

# Approccio multivariabile e multiobiettivo per l'industria dell'acciaio

Francesco Alessandro Cuzzola, Ivan Boriani

La presenza di diversi anelli di controllo in un processo complesso come quello di un treno di laminazione a caldo può implicare che le prestazioni vengano compromesse a causa della loro interazione. Per questo motivo l'approccio multivariabile viene adottato dalle maggiori aziende dell'industria dell'acciaio. Sfortunatamente le tecniche di controllo multivariabile applicate fino ad oggi soffrono del medesimo svantaggio ovvero che il controllore ha una struttura non trasparente e conseguentemente la sua messa in servizio può risultare difficoltosa. In questo articolo viene mostrato come si è risolto il problema attraverso una tecnica multiobiettivo che permette di tenere in conto in modo esplicito la presenza di limiti sugli attuatori e di dinamiche non lineari. Inoltre viene descritta l'applicazione della tecnica di controllo proposta ad un laminatoio a caldo per nastri stretti.

In questo articolo si esplora la possibilità di applicare tecniche di controllo multivariabile allo stadio finitore in un treno di laminazione a caldo. Nel treno finitore un importante ruolo è giocato da un braccio idraulico denominato creatore d'ansa o *looper* che ha lo scopo di mantenere il nastro d'acciaio ad una tensione costante e quindi evitare che disturbi possano provocare fluttuazioni dello spessore e della larghezza del nastro. Questo meccanismo è soggetto a dinamiche instabili che rendono il problema di controllo particolarmente complesso. Nella figura 1 viene visualizzata la struttura del singolo stadio del treno finitore che è composto da una gabbia di laminazione e da un creatore d'ansa. Il treno finitore è quindi costituito da una sequenza di 5-8 stadi come quelli visualizzati nella figura 1.

Il problema di controllo viene qui formulato in termini di un problema di controllo multivariabile allo scopo di compensare gli effetti di interazione fra le regolazioni di tre differenti variabili: la tensione del nastro d'acciaio; lo spessore del nastro d'acciaio; la posizione angolare del creatore d'ansa. Lo scopo finale è quello di ottenere attraverso un controllore multivariabile una migliore stabilità, un migliore tempo di risposta del sistema ed una migliore accuratezza. La storia dell'applicazione del controllo multivariabile al sistema meccanico visualizzato nella figura 1 risale agli anni '80 e numerosi studi si sono susseguiti negli anni. Attualmente il controllo multivariabile è adottato in questo contesto da tutte le più importanti aziende del settore dell'acciaio. Sfortunatamente il problema che il controllo multivariabile necessita una attenta fase di messa a punto in campo non è stato ancora effi-

cacemente risolto. Il problema principale consiste nel fatto che il controllo multivariabile non ha una struttura trasparente e la sua messa a punto può risultare di conseguenza complessa. Per esempio, il maggior punto debole dell'utilizzo di un classico controllore LQ in questo contesto è rappresentato

## Nomenclatura

Il pedice 0 verrà usato per indicare il valore nominale di una generica grandezza. Inoltre il simbolo  $\Delta$  è usato per indicare la variazione di una generica quantità rispetto al suo valore nominale. Per esempio  $H_0^i$  verrà usato per indicare il valore nominale di  $H^i$  mentre  $\Delta H^i = H^i - H_0^i$  è la sua variazione rispetto  $H_0^i$ .

$H^i$	Spessore del nastro in ingresso alla gabbia di laminazione $i$ -esima
$h^i$	Spessore del nastro in uscita alla gabbia di laminazione $i$ -esima
$V^i$	Velocità del nastro in ingresso alla gabbia di laminazione $i$ -esima
$v^i$	Velocità del nastro in uscita alla gabbia di laminazione $i$ -esima
$S$	Posizione della capsula idraulica della gabbia di laminazione
$\sigma$	Tensione del nastro nell'intergabbia
$w$	Larghezza del nastro
$\Sigma$	Tensione di ingresso alla gabbia
$\theta$	Posizione angolare del generatore d'ansa
$F$	Forza di laminazione
$\omega^i$	Velocità angolare dei rulli di lavoro della gabbia $i$ -esima
$M_{hyd}$	Coppia applicata dal cilindro idraulico agente sul generatore d'ansa
$T_v$	Costante di tempo del motore agente sulla gabbia di laminazione
$T_c$	Costante di tempo del cilindro agente sul generatore d'ansa
$T_{HGC}$	Costante di tempo del controllo idraulico sull'apertura della gabbia - Hgc (Hydraulic Gauge Control)
$M_r, M_a$	Masse del rullo e del braccio del generatore d'ansa.
$r$	Raggio del rullo del generatore d'ansa
$R$	Raggio dei rulli di lavoro della gabbia.

F.A. Cuzzola, Executive Manager, Research and Level 2 Automation;  
I. Boriani, Director - Flat Products Department, Danieli Automation SpA

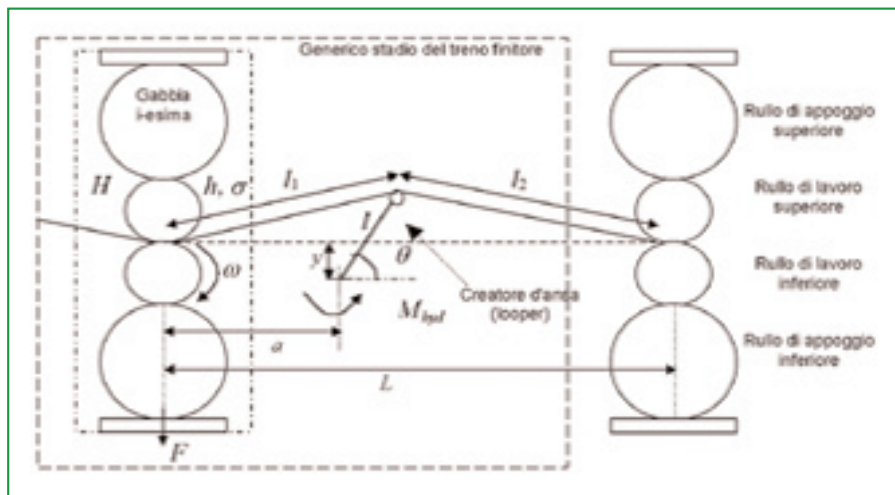


Figura 1 - La gabbia di laminazione e il creatore d'ansa che costituiscono il generico stadio di laminazione di un finitore all'interno di un treno di laminazione a caldo

dal fatto che non esistono criteri universali che assistano nella scelta della cifra di merito quadratica e che permettano di tenere conto di tutti i seguenti fattori: in caso il controllore ottimo non sia stato accuratamente messo a punto può generare delle sovraelongazioni rispetto al punto nominale di funzionamento per le quali l'assunzione di linearità delle dinamiche non è più verificata; in alcuni casi è necessario tenere conto di possibili saturazioni degli attuatori; un controllore ottenuto attraverso una cieca ottimizzazione è spesso intuitivamente incomprensibile e difficilmente adattabile alla realtà; molti parametri possono essere soggetti ad incertezza. In questo articolo considereremo la possibilità di risolvere il problema in tutti i suoi aspetti facendo ricorso a tecnologie di controllo che permettono di controllare un sistema nonlineare soggetto ad incertezza trattando il problema in termini di controllo multiobiettivo, si veda [2], [3]. In altre parole, il problema di controllo non viene formulato come un proble-

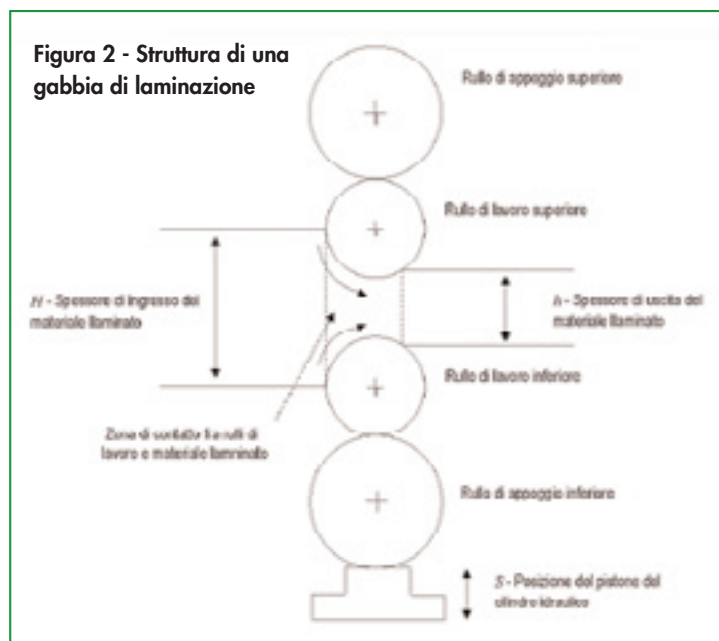


Figura 2 - Struttura di una gabbia di laminazione

ma di ottimizzazione la cui cifra di merito deve essere scelta sulla base di una verifica sperimentale ma in termini di una serie di vincoli che permettano di tenere conto dell'esistenza in modo esplicito di effetti dinamici nonlineari, della esistenza di vincoli di saturazione degli attuatori e della incertezza su alcuni parametri fisici.

### Modello matematico

In questo paragrafo presenteremo il modello matematico utilizzato per la sintesi del controllore. Il modello è composto da due sotto parti: il modello per il calcolo delle dinamiche all'interno dell'apertura della gabbia di lamina-

zione attraverso cui il nastro d'acciaio passa subendo una riduzione di spessore e il modello relativo alla dinamica del creatore d'ansa. Infine verrà discussa la rappresentazione in variabili di stato del modello.

#### Il modello della gabbia di laminazione

Nella laminazione a caldo il passo fondamentale per ottenere una corretta riduzione dello spessore dell'acciaio consiste nella predizione della forza di laminazione (F).

Questo può essere fatto attraverso un modello matematico che tiene conto dei fenomeni che agiscono nella zona di contatto fra rulli di lavoro e materiale laminato (si veda la figura 2) e che ha la seguente struttura:

$$F = b(H,h)w \left[ Y_s Q - \frac{\sigma + \Sigma}{2} \right], \quad b(H,h) = \sqrt{R(H-h)} \quad (1)$$

dove  $Y_s$  rappresenta il punto di snervamento della qualità di materiale considerato, Q e  $b(H, h)$  sono rispettivamente un fattore correttivo che tiene conto degli effetti dovuti alla geometria e la lunghezza dell'arco di contatto fra rullo di lavoro e materiale laminato.

Trascurando gli effetti del recupero elastico del materiale, è possibile stimare lo spessore del nastro d'acciaio attraverso la seguente formula:

$$h = S + \frac{F}{M_m} \quad (2)$$

dove  $M_m$  è la costante elastica della gabbia di laminazione (Mill Modulus).

#### Il modello del creatore d'ansa

Se  $J_L$  rappresenta l'inerzia totale del creatore d'ansa rispetto al suo punto di rotazione (che comprende l'inerzia del rullo posto sulla testa, del braccio e di un eventuale contrappeso del creatore d'ansa) si può affermare che la dinamica del creatore d'ansa è soggetta alla seguente legge:

$$\theta = \eta \quad (3.1)$$

$$\eta = \frac{1}{J_L} (M_{hyd} - \sigma B(\theta) - T_S - T_L + w_\eta) \quad (3.2)$$

dove il simbolo  $w_\eta$  è usato per rappresentare le incertezze dinamiche agenti sul creatore d'ansa (come l'attrito o la coppia di curvatura del nastro),  $M_{hyd}$  rappresenta la coppia prodotta dal cilindro idraulico che muove il creatore d'ansa,  $T_L$  e  $T_S$  rappresentano le coppie dovute al peso del creatore d'ansa e del nastro d'acciaio rispettivamente. Più esattamente valgono le seguenti relazioni:

$$T_S = l p g w h (l_1 + l_2) \cos(\theta) \quad (4.1)$$

$$T_L = l \left( M_r + \frac{M_a}{2} - M_{cw} \right) g \cos(\theta) \quad (4.2)$$

ed  $l_1, l_2$  sono le lunghezze del nastro d'acciaio messe in evidenza nella figura 1. Inoltre è necessario considerare la dinamica a cui è soggetta la tensione del nastro d'acciaio  $\sigma$ . Assumendo un comportamento elastico del nastro d'acciaio si può affermare che vale la seguente legge:

$$\sigma(t) = \begin{cases} wh \frac{E}{\xi(t)+L} (l_1(t)+l_2(t)-L-\xi(t)) & \text{se } l_1(t)+l_2(t)-L \geq \xi(t) \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (5)$$

dove  $\xi(t)$  rappresenta l'accumulo di massa d'acciaio tra una gabbia di laminazione e la successiva e quindi:

$$\xi = \bar{v}(t) + w_\xi(t) \quad (6)$$

dove

$$\bar{v}(t) = v^i(t) - V^{i+1}(t)$$

e  $w_\xi(t)$  rappresenta la dinamica non modellata.

*La rappresentazione in variabili di stato*

Il controllore multivariabile proposto si basa su alcuni controllori di basso livello: il più importante fra questi è denominato Hgc (Hydraulic Gauge Control). Quest'ultimo è il controllore che regola la posizione delle capsule idrauliche (S) della gabbia di laminazione e che quindi regola la posizione dei rulli di lavoro rispetto al nastro d'acciaio laminato. Tale controllore in ultima analisi regola l'apertura della gabbia di laminazione la quale determina la riduzione di spessore subita dall'acciaio quando questo attraversa la gabbia stessa (si veda la figura 2).

Questo sistema è soggetto ad una dinamica non trascurabile che può essere rappresentata in termini di una funzione di trasferimento del primo ordine con costante di tempo  $T_{HGC}$ . In altre parole si può ragionevolmente affermare che  $s$  varia in accordo con la seguente legge dinamica in funzione del segnale di riferimento  $S^{ref}$ :

$$S = -\frac{1}{T_{HGC}} S + \frac{1}{T_{HGC}} S^{ref} \quad (7)$$

Oltre all'Hgc esistono altri due controllori di base denominati Asr (Automatic Speed Regulator) ed Lcc (Looper Current Control). L'Asr ha lo scopo di regolare la velocità della gabbia di laminazione  $\omega^i$  ed il suo comportamento dinamico è rappresentabile da una funzione di trasferimento del primo ordine con costante di tempo  $T_V$ :

$$\omega^i = -\frac{1}{T_V} \omega^i + \frac{1}{T_V} \omega^{i,ref} \quad (8)$$

Allo scopo di rendere più comprensibