assi. In particolare viene analizzato il comportamento di un sistema siffatto in diverse situazioni:

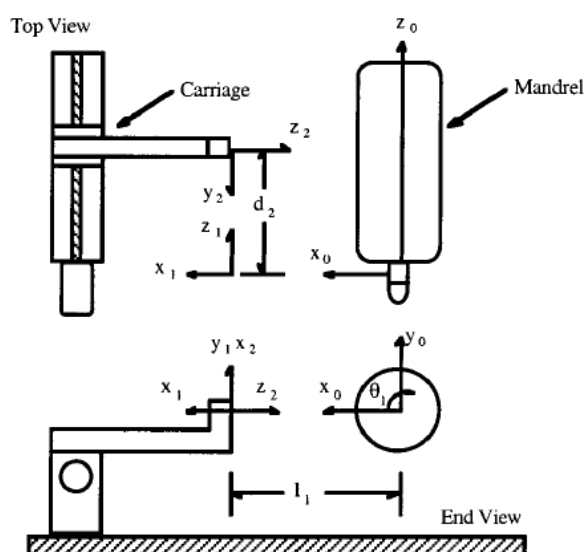


Fig. 16 - Schema di un asse di un macchinario per l'incannatura

- Saturazione della coppia
- Saturazione della velocità
- Disturbi indotti da condizioni di carico asimmetrico

Prima dell'ideazione e dell'applicazione della tecnica qui discussa tali macchinari utilizzavano sistemi unicamente meccanici per la trasmissione del moto. Come nel caso delle cartiere, un solo albero di linea era investito del compito di trasmettere la coppia motrice e garantire la coordinazione del moto.

Oggi, a fronte di una tecnologia in campo elettronico disponibile in larga misura e dalle notevoli prestazioni, si cerca di ricorrere sempre meno a componenti meccanici. Ricordando i benefici derivanti dall'eliminazione dell'albero fisico, ci si accorge tuttavia che le proprietà di sincronismo così raggiungibili non sono replicabili con i sistemi di controllo sincrono *Master Slave*.

<sup>11</sup> R. D. Lorenz et al., *Web Machine Coordinated Motion Control via Electronic Line-Shafting*, pp. 247-254

Le macchine tessili in generale presentano cinematiche variabili, realizzate tradizionalmente mediante meccanismi o camme. Qui si prende in considerazione l'inserimento di una camma virtuale: grazie ad essa viene ad essere facile la pianificazione del moto, dal momento che i segnali di stato del riferimento "master" vengono mappati nella traiettoria degli assi "follower".

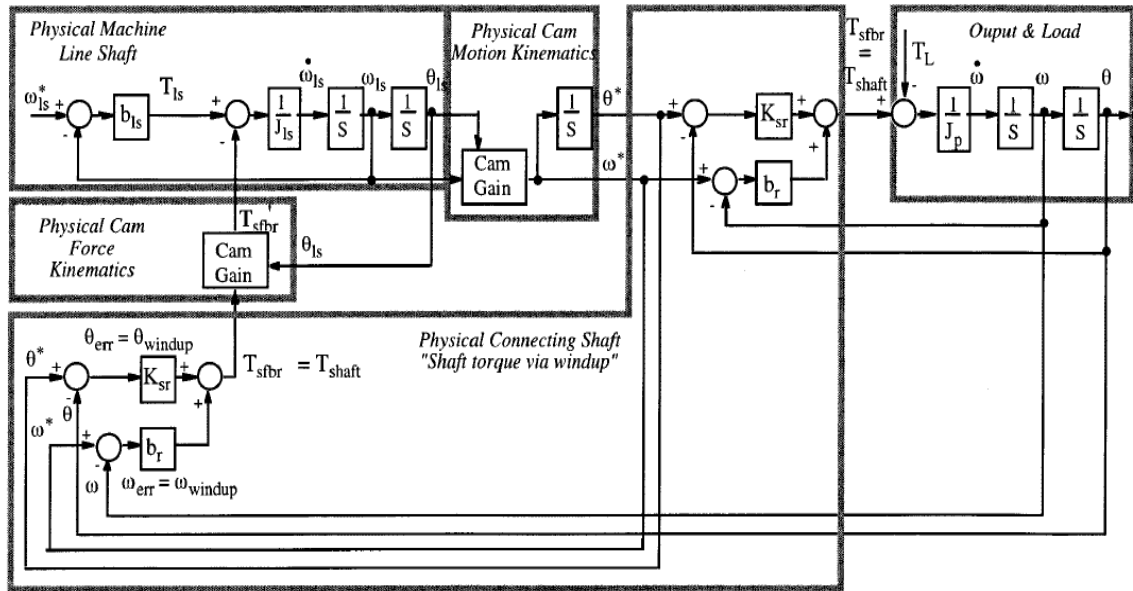


Fig. 17 - Schema a blocchi di un sistema movente-cedente azionato da albero di linea

L'albero fisico è ancora schematizzabile come riferimento di velocità ( $\omega$ ) e posizione ( $\theta$ ) angolari che include termini di smorzamento e rigidezza: la coppia trasferita agli assi è proporzionale ad essi. Il modello sfrutta sia la cinematica diretta che quella inversa del moto, entrambe implementate nella cosiddetta *cam table*.

Anche in questo caso, dato che l'albero di linea è virtuale, la sua inerzia e il suo attrito viscoso sono parametri di progetto anziché condizioni al contorno. Un grande vantaggio che si ottiene rispetto alla versione meccanica è quello di poter includere un parametro di smorzamento senza incorrere in dissipazioni di potenza.

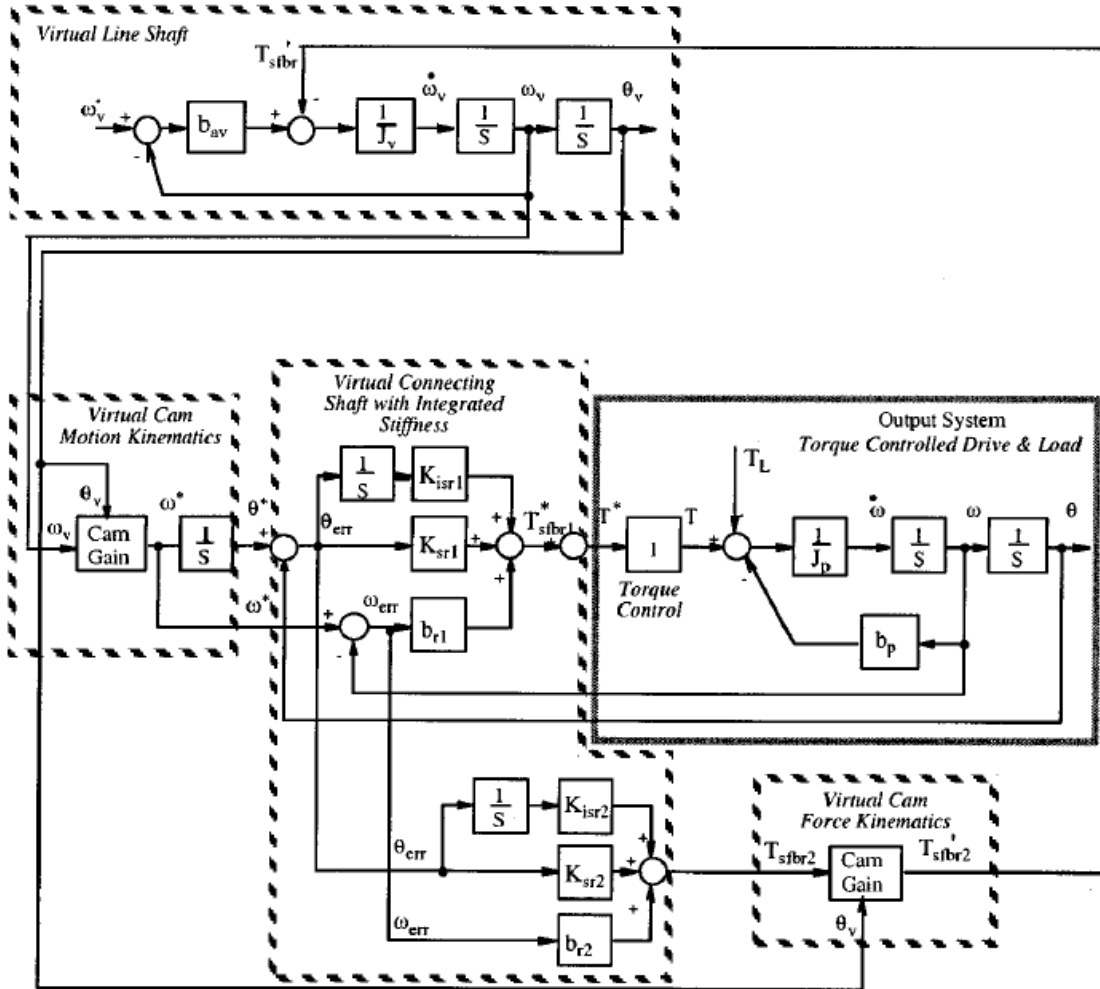


Fig. 18 - Schema a blocchi del controllo a rapporto variabile di un asse mediante *Electronic Line Shafting*

Essa presenta due funzioni: la prima è la generazione di riferimenti di posizione, velocità e accelerazione mediante la propria cinematica diretta a partire da quelli dell'albero virtuale. La seconda è il feedback del valore di coppia - misurato o stimato - a tale albero grazie alla sua cinematica inversa.

Le simulazioni condotte dai sopracitati autori mostrano che:

- In situazione di saturazione di coppia - asse slave - il sistema *Master Slave* ha prestazioni scadenti: presenta errore di posizione di 0.5 m ed errore di velocità di 1 m/s.
- Nel medesimo contesto il sistema con *Electronic Line Shafting* riduce l'errore di inseguimento di un fattore maggiore di dieci.



- In situazione di saturazione di velocità - asse slave - il sistema *Master Slave* presenta nuovamente un errore di inseguimento non indifferente:  $\pm 0,5$  m di posizione e  $\pm 0,5$  m/s per quanto riguarda la velocità.
- Analogamente con l'*Electronic Line Shafting* l'errore di inseguimento viene ridotto all'uno per cento di quello misurato con sistema *Master Slave*.

Rispetto al caso delle cartiere, l'implementazione del sistema trattato alle macchine tessili estende il suo utilizzo al caso di meccanismi a rapporto variabile, ossia catene cinematiche e/o camme. L'applicazione in tale contesto offre, in proporzione, vantaggi ancora superiori rispetto al caso di relazioni cinematiche fisse.

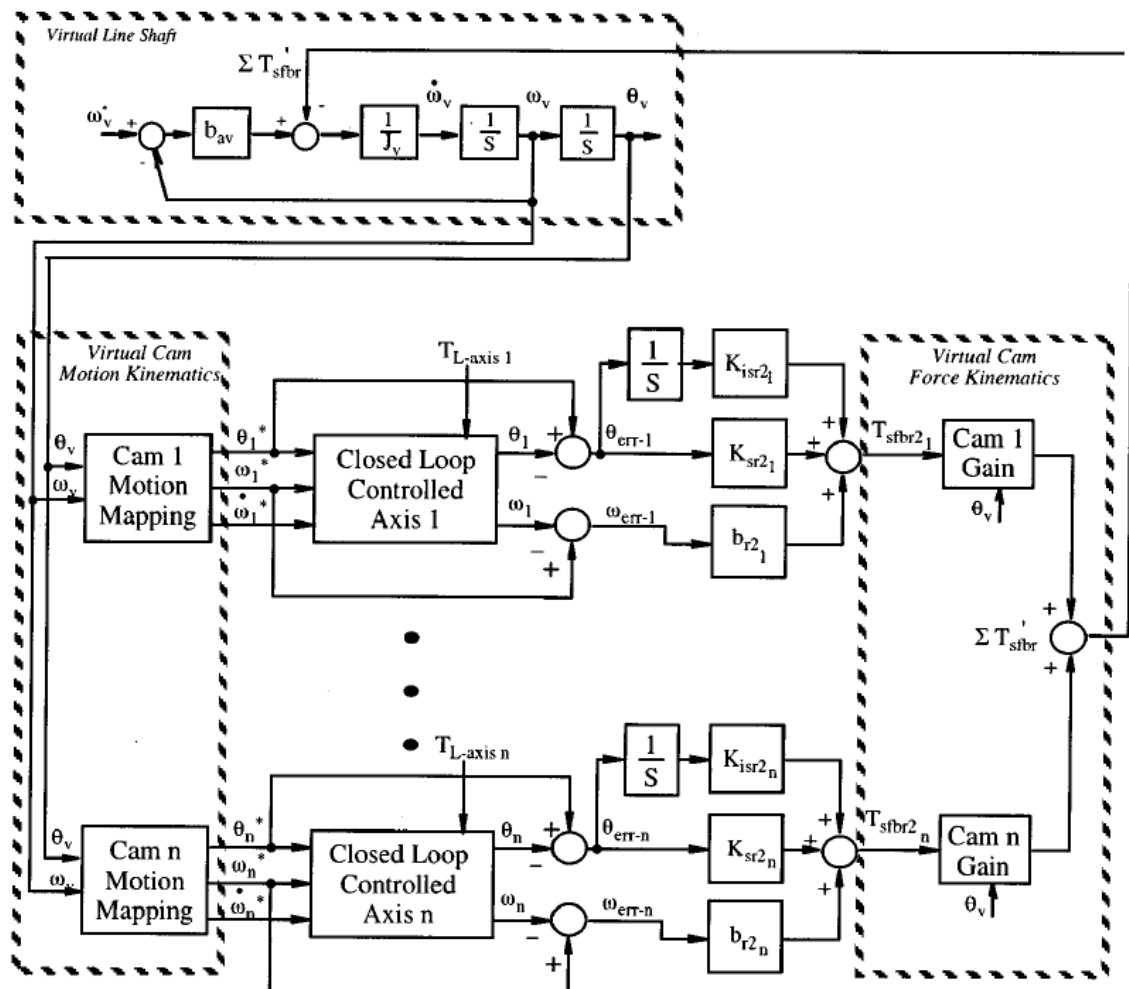


Fig. 19 - Schema a blocchi dell'Electronic Line Shafting a rapporto cinematico variabile esteso al caso multi-asse

E' possibile lavorare senza interruzioni o interventi manuali atti a trattare opportunamente i transitori e le situazioni di saturazione degli azionamenti: c'è dunque un maggior margine di automazione e si limitano rotture o danneggiamenti del filato.

In ultima si precisa che tale tecnica, per quanto possa sembrare dispendiosa a livello hardware e software, sta perfettamente nelle capacità degli odierni sistemi digitali. Nelle simulazioni condotte, a fronte di un sample-time di 1ms e di una memoria di 48x32 K, l'Electronic Line Shafting ne richiede rispettivamente il ventinove e il cinquanta per cento. C'è dunque notevole spazio per le rimanenti attività, in background e non.

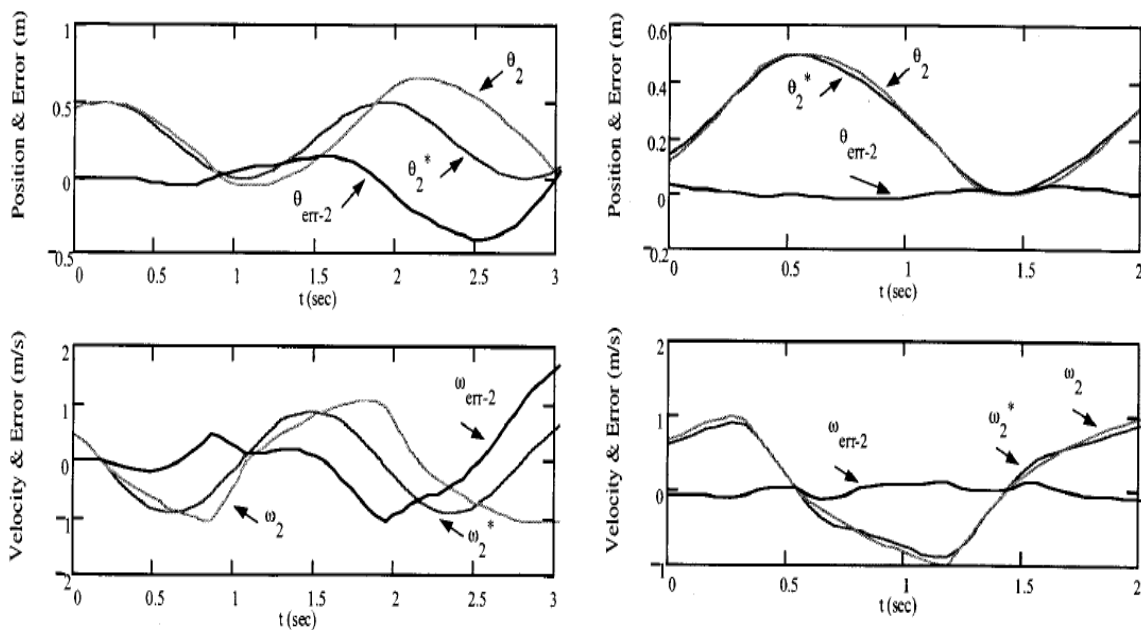


Fig. 20 - Risposta dell'asse slave in condizioni di saturazione di coppia con sistema Master Slave (sinistra) ed Electronic Line Shafting (destra)

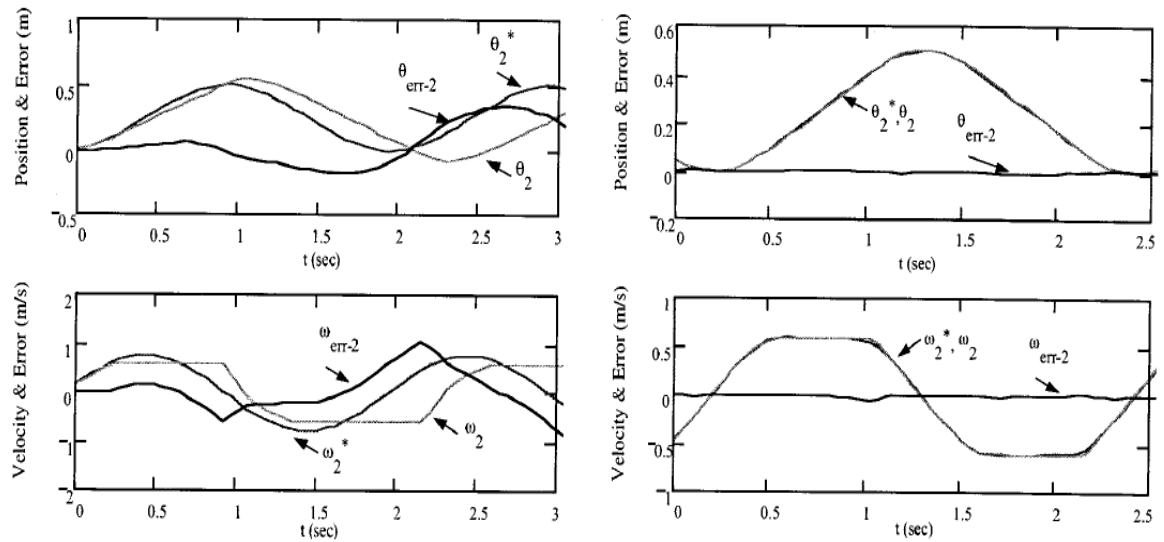


Fig. 21 - Risposta dell'asse slave in condizioni di saturazione di velocità con sistema Master Slave (sinistra) ed *Electronic Line Shafting* (destra)

## 2.2 Applicazioni industriali dell'*Electronic Line Shafting*

Molti costruttori hanno recentemente investito nel rinnovo dei macchinari, a fronte di richieste di mercato basate su rapidità e flessibilità produttiva. Si è cercato inoltre in molti casi di trarre profitto dall'innovazione, soprattutto per quanto riguarda la manutenzione dei macchinari, il consumo energetico e il time-saving.

Con l'adozione dell'*Electronic Line Shafting* si nota un notevole miglioramento sotto tutti i punti di vista appena elencati: in primis l'assenza di organi meccanici in movimento – come già precisato precedentemente – comporta un abbattimento notevole dei costi e dei tempi di manutenzione del macchinario.

In secundis tale eliminazione comporta una riduzione della potenza meccanica richiesta agli azionamenti, il che si traduce in una minore potenza elettrica richiesta dalla rete. Ciò inevitabilmente porta ad un risparmio che risulta spesso un aspetto non trascurabile.

Per concludere, la flessibilità operativa introdotta da tali tipologie di controllo – propria dei sistemi a camma elettronica – si traduce in minori tempi di setup. A tal fine i principali costruttori di azionamenti e sistemi di controllo realizzano prodotti con *Electronic Line Shafting*.

### 2.2.1 L'esempio Bosch Rexroth<sup>12</sup>

Un primo esempio di grande industria a fare uso dell'*Electronic Line Shafting* è dato da *Bosch Rexroth*. Tale multinazionale industriale ha saputo far propria questa tecnologia di controllo oltre vent'anni fa, ed inserirla nel marchio *IndraMotion*. Parte del framework *IndraWorks*, si compone di una serie di prodotti per l'automazione atti a realizzare macchinari industriali basati su moderne tecniche di controllo come quella oggetto della corrente trattazione.

Esso unisce PLC e sensori, collegati ad un controllore centrale per mezzo della linea di comunicazione in fibra ottica *SERCOS*. Il controllore centrale genera riferimenti ad alta risoluzione – 32 bit – e può contare sul feedback di encoder altrettanto prestanti, solitamente da sedicimila conteggi per rotazione del motore.

Offre un ottimo sincronismo di velocità, anch'esso ad alta risoluzione, e si basa su camme elettroniche in grado di interpolare fino a milleventiquattro punti, ciascuna con quattro profili memorizzabili.

I vantaggi più grandi si hanno allorché il numero degli assi è ingente: sono presenti infatti macchinari per la stampa o per il converting con anche duecento assi. Ognuno di essi presenta anelli chiusi di posizione, velocità e corrente: questo diminuisce gli oneri del controllore centrale in termini di singolo asse. Per questo è in grado di controllarne fino a quaranta.

---

<sup>12</sup> Indramotion ([www.boschrexroth.com](http://www.boschrexroth.com))

La tecnologia di Bosch Rexroth è stata recentemente più volte utilizzata nel campo dell'automazione industriale, soprattutto nei settori della stampa rotativa.

Grazie alle performance di sincronismo offerte da *IndraMotion*, la ditta *O.M.G Cerutti* – importante realtà metalmeccanica piemontese – ha realizzato macchinari per la stampa rotativa ad alte prestazioni. Tali realizzazioni – dal nome di *Aurora* – necessitano del venticinque per cento di personale in meno e di tempi di setup di meno di un'ora.

Esse vedono gli scarti ed i tempi morti diminuiti rispettivamente del quaranta e del cinquanta per cento. Offrono prestazioni notevoli: 5100 rotazioni al minuto, con un aumento della produzione del ventun per cento rispetto alla realizzazione ad albero fisico ed una diminuzione del consumo energetico del dodici per cento.



Fig. 22 - Realizzazione di *Aurora* tramite *IndraMotion*

Altra grande azienda rivoltasi a *Bosch Rexroth* per soluzioni in merito alla stampa è *Poly IC*, gruppo inglese con sede in Germania. Operante nel settore dell'elettronica stampata, grazie ad *IndraMotion* realizza il *Poly TC*, una pellicola trasparente

altamente conduttiva per applicazioni come schermi tattili e simili.

Lo stampaggio del circuito elettronico viene effettuato su di un supporto in poliestere mediante una macchina rotativa, affine a quelle utilizzate nell'editoria giornalistica. Per fare ciò è necessaria una risoluzione nel posizionamento inferiore ai venti micron, ottenibile grazie alle moderne tecniche di controllo.

Tale pellicola viene trattata con ossido di stagno-iridio al fine di procurarne la trasparenza, generalmente è fragile e costosa. L'adozione della tecnologia di

*Bosch Rexroth* ha consentito un abbattimento dei costi con conseguente ribasso dei prezzi del prodotto.

In particolare il controllo delle bobine mediante *Electronic Line Shafting* permette di migliorare il tensionamento della pellicola, con sensibili miglie a livello di stabilità del processo e di qualità del prodotto. Ne consegue un ridotto numero di scarti.

Va detto che *Bosch Rexroth* non cita esplicitamente la teoria del prof. Lorenz, pur facendo riferimento all'idea dell'albero virtuale come garante del sincronismo. Ciò, unito alla non divulgazione dei dati tecnici da parte dell'azienda, suggerisce che non sia stata realizzata la tecnica originale dell'*Electronic Line Shafting*.

E' probabile invece che sia stata conservata l'idea di fondo, ma che sia stata condotta una ricerca più approfondita mirata all'esaltazione delle specifiche di sincronismo. Tale ricerca ha portato alla realizzazione di una versione "personalizzata" della tecnica, della quale l'azienda non fornisce i dettagli tecnici.

### 2.2.1 L'esempio *Siemens*<sup>13</sup>

Anche *Siemens*, come *Bosch Rexroth*, ha recepito la problematica del sincronismo in applicazioni multi-asse e ha sviluppato un sistema di coordinazione denominato *SIMOTION*. Questo in particolare affianca la famiglie di azionamenti *SIMOVERT MasterDrive*, atta anch'essa a controllo mediante *Electronic Line Shafting*.

Tali azionamenti sono stati inglobati in *SIMODRIVE*, affiancato da *PROFIBUS*, *PROFINET* e *SIMOLINK* – per la comunicazione tra azionamenti, fondamentale per il sincronismo – può contare anch'esso su generazione di riferimenti a 32 bit e feedback ad alta risoluzione.

---

<sup>13</sup> *SIMOTION* ([www.siemens.com](http://www.siemens.com))

Quasi del tutto analogo all'esempio *Bosch Rexroth*, anche *SIMOTION* è stato il sistema scelto da alcuni produttori industriali per risolvere problematiche di sincronismo nelle linee e tentare di migliorare l'efficienza della lavorazione.

Il primo esempio è dato da *Chrysler*, che nella sede di St. Louis per l'assemblaggio di minivan ha ricorso nel 2005 al prodotto di *Siemens*. In particolare si ricercavano proprietà di sincronismo nella linea per la verniciatura, perse allorché era stata presa la decisione di eliminare l'albero fisico di interconnessione degli assi. La ditta infatti, prima dell'adozione di *SIMOTION*, non aveva trovato il sistema di controllo che garantisse le performance richieste.

Grazie a tale modifica della linea, Chrysler asserisce di aver migliorato la produttività e ridotto i tempi complessivi di produzione. A fronte di una produzione di mille telai al giorno, l'efficienza della linea è aumentata soprattutto a causa di un'ingente diminuzione degli scarti.

Altro esempio di impiego industriale di *SIMOTION* riguarda ancora macchine rotative per la stampa: l'azienda in questione è *B&L*. Produttrice di macchinari di questo tipo con sede in Illinois, si è servita dei prodotti Siemens per il passaggio da albero meccanico di linea a controllo elettronico degli azionamenti nell'ammodernamento delle macchine *Harris M-1000*.

L'azienda conta una tiratura variabile tra le 5000 e le 125000 copie al giorno, tra giornali, riviste e imballaggi, attraverso tali modifiche ha ridotto del cinquanta per cento i tempi di setup e del venti per cento gli scarti. Inoltre si sono ridotti i tempi di lavorazione del venticinque per cento per quanto riguarda la macchina, del venti per cento in termini di manifattura.

Anche nel caso di *Siemens*, è necessario sottolineare che non viene citata la teoria originale della tecnica di controllo discussa. E' fortemente probabile che, sulla base della filosofia di Lorenz, il gruppo in questione abbia progettato un sistema studiandone ad hoc alcune caratteristiche .







industriali, per ragioni che saranno elencate in seguito, si preferisce il controllo *Master Slave*, magari con accortezze mirate a buoni valori di accuratezza.

## CAPITOLO TRE

### SIMULAZIONE

#### 3.1 Confronto tra sistema *Master Slave* ed *Electronic Line Shafting*

Di seguito vengono analizzati i risultati di alcune simulazioni in tre differenti casi:

- Sistema *Master Slave*, disturbo su asse master
- Sistema *Master Slave*, disturbo su asse slave
- Sistema con *Electronic Line Shafting*, disturbo su un asse

Le simulazioni vengono svolte in ambiente *Simulink*, utilizzando il modello di asse di figura. I parametri fisici di riferimento sono elencati nel listato *Matlab* in appendice.

Le simulazioni vengono eseguite, per ciascuno dei tre casi, con una legge di moto polinomiale di quinto grado, la cui relazione in posizione è:

$$\theta(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5$$

ove i coefficienti sono riportati in appendice, nella *Matlab function* con cui la legge è stata ricavata.

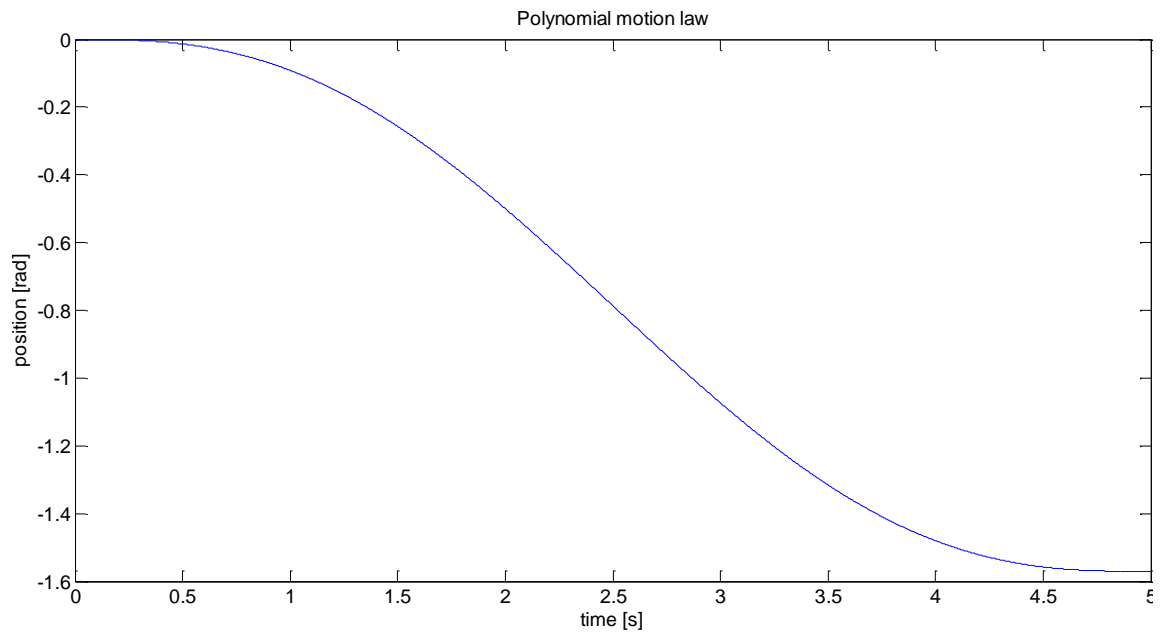


Fig. 25 - Grafico di posizione della legge di moto utilizzata

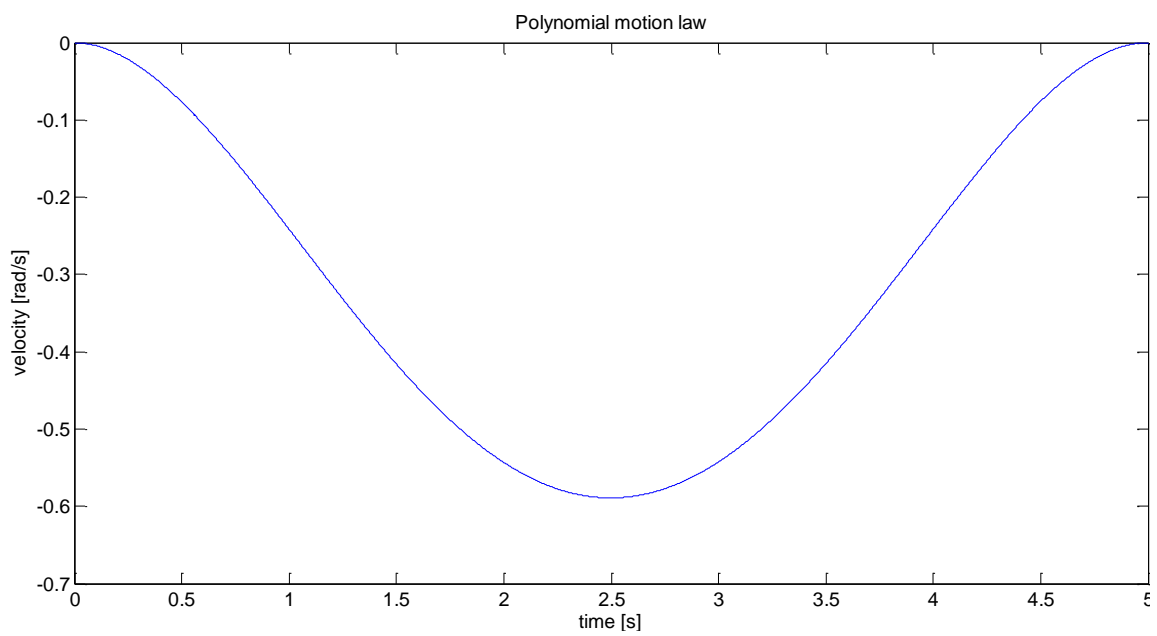


Fig. 26 - Grafico di velocità della legge di moto utilizzata

Per ciascun caso vengono valutati gli effetti di un disturbo di coppia a gradino:

$$d(t) = 3c, \quad t \geq 2 \text{ s}$$

ove  $c$  è il valore della coppia di carico nominale applicata a ciascun asse, il cui valore è riportato nel listato *Matlab* sopra citato.

### 3.1.1 Sistema *Master Slave*, disturbo su asse master

Per questa prima simulazione si prende come riferimento un sistema a due assi con tecnica di controllo *Master Slave*. E' applicato il disturbo di coppia sull'asse master, in questo caso reale, che viene seguito nel suo rallentamento dall'asse slave.

Si noti che non vi è perdita di generalità nel considerare due soli assi: giacché il disturbo coinvolge l'asse master, a parità di parametri fisici qualunque numero di assi slave considerato avrebbe prodotto una risposta analoga.

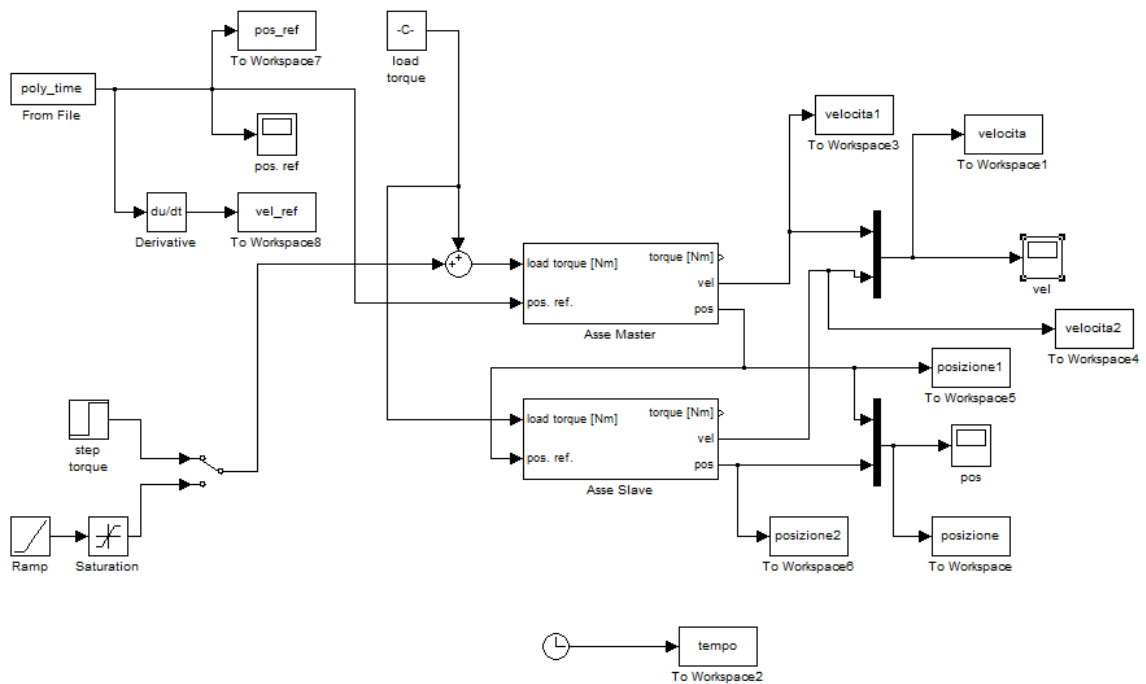


Fig. 27 - Modello *Simulink* del sistema *Master Slave* utilizzato per la simulazione, con disturbo su asse master

Si notano buone caratteristiche di inseguimento, sia a regime che durante i transitori: l'errore di posizione tra asse master e slave tocca un picco di circa 0,007 radianti, quello di velocità un valore massimo di 2 radianti al secondo.

Era questa una caratteristica nota: il moto dell'asse slave segue quello del master – ovviamente qualora il suo controllore sia correttamente tarato – per cui se quest'ultimo subisce un rallentamento, esso si ripercuote anche sul primo. Le prestazioni di inseguimento dipendono ovviamente dalla struttura fisica degli assi – i.e. inerzia, attrito, impedenza elettrica – e dai parametri dei controllori degli anelli di posizione, velocità e corrente.

Si riportano i grafici di posizione e di velocità dei tre casi presi in esame.

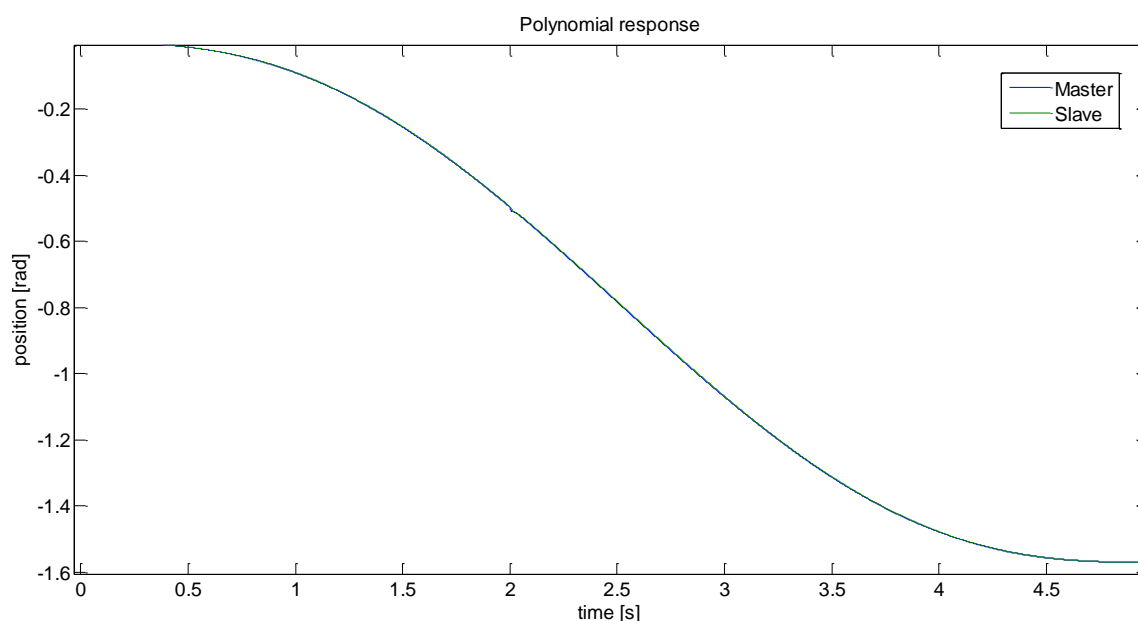


Fig. 28 - Grafico di posizione degli assi

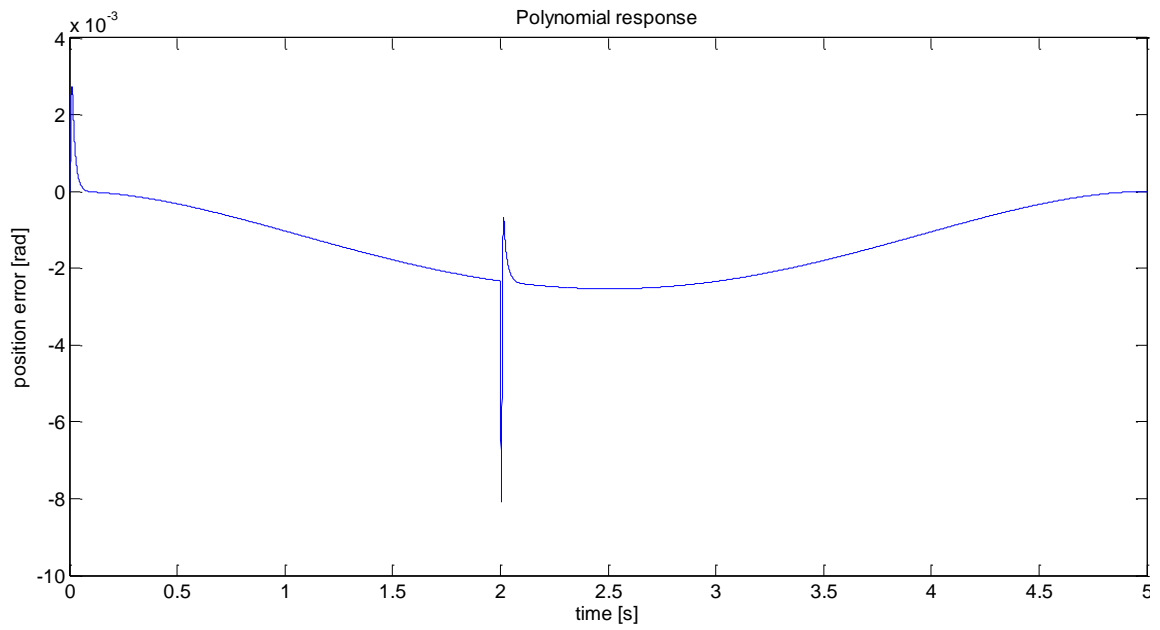


Fig. 29 - Grafico dell'errore di posizione tra asse master e asse slave

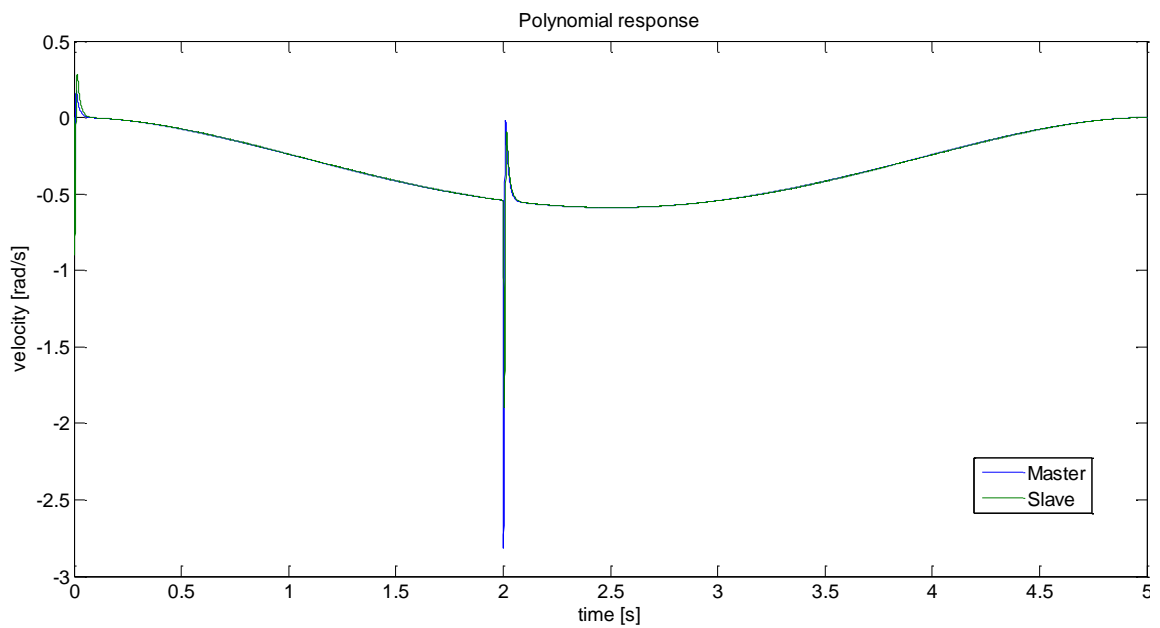


Fig. 30 - Grafico di velocità degli assi

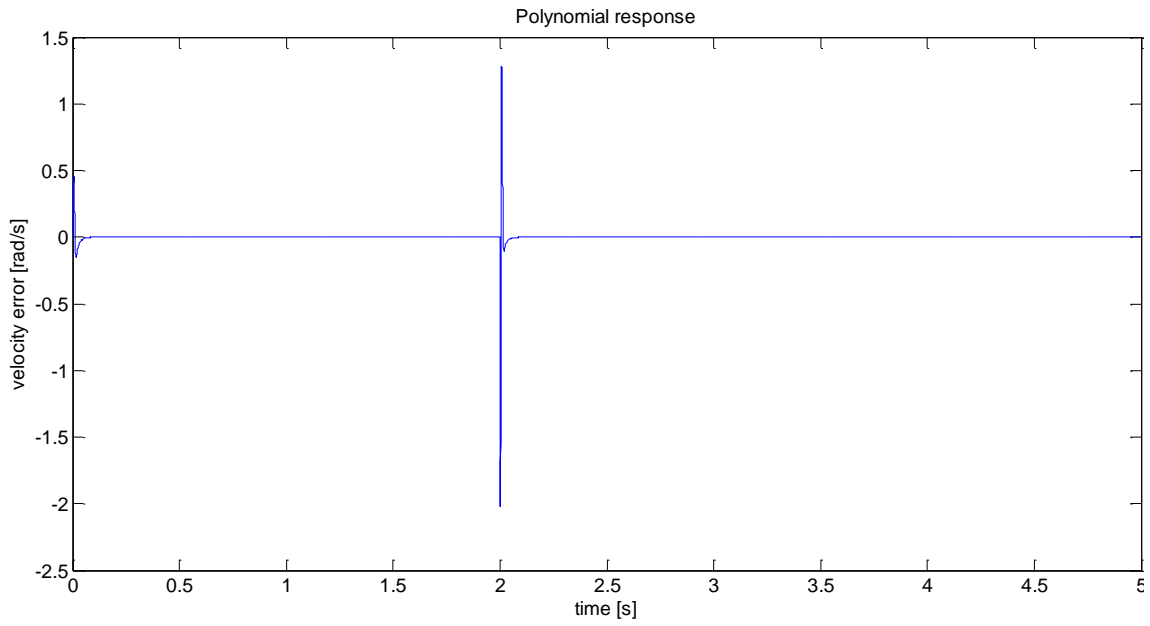


Fig. 31 - Grafico dell'errore di velocità tra asse master e asse slave

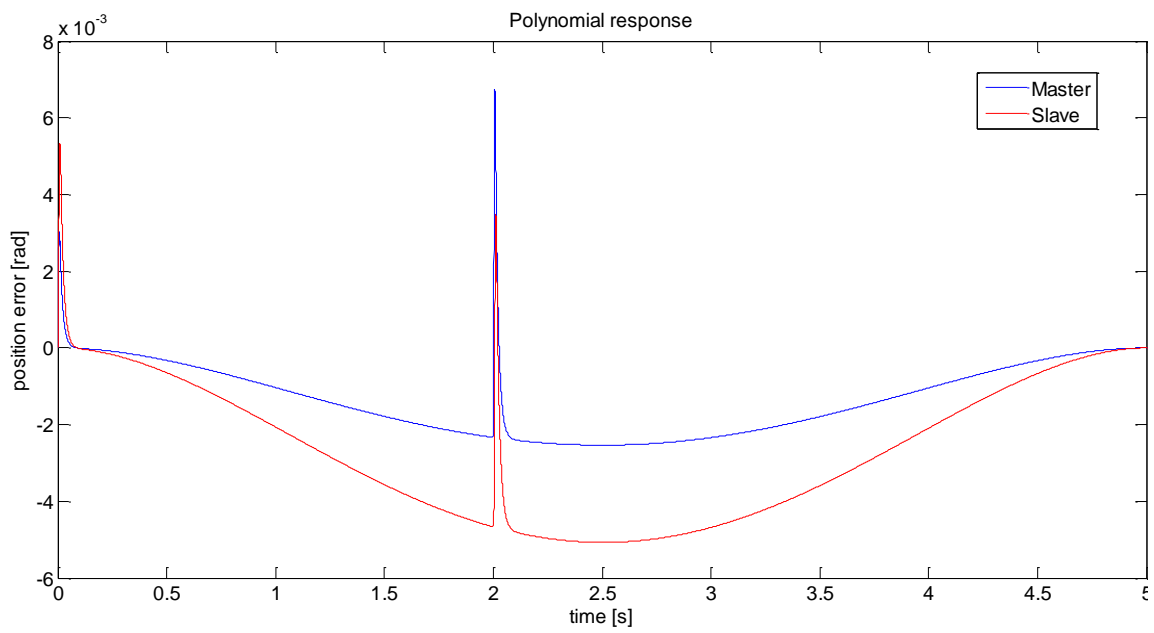


Fig. 32 - Grafico dell'errore di posizione tra gli assi e il riferimento



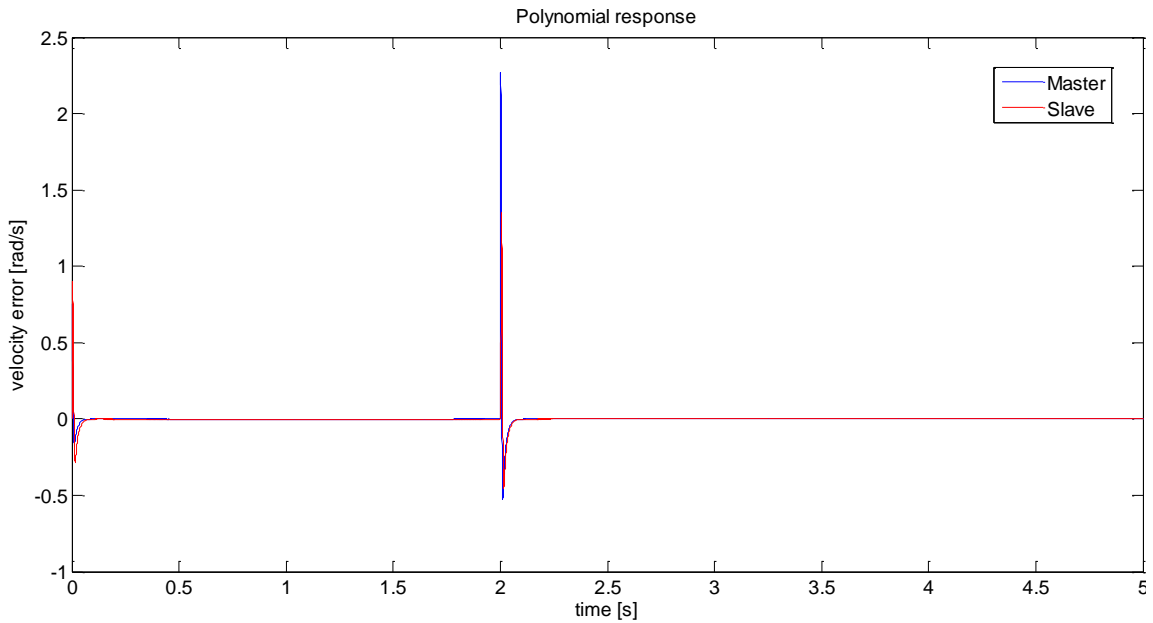


Fig. 33 - Grafico dell'errore di velocità tra gli assi e il riferimento

### 3.1.2 Sistema Master Slave, disturbo su asse slave

Il secondo caso preso in esame è quello di un sistema *Master Slave* del tutto analogo a quello esaminato al paragrafo precedente, se non per il fatto che il disturbo viene applicato sull'asse slave.

In questo caso si nota – o meglio si verifica, dato che il risultato era intuibile – che il moto dell'asse master non risente minimamente di una perturbazione di quello dell'asse slave. Pertanto i due assi risultano scoordinati durante il transitorio generato dall'applicazione del disturbo: questo è il problema principale a cui il prof. Lorenz cerca di porre rimedio.

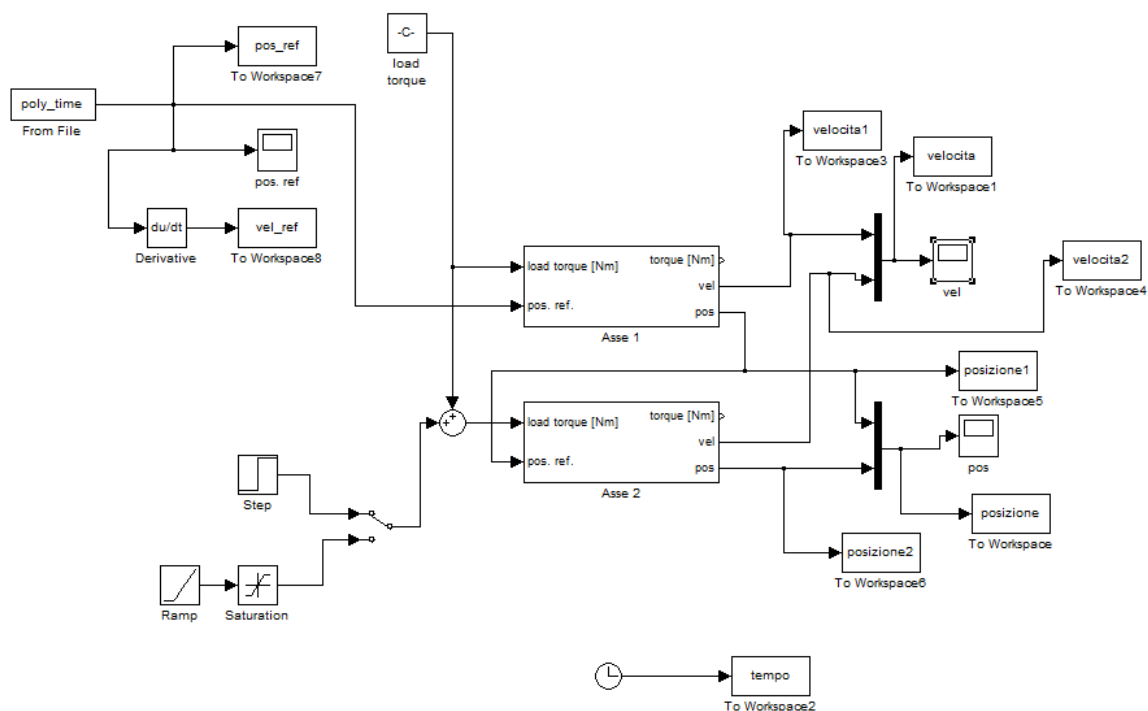


Fig. 34 - Modello *Simulink* del sistema *Master Slave* utilizzato per la simulazione, con disturbo sull'asse slave

Si ricorda infatti che da una tale perdita del sincronismo derivano effetti problematici, come esposto nel primo capitolo di questa trattazione.

A fronte dell'applicazione del disturbo di coppia si nota un errore di posizione tra gli assi di circa 0,007 radianti, ed uno di velocità di 2,4 radianti al secondo circa.

Di seguito i grafici di posizione e velocità dei tre casi oggetto della corrente analisi.

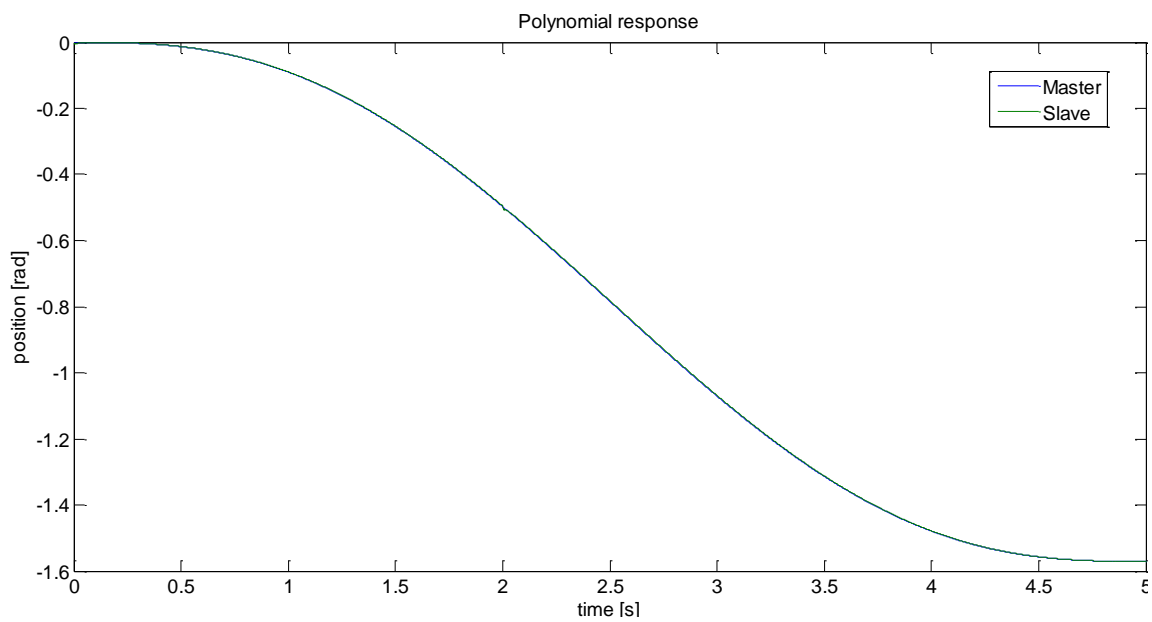


Fig. 35 - Grafico di posizione degli assi

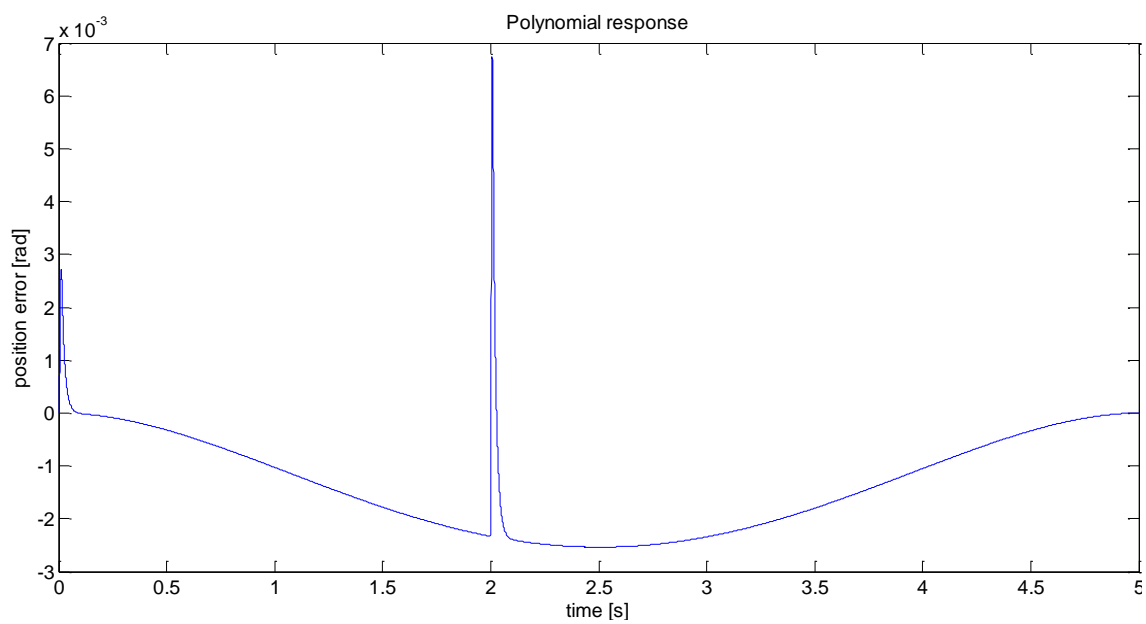


Fig. 36 - Grafico dell'errore di posizione tra asse master e asse slave

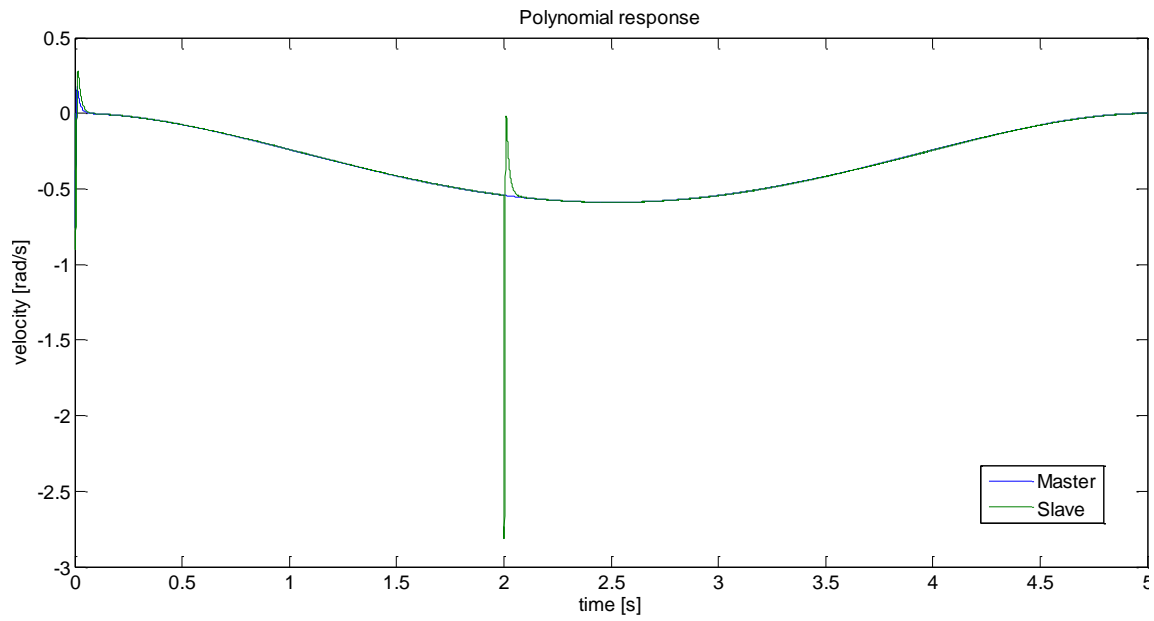


Fig. 37 - Grafico di velocità degli assi

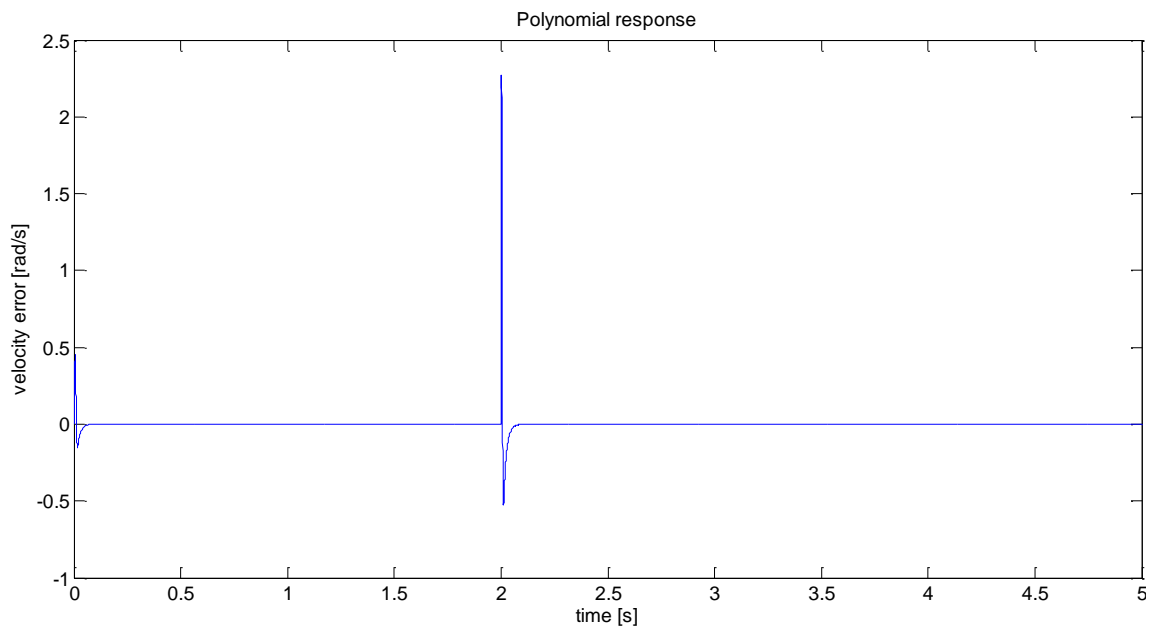


Fig. 38 - Grafico dell'errore di velocità tra asse master e asse slave

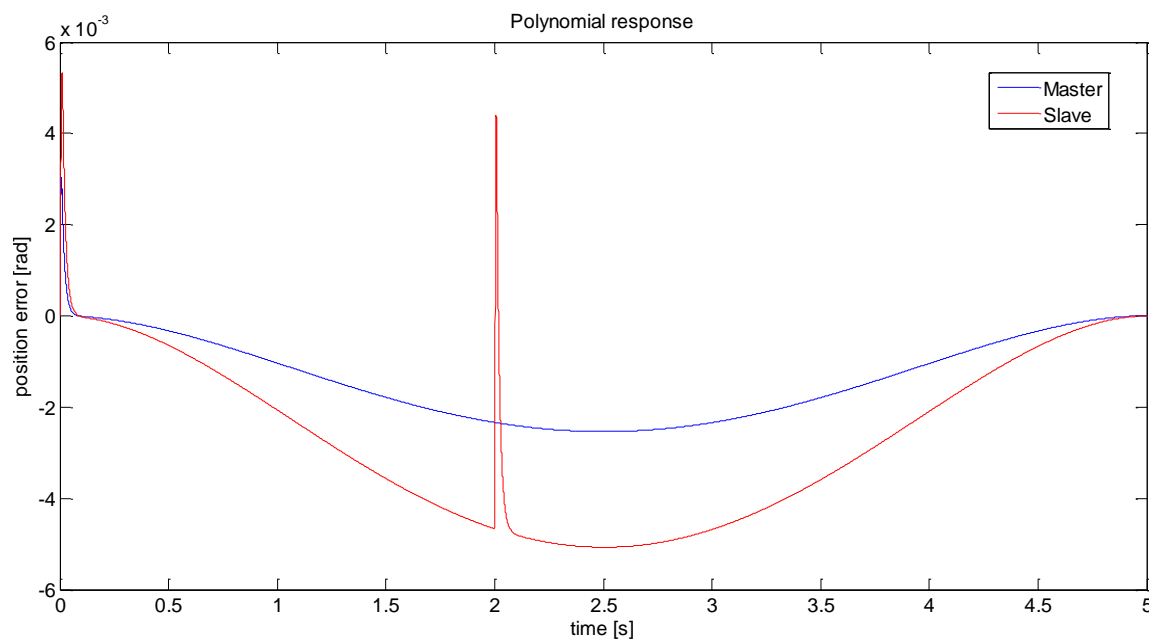


Fig. 39 - Grafico dell'errore di posizione tra gli assi e il riferimento

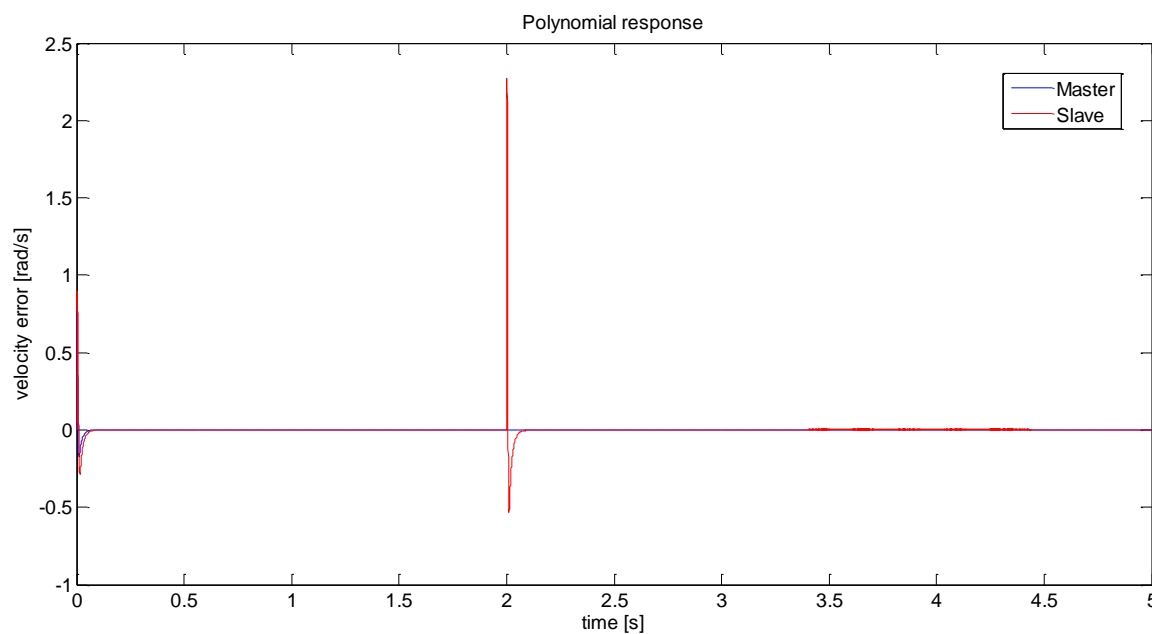


Fig. 40 - Grafico dell'errore di velocità tra gli assi e il riferimento

### 3.1.3 Sistema con *Electronic Line Shafting*, disturbo su di un asse

Si valuta ora il caso di sistema a quattro assi con *Electronic Line Shafting*. I valori d'inerzia e di attrito viscoso dell'albero virtuale sono riportati nel listato *Matlab* prima citato.

Il disturbo è applicato sul terzo asse, che subisce un'accelerazione a causa dell'aumento della coppia di carico a sé applicata per effetto di un disturbo esterno. Si nota perciò anche un'accelerazione degli assi non disturbati, che sotto il controllo di questo modificano il proprio moto per cercare mantenere il sincronismo.

Il valore dell'errore di posizione tuttavia peggiora rispetto a quelli ottenuti con il sistema *Master Slave*: si attesta ad un picco di 0,009 radianti. La durata del transitorio non si modifica di molto, e l'errore di velocità rimane pari a 2,4 radianti al secondo, come nel secondo caso simulato.

Non si ottengono perciò i miglioramenti auspicati in termini di sincronismo.

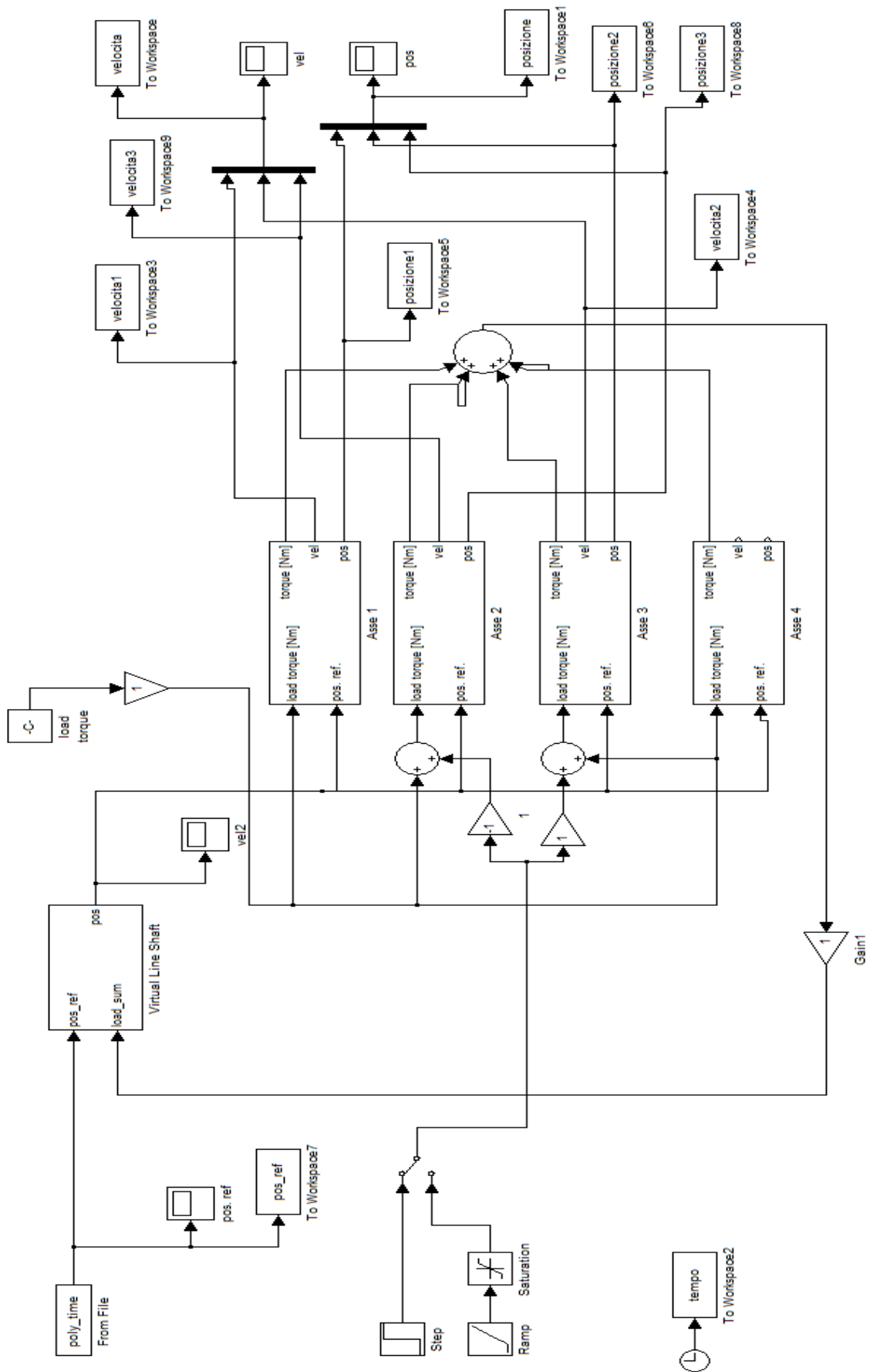


Fig. 41 - Modello *Simulink* del sistema con *Electronic Line Shifting* utilizzato per la simulazione

Si nota inoltre che all'istante zero gli assi - ancora sincroni - manifestano un'accelerazione: è questo l'effetto inerziale della coppia di carico degli assi slave applicata all'asse master. Vi è dunque una deformazione della legge di moto in partenza, che perde le caratteristiche di dolcezza della legge polinomiale assunta.

Causa di ciò è il basso valore d'inerzia impostato per l'albero virtuale, d'altra parte alzandolo si andrebbe a diminuire tale errore ottenendo però performance ancora peggiori nel transitorio successivo all'applicazione del disturbo. Di questo, assieme ad un più esteso commento sui valori dei parametri impostati per l'albero virtuale, verrà trattato nel paragrafo successivo.

Di seguito vengono riportati i grafici di posizione e velocità dei casi presi in considerazione.

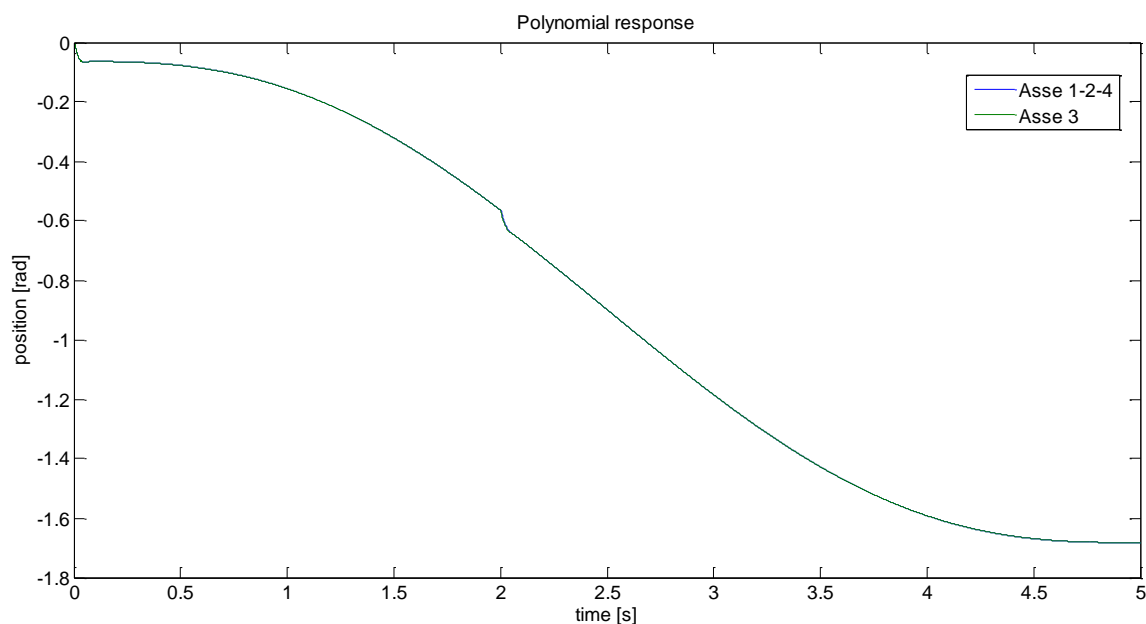


Fig. 42 - Grafico di posizione dei quattro assi



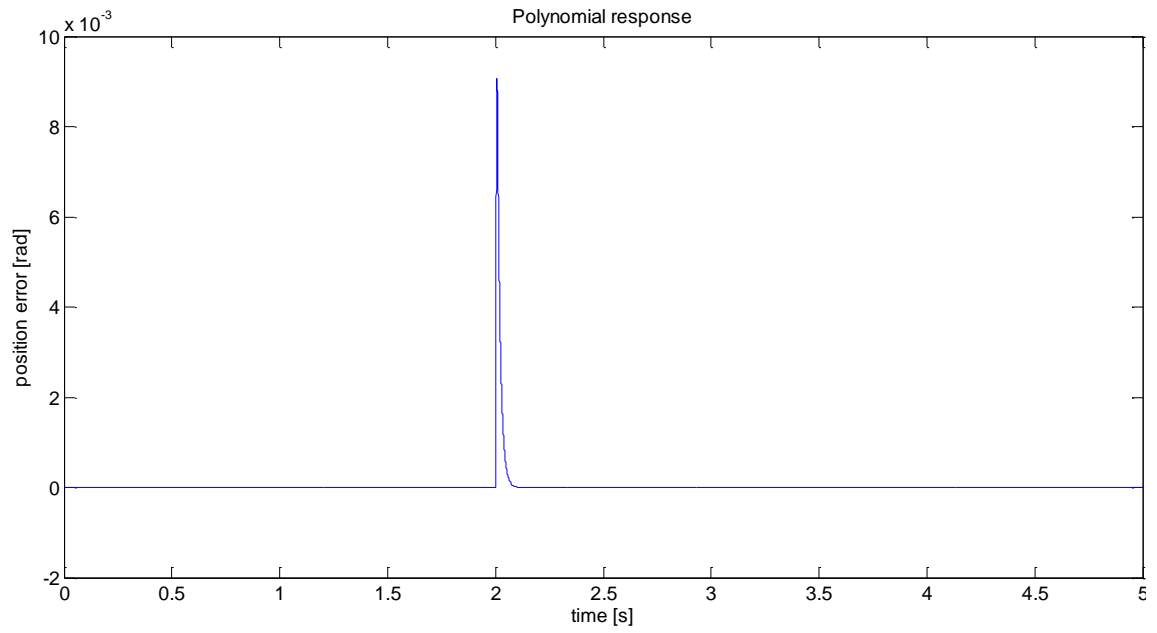


Fig. 43 - Grafico dell'errore di posizione tra asse non disturbato ed asse disturbato

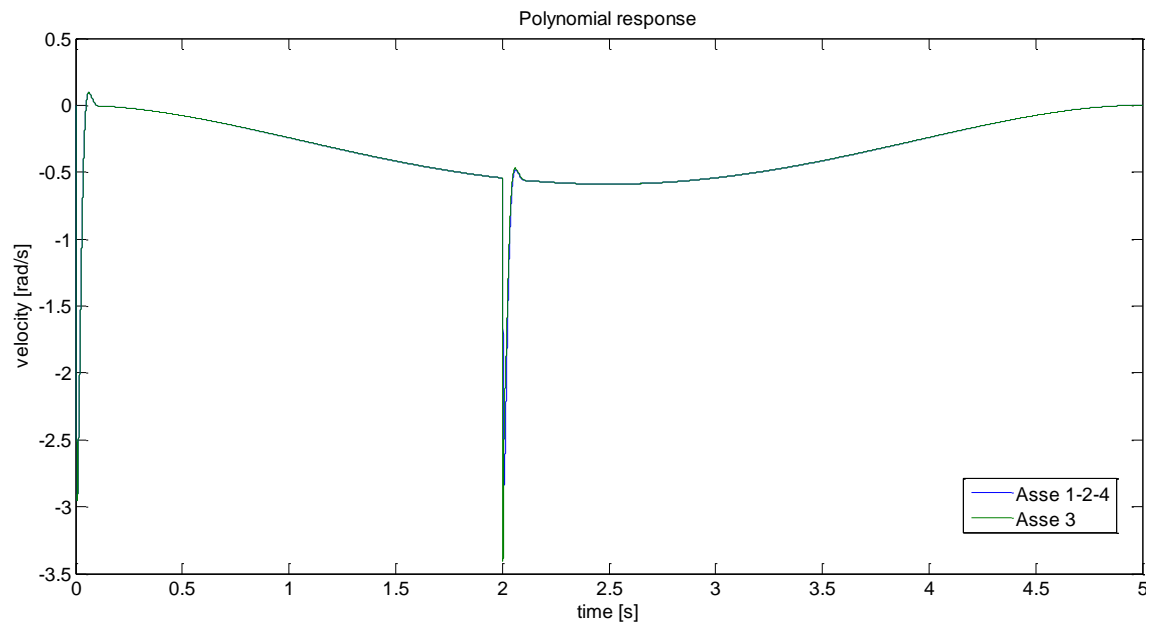


Fig. 44 - Grafico di velocità dei quattro assi

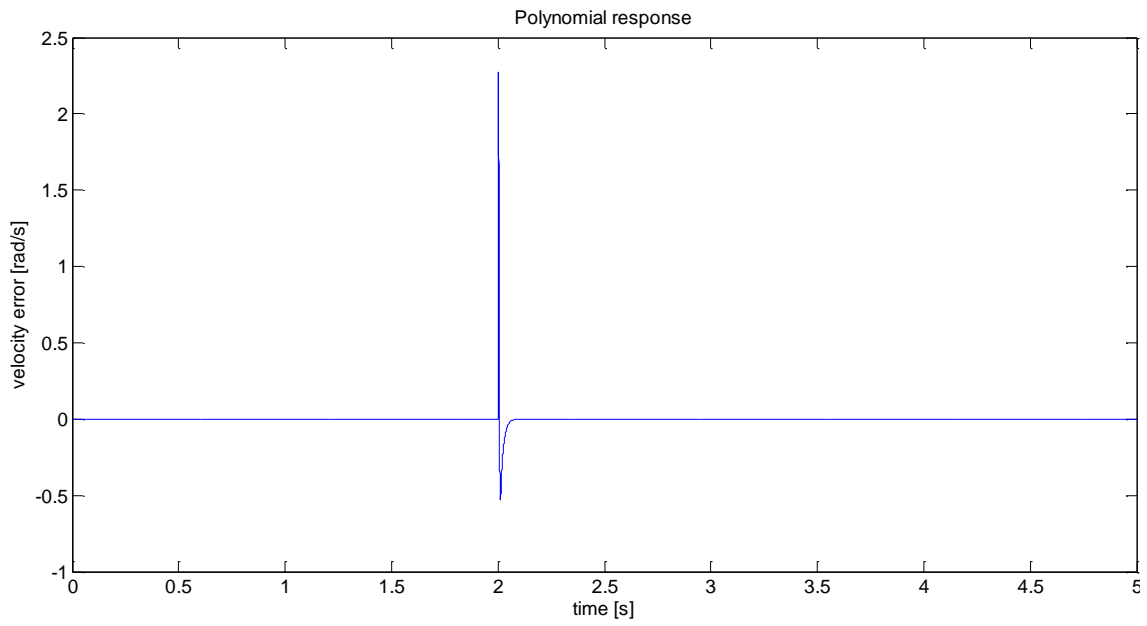


Fig. 45 - Grafico dell'errore di velocità tra asse non disturbato ed asse disturbato

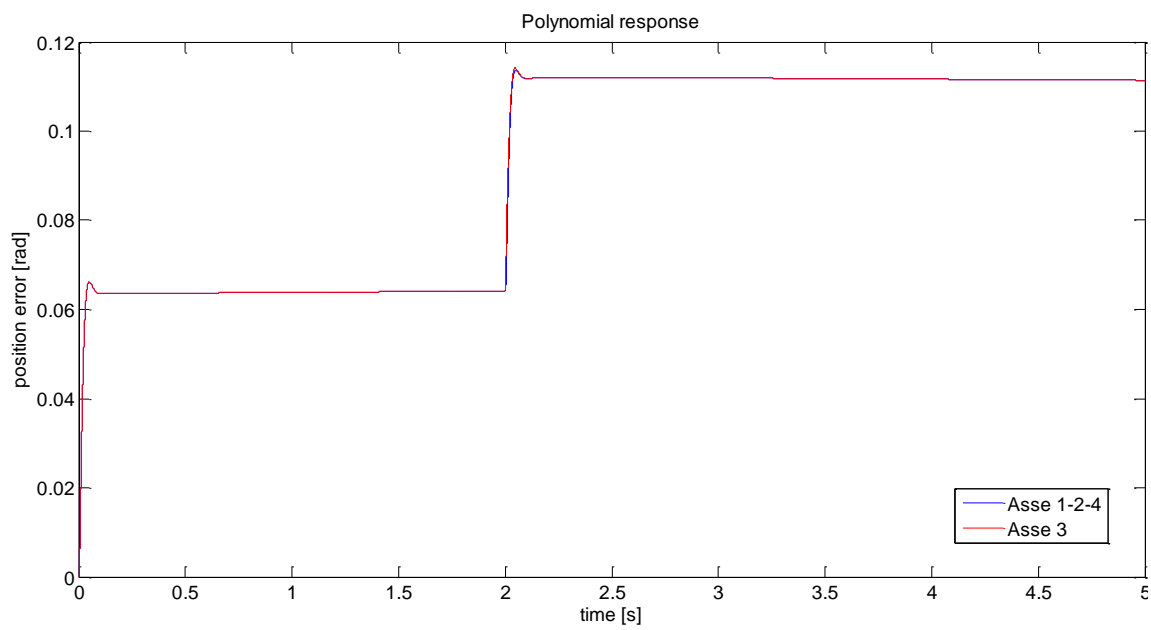


Fig. 46 - Grafico dell'errore di posizione degli assi rispetto al riferimento

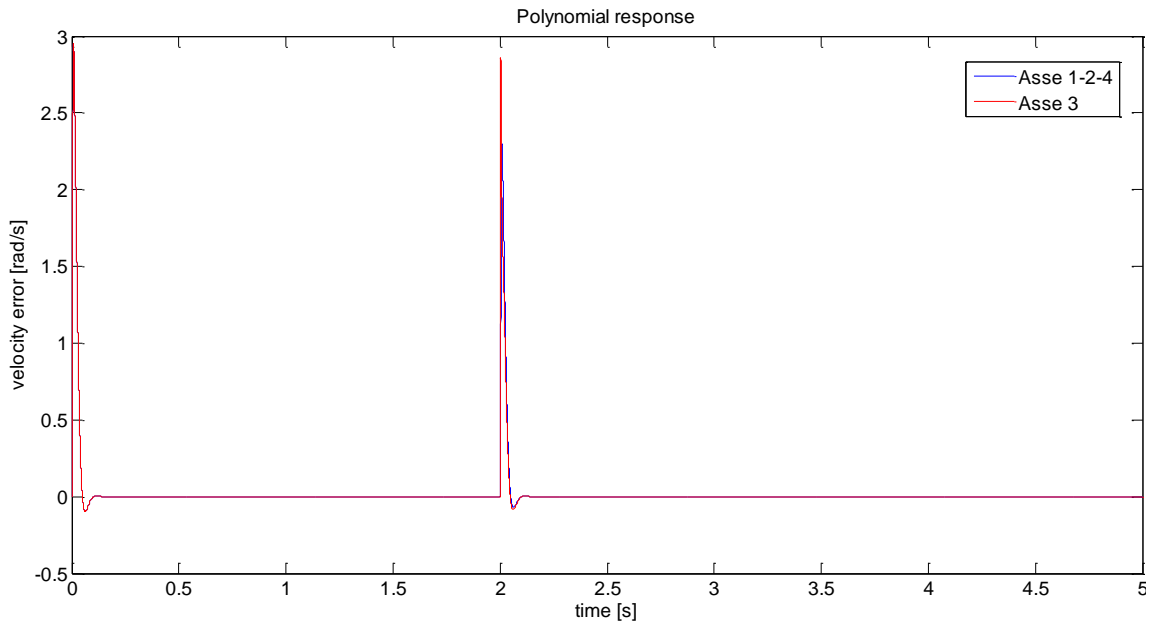


Fig. 47 - Grafico dell'errore di velocità degli assi rispetto al riferimento

### 3.1.4 Caso particolare: due disturbi di valore opposto

Si prende ora in esame un caso particolare, in cui due disturbi di valore opposto vengono applicati a due assi differenti aventi i medesimi parametri, fisici e del controllore. Si intuisce che questa condizione di carico manda in crisi la tecnica dell'*Electronic Line Shafting*: infatti i valori di coppia degli assi si sommano per produrre il riferimento per l'albero virtuale, gli opposti pertanto si elidono matematicamente.

Questo limite è proprio anche dei sistemi ad albero meccanico: dati i valori di coppia disponibile e richiesta rispettivamente all'albero di linea e agli assi, a fronte di una condizione di carico come quella ora in esame l'albero di linea non ne ha alcun riscontro.

L'imitazione della connessione rigida di tali sistemi – l'obiettivo ricercato da Lorenz – porta inevitabilmente gli stessi limiti.

Di seguito vengono riportati i grafici di posizione e velocità dei casi in esame.

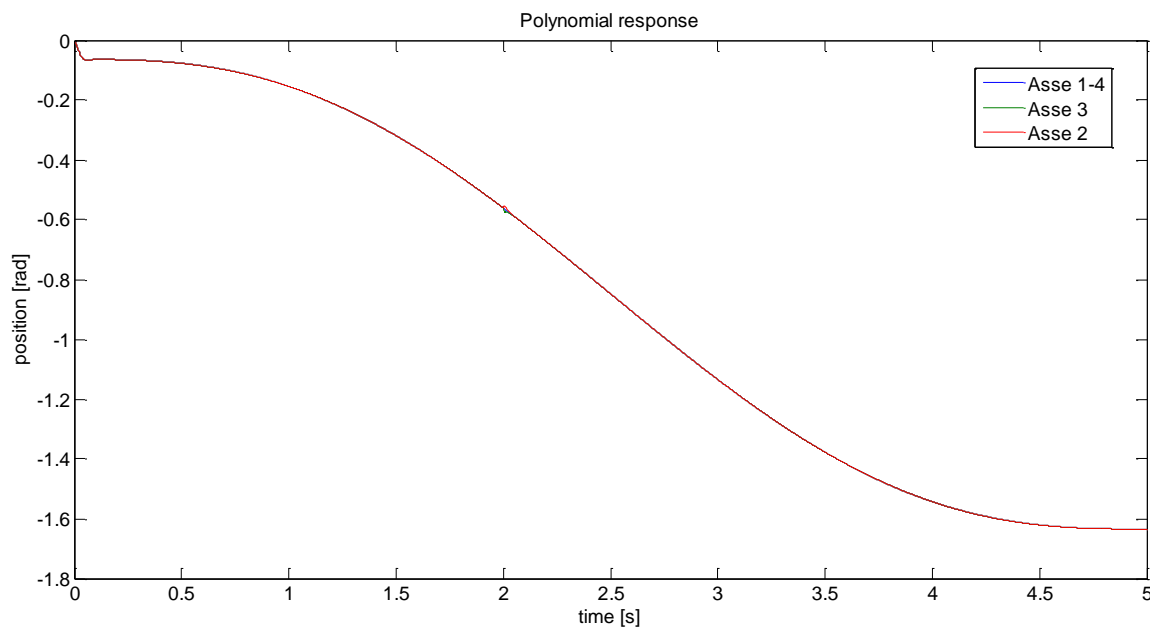


Fig. 48 - Grafico di posizione degli assi in caso di due disturbi di valore opposto

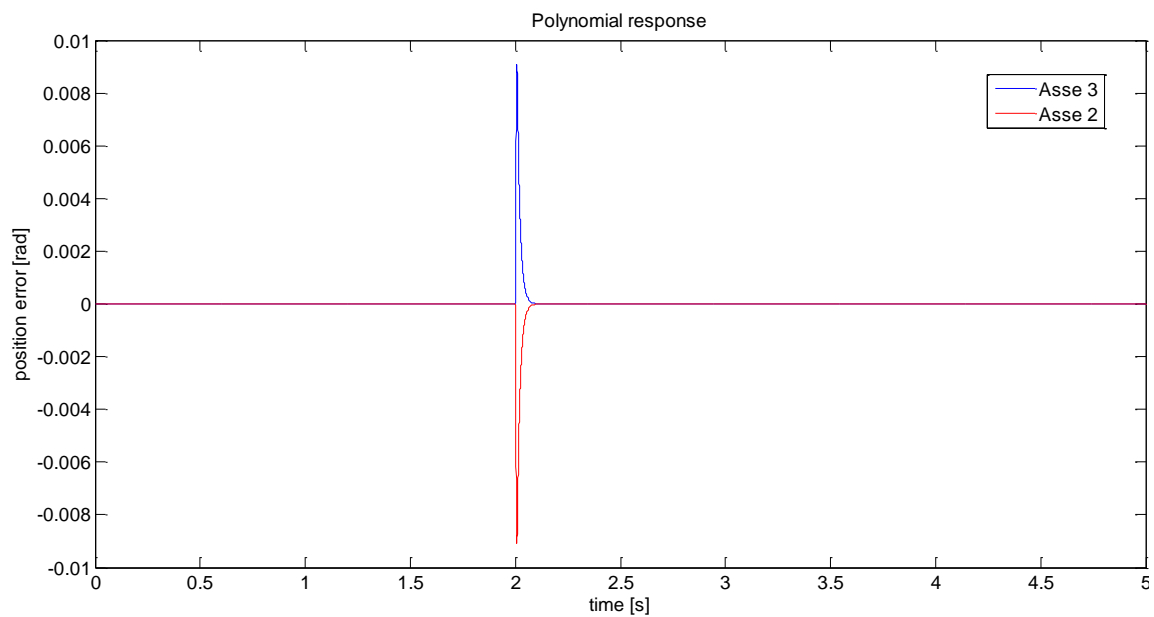


Fig. 49 - Grafico dell'errore di posizione tra ciascuno degli assi disturbati e quelli non disturbati

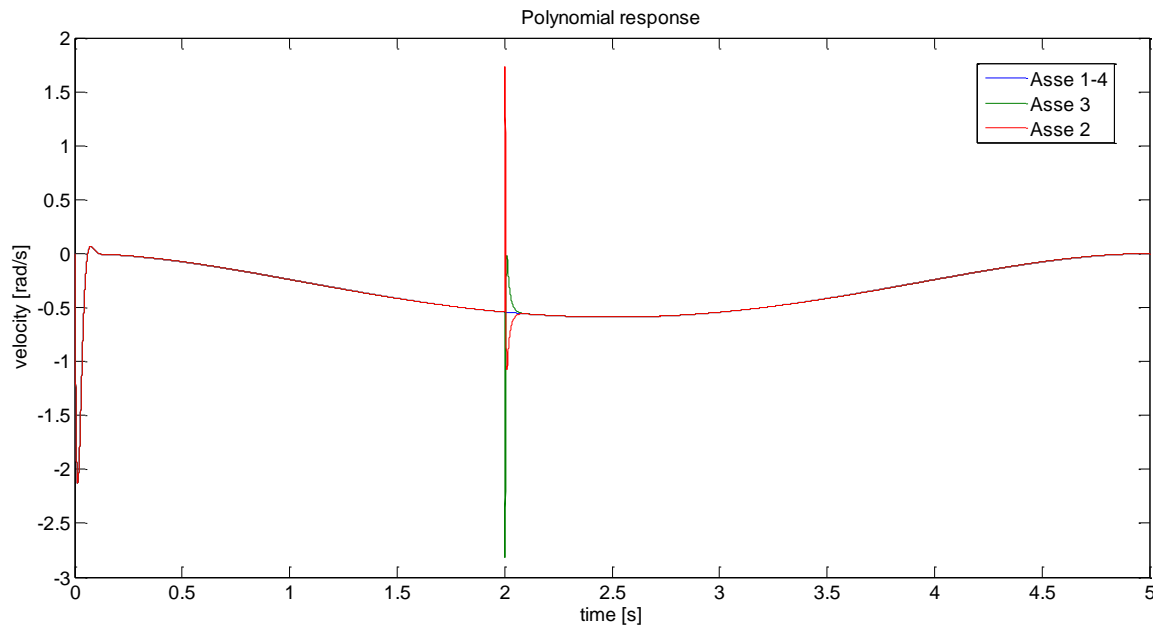


Fig. 50 - Grafico di velocità degli assi in caso di due disturbi di valore opposto

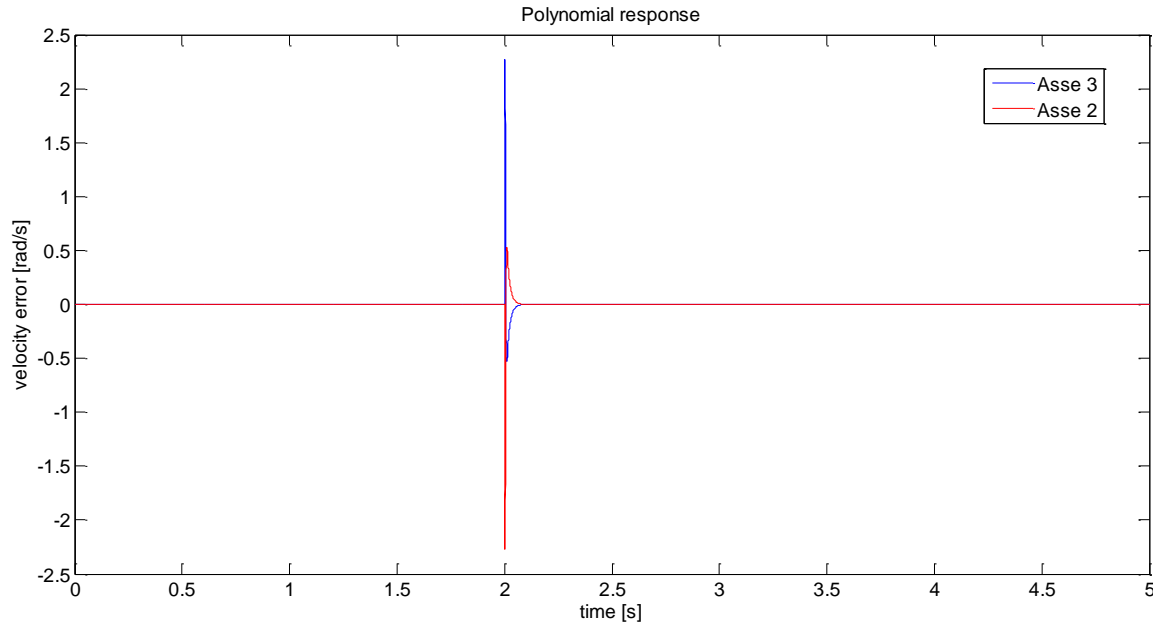


Fig. 51 - Grafico dell'errore di velocità tra ciascuno degli assi disturbati e quelli non disturbati

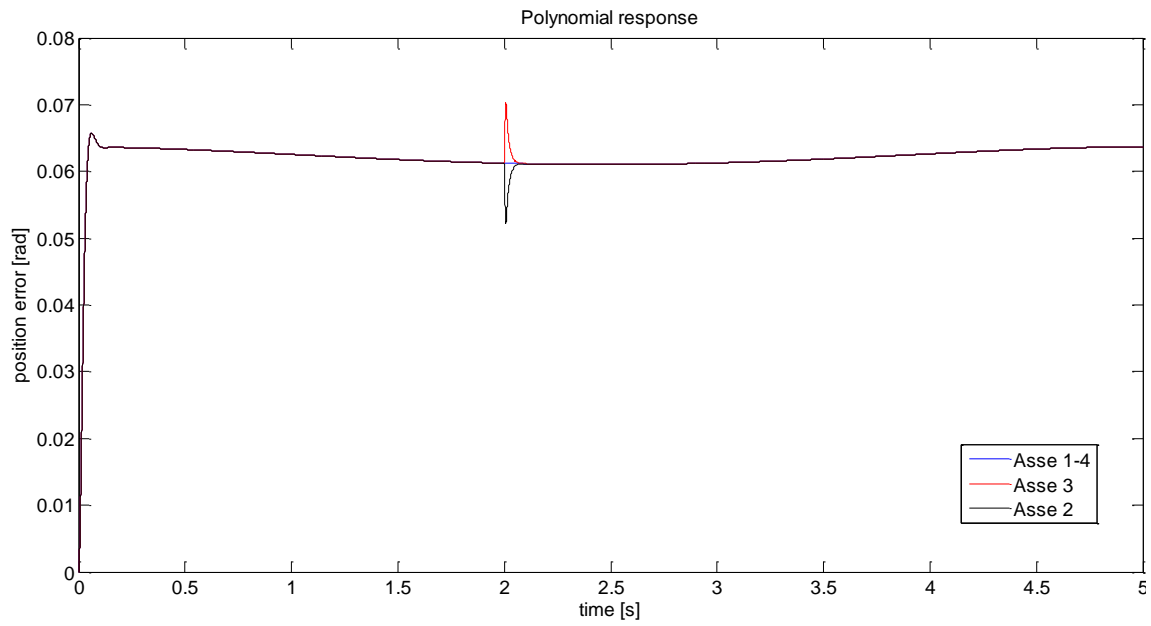


Fig. 52 - Grafico dell'errore di posizione degli assi rispetto al riferimento

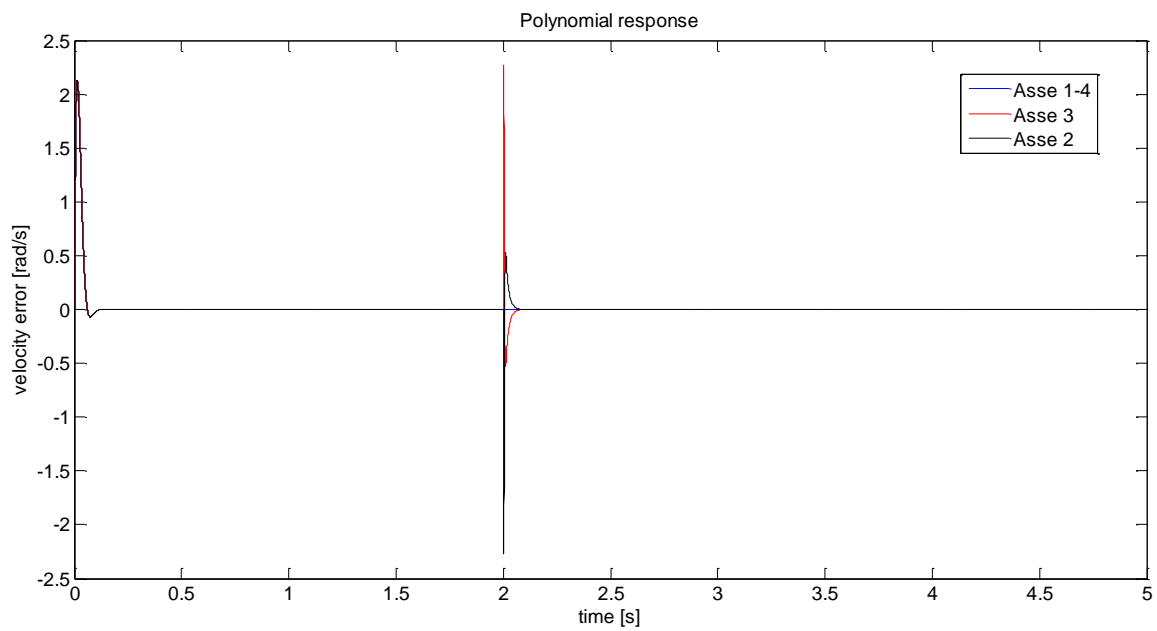


Fig. 53 - Grafico dell'errore di velocità degli assi rispetto al riferimento

### 3.2 Scelta dei parametri dell'albero virtuale

Si è accennato a come il valore del momento d'inerzia scelto per l'albero virtuale influisca sulle prestazioni dinamiche dello stesso e, più in generale, dell'intero sistema.

In particolare un valore sufficientemente più elevato di quello degli assi favorisce il rispetto delle specifiche di posizione – soprattutto durante il transitorio iniziale – giacché forza gli assi a rispettare le proprie condizioni di moto, che sono con buona approssimazione quelle dettate dal riferimento. Questo dal momento che vale la relazione:

$$\tau_m = J \cdot \ddot{\theta} - \tau_{load}$$

che nell'ipotesi di  $J$  sufficientemente grande rende l'effetto della coppia degli assi – applicata all'albero virtuale come carico – con buona approssimazione ininfluyente. Ciò risulta in un riferimento di moto per gli assi – l'uscita dell'albero virtuale – sostanzialmente approssimabile a quello previsto dalla legge di moto.

Il valore di  $J$  non dev'essere tuttavia eccessivamente elevato, al fine di non creare un transitorio iniziale: si ricorda che l'albero virtuale possiede una sua costante di tempo. Se si trascura, per un conto più agevole – ed essendo in genere poco rilevante l'effetto – il termine integrale, essa risulta pari a:

$$\tau = \frac{J}{b}$$

Dato che il modello approssimato ottenuto è del primo ordine, il tempo di salita – dal dieci al novante per cento del valore finale – si ottiene dalla relazione:

$$T_s = 2,2 \cdot \tau$$

Il valore del momento d'inerzia influenza anche gli altri parametri del suddetto albero. In particolare, considerando ora anche l'effetto dell'azione integrale – che porta ad una funzione di trasferimento con due poli e uno zero – il coefficiente di smorzamento è determinato dalla relazione:

$$\rho = \frac{1}{2} \frac{b + k_{p,v} \cdot k_t}{\sqrt{\frac{J \cdot k_{p,v} \cdot k_t}{T_i}}}$$

A parità quindi dei valori di  $k_p$  e  $k_t$ , scelto il valore per  $T_i$  – dipendente dalla banda passante desiderata – anche lo smorzamento è funzione di momento d'inerzia e attrito viscoso.

Un valore ragionevole per l'attrito viscoso è dato dalla relazione:

$$b = J \cdot \omega_{B,v_{des}}$$

ove  $\omega_{B,v_{des}}$  è la banda passante desiderata dell'anello di velocità, ottenibile dalla relazione:

$$\tau_{v_{des}} = \frac{1}{\omega_{B,v_{des}}}$$

in cui  $\tau_{v_{des}}$  è la costante di tempo desiderata per l'anello di velocità.

Si nota dunque come un aumento del momento d'inerzia imponga di accrescere il guadagno proporzionale del controllore di velocità, e parallelamente lo smorzamento.

In ultima, la scelta del tempo dell'azione integrale – come accennato poco sopra – è dipendente dalla banda passante desiderata dell'anello di velocità secondo la relazione:

$$T_i = \frac{\alpha}{\omega_{B,v_{des}}}$$

con valori di  $\alpha$  generalmente compresi tra tre e dieci.



## CAPITOLO QUATTRO

### CONCLUSIONI

L'*Electronic Line Shafting* nasce come tecnica di controllo atta a garantire il sincronismo in sistemi multi-asse, in particolare a fronte di perturbazioni del moto di uno di essi. Viene proposta quindi come evoluzione del sistema *Master Slave*, dai limiti noti.

Lorenz afferma che la creazione di un albero virtuale, che simuli la funzione coordinatrice di un collegamento fisico tra i vari assi, possa svolgere molto bene tale funzione. Ci si attende quindi un risultato paragonabile a quello di un sistema meccanico in termini di sincronismo, semmai migliore in termini di dinamica.

#### 4.1 Principali limiti

Si nota come, pur a fronte di un'idea di fondo più che valida, la tecnica oggetto della presente trattazione non sia soddisfacente nella casistica investigata nel presente lavoro di tesi, la quale mira a rappresentare verosimili situazioni in cui il sincronismo è minacciato dalla presenza di disturbi esterni imprevisti.

Va sottolineato che i casi prevalentemente investigati da Lorenz, in cui si dimostrava l'efficacia dell'*Electronic Line Shafting*, erano caratterizzati prevalentemente da saturazioni degli attuatori, mentre in questa sede ci si interessa particolarmente su disturbi esterni qui adottato.

L'analisi critica della formulazione proposta da Lorenz e dei risultati numerici ottenuti hanno evidenziato alcune carenze concettuali notevoli.

La prima è l'inserimento del termine di attrito viscoso – nella realizzazione di Lorenz – come termine proporzionale di controllo dell'albero virtuale. La scelta crea due differenti svantaggi.

Il primo risiede in un mutamento della sua funzione di trasferimento. In formule, nel dominio delle trasformate di Laplace la funzione di trasferimento ingresso-uscita in termini di velocità dell'albero virtuale risulta:

$$W(s) = \frac{1 + s \cdot T_i \cdot b}{1 + s \cdot T_i \cdot b + J \cdot T_i \cdot s^2}$$

mentre scindendo il guadagno proporzionale dall'attrito ed inserendo quest'ultimo nel termine d'impedenza meccanica risulta:

$$W(s) = \frac{1 + s \cdot T_i}{1 + s \cdot T_i \left(1 + \frac{b}{k_p}\right) + \frac{J \cdot T_i}{k_p} s^2}$$

ove  $T_i$  è il tempo dell'azione integrale,  $b$  è l'attrito viscoso,  $k_p$  il guadagno proporzionale e  $J$  il momento d'inerzia.

Si nota come nel secondo caso l'attrito viscoso vada esclusivamente a denominatore della f.d.t., nel primo compaia anche a numeratore. La conseguenza è un'influenza di tale parametro non solo sulla frequenza dei poli, ma anche su quella dello zero.

Il secondo svantaggio è una dipendenza funzionale – d'identità – del guadagno proporzionale dall'attrito viscoso, ove sarebbe utile poterli variare in maniera indipendente al fine di trovare la miglior sintonizzazione. Ciò risulta utile nella

taratura della funzione di trasferimento avente come ingresso la coppia di disturbo degli assi reali e come uscita la velocità dell'albero virtuale:

$$W(s) = \frac{s \cdot T_i}{1 + k_p \cdot T_i \cdot s + J \cdot T_i \cdot s^2}$$

Il valore del momento d'inerzia, come visto nel precedente capitolo, influenza profondamente il comportamento dinamico dell'albero virtuale: a seconda che il suo valore sia alto o basso predilige il rispetto di una o dell'altra specifica desiderata – inseguimento del riferimento oppure sincronismo.

Una scelta di tale valore che realizzi un buon compromesso tra queste due esigenze è molto difficile, tenendo anche conto che da tale valore dipendono a loro volta i valori di altri parametri.

Anche la sintonizzazione dei valori di controllo – proporzionale ed integrale – di tale albero è un'impresa ardua. Si vuole sottolineare come l'autore stesso, in nessuno dei suoi articoli, suggerisce regole o criteri per la sintonizzazione del controllore e dei parametri “fisici” dell'albero virtuale.

Un controllo “aggressivo” caratterizzato da alto guadagno e banda passante elevata tende a garantire il rispetto delle specifiche di posizione e velocità a scapito del sincronismo, visto l'elevato valore dell'attrito viscoso che ne deriva – ed il conseguente smorzamento. Un controllo “dolce” caratterizzato da guadagno esiguo e banda passante modesta non garantisce il rispetto delle specifiche di posizione e velocità, dando luogo a sovraelongazioni notevoli durante i transitori a causa del basso attrito viscoso. Non favorisce neppure il sincronismo, riducendo al massimo – e di poco, comunque – la durata dei transitori.

Si fa sentire in tal contesto il problema insito nel confondere guadagno proporzionale e attrito viscoso: vi è l'impossibilità di attuare un controllo “aggressivo” con smorzamento viscoso basso, o viceversa.

Un'altra lacuna dell'*Electronic Line Shafting* risiede nel non considerare solamente la coppia di disturbo applicata agli assi fisici – i.e. la differenza tra la coppia motrice totale e la coppia di inerzia dell'asse fisico – bensì il valore della coppia totale erogata. Questo rappresenta un limite da in primis all'atto di avvio della macchina, pur in condizioni ideali di assenza di disturbi esterni, l'asse virtuale risente dei carichi inerziali degli assi reali e avrà un suo transitorio.

Ciò provoca l'indesiderato effetto di un rallentamento dell'albero virtuale a causa del carico inerziale da esso visto, cioè proprio tale valore.

Un altro problema è che, la tecnica non considera mai esplicitamente l'errore di sincronismo o qualche variabile ad esso riconducibile – e.g. l'errore di inseguimento del singolo asse – che di fatto è la variabile da controllare.

Infine si è visto come il caso di due disturbi di valore opposto non venga riconosciuto dall'albero virtuale, dal momento che la risultante dei valori di coppia di disturbo applicata è nulla. Questo limite è comune anche alla realizzazione meccanica, e trae origine dall'imitazione del comportamento di un albero fisico.

Queste critiche sono supportate dai risultati ottenuti mediante simulazione: il modello utilizzando l'*Electronic Line Shafting* commette un errore di posizione maggiore a quello commesso in caso di sistema *Master Slave* e un errore di velocità approssimativamente eguale. Inoltre il transitorio iniziale dovuto ai carichi inerziali è di molto maggiore con la prima tecnica che con la seconda.

## 4.2 Possibili migliorie

Si è visto come in generale non sia possibile, con la formulazione originale dell'*Electronic Line Shafting*, ottenere un buon sincronismo tra gli assi e il rispetto delle specifiche di posizione e velocità nella fase iniziale nelle condizioni investigate nel presente lavoro. Sono perciò proposte e brevemente discusse alcune possibili rimedi e migliorie da apportare alla tecnica, la cui filosofia di base è, indubbiamente, corretta.

Una prima modifica è data dal riportare all'albero virtuale solo il valore del disturbo di coppia applicato agli assi reali –privo quindi del termine inerziale – riducendo pertanto a zero il valore del feedback di coppia a tale albero in condizioni di regime nominale. Questo ridurrebbe drasticamente il suo rallentamento iniziale, dovuto all'applicazione dei carichi inerziali.

Una tecnica utile a questo contesto va sotto il nome di *disturbance observer*, la quale si prefigge l'obiettivo di stimare il disturbo, che di fatto è la causa della perdita di sincronismo. Tale stima si può ricavare a partire dalle relazioni:

$$\tau_m = J \cdot \ddot{\theta} + \tau_{dist}$$
$$\hat{\tau}_{dist} = \hat{\tau}_m - J \cdot \frac{d\ddot{\theta}}{dt}$$

In cui le variabili contrassegnate dal “cappello” sono i valori stimati.

Un'ulteriore alternativa è data dalla ponderazione del valore della coppia di disturbo per una qualche funzione dell'errore di sincronismo o di inseguimento del singolo asse:

$$\tau_L = \hat{\tau}_{dist} \cdot f(err)$$

Una possibile soluzione al fallimento della tecnica in caso di doppio disturbo “mascherato” da una risultante nulla è lo stabilire una priorità tra asse rallentato e asse accelerato: ciò equivale a decidere se rallentare o accelerare l'intero sistema. Una volta stabilita l'operazione da fare – la prima è più agilmente realizzabile – si forza il sistema a riprendere il sincronismo, il quale è tuttavia ormai compromesso.

L'utilizzo tuttavia della formulazione precedentemente proposta, basata sull'errore e sulla coppia di disturbo, rende poco probabile il totale mascheramento dei due disturbi. Inoltre, agendo opportunamente sulla relazione tra segno dell'errore e della coppia stimata, si ha un'ulteriore leva di azione per ovviare a tale evenienza.

Infine, un possibile miglioramento sta nella definizione del modello “fisico” dell'albero virtuale, per il quale è possibile definire – oltre ad un attrito viscoso – un'inerzia adattativa. Pure il ricorso ad un feedforward di velocità e di accelerazione nel controllo di tale albero consente di ridurre il transitorio iniziale.

Si conclude la presente trattazione sottolineando la validità concettuale dell'idea alla base della tecnica discussa, e al contempo la possibilità di affinarla concettualmente al fine di un notevole progresso in questo campo.

## BIBLIOGRAFIA

### Riferimenti a testi:

- i. Ceccarelli M., Viadero F., 2013, *New Trends in Mechanisms and Machine Science: Theory and Application in Engineering*, London, UK, Springer-Verlag
- ii. Magnani P. L., Ruggieri G., 1986, *Meccanismi per Macchine Automatiche*, Torino, Italia, Utet
- iii. Maggiore A., Meneghetti U., 2010, *Lezioni di meccanica applicata alle macchine*, Bologna, Italia, Pàtron
- iv. Astrom K. J., Murray R. M., 2008, *Feedback Systems, An introduction for scientists and engineers*, Princeton, NJ, Princeton University Press
- v. Lorenz R. D. Valenzuela M. A., 2001, *Electronic Line-Shafting Control for Paper Machine Drives*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, n. 1, pp. 158-164
- vi. Anderson R. G., Lorenz R. D., Meyer A. J., Valenzuela M. A., 2001, *Web Machine Coordinated Motion Control via Electronic Line-Shafting*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, n. 1, pp. 247-254
- vii. Alvarez R., Cervantes I., Nunez C., Perez Pinal F., 2004, *Comparison of Multi-motor Synchronization Techinques*, The 30<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1670-1675
- viii. Lemmens J, Driesen J, 2012, *Synchronization and Efficiency Analysis of a Direct-drive Multi-motor Application*, 6<sup>th</sup> IET International Conference on Power Electronics, Machine and Drives, pp.1-6

- ix. Richiedei D., 2012, *Synchronous Motion Control of a Dual-Cylinder Electrohydraulic Actuators Through a Non-Time Based Scheme*, CEAI, vol. 14, n.4, pp. 80-89
- x. Richiedei D., 2012, *Dispense del corso di Controllo dei Sistemi Meccanici: "Camme Elettroniche"*, Università di Padova
- xi. Zigliotto M., 2012, *Dispense del corso di Fondamenti di Macchine ed Azionamenti Elettrici*, Università di Padova
- xii. Oboe R., 2012, *Dispense del corso di Controlli Automatici*, Università di Padova
- xiii. Antonello R., 2010, *Dispense del corso di Control Systems Design*, Università di Padova
- xiv. Accomando R., 2008, *Meccatronico è Meglio*, Automazione Oggi, n. 319, pp. 134-136

#### Riferimenti al web<sup>16</sup>:

- i. Machine design: mechanically or electronically shafting ([www.machinedesign.com](http://www.machinedesign.com)), 24 luglio 2013
- ii. Mechatronics Design ([www.controleng.com](http://www.controleng.com)), 24 luglio 2013
- iii. Indramotion ([www.boschrexroth.com](http://www.boschrexroth.com)), 12 settembre 2013
- iv. SIMOTION ([www.siemens.com](http://www.siemens.com)), 14 settembre 2013
- v. Machine Control ([www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com)), 17 settembre 2013
- vi. Electronic Line Shaft di SEW EURODRIVE ([www.sew-eurodrive.it](http://www.sew-eurodrive.it)), 17 settembre 2013
- vii. Electronic Line Shaft di Yaskawa ([www.yaskawa.com](http://www.yaskawa.com)), 17 settembre 2013

---

<sup>16</sup>Le informazioni circa le realizzazioni industriali contenute nella presente trattazione sono tratte da documenti disponibili on-line



## APPENDICE

### Parametri degli assi

```
clc
clear all
close all

% Current loop proportional gain [V/A]: KpI
% Current loop integral reaction time [s]: TnI
% Motor torque constant [N*m/A]: Kt
% Back emf constant [V*s/rad]: Kv
% Motor resistance [Ohm]: Ra
% Motor inductance [H]: La
% Total inertia [kg*m^2]: J
% Viscous damping [N*m*s/rad]: f
% Maximum Torque [Nm]: Cmax
% Maximum Voltage [V]: Vmax

%ANELLO DI CORRENTE
KpI=200;
TnI=2000;
Kt=0.95;
Kv=.54;
Ra=sqrt(3)*0.8;
La=sqrt(3)*8.6e-3;
J=0.00080*2;
f=1e-3;
C_cost=1; % Nm coppia esterna costante

sat=1;
if sat==1
    Imax=38;
    Vmax=230;
else
    Imax=inf;
    Vmax=inf;
end;
Cmax=Imax*Kt;

%ANELLO DI VELOCITA'
wbv=2*pi*120; %Banda passante [rad/s] dell'anello di velocità
Ti=10/wbv; %Tempo dell'azione integrale
Kpv=(wbv*J-f)/Kt; %guadagno proporzionale
Ttv=0.5e-3; %[s]

%ANELLO DI POSIZIONE
```

```

Kpp=wbv/4;
Ttp=1e-3; %[s]
Kip=0;

%ALBERO VIRTUALE

Jv=1*J; % Inerzia VLS
w_dis=2*pi*10; %banda passante
bv=1*Jv*w_dis; %Attrito viscoso VLS
Tiv=10/w_dis; %tempo azione integrale su VLS

%LEGGE DI CAMMA

p0 =0; %posizione iniziale
h =-pi/2; %alzata massima
v0 =0; %velocità iniziale
vf =0; %velocità finale
a0 =0; %accelerazione iniziale
af= 0; %accelerazione finale
t=0:0.001:5; %vettore temporale [s]

poly=poly5(p0,h,v0,vf,a0,af,t); %vettore polinomiale

plot(t,poly)
xlabel('time [s]')
ylabel('position [rad]')
title('Legge di camma polinomiale di quinto grado')
save('poly')

```

## Legge di moto polinomiale di quinto grado

```

function [pos,vel,acc]=poly5(p0,h,v0,vf,a0,af,t)
t0=t(1);
T=t(end)-t(1);

% calcolo coefficienti
coeff=zeros(6,1);
coeff(1)=p0;
coeff(2)=v0;
coeff(3)=a0/2;
coeff(4)=(20*h-T*(8*vf+12*v0)-T^2*(3*a0-af))/2/T^3;
coeff(5)=(-30*h+T*(14*vf+16*v0)+T^2*(3*a0-2*af))/2/T^4;
coeff(6)=(12*h-T*(6*vf+6*v0)-T^2*(a0-af))/2/T^5;

tr=t-t0;

% calcolo valori di posizione, velocità, accelerazione
pos=coeff(1)+coeff(2)*tr+coeff(3)*tr.^2+coeff(4)*tr.^3+coeff(5)*tr.^4+
coeff(6)*tr.^5;%pos=pos';
vel=coeff(2)+2*coeff(3)*tr+3*coeff(4)*tr.^2+4*coeff(5)*tr.^3+5*coeff(6)
)*tr.^4;%vel=vel';
acc=2*coeff(3)+6*coeff(4)*tr+12*coeff(5)*tr.^2+20*coeff(6)*tr.^3;%acc=
acc';
return

```



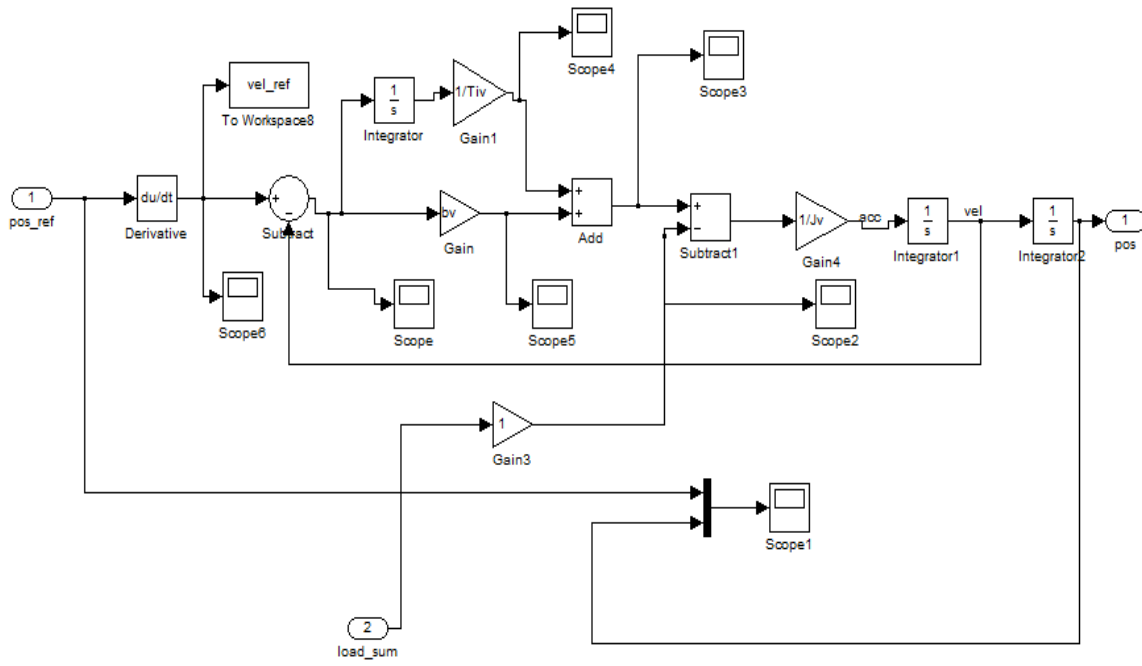


Fig. 56 - Modello dell'albero virtuale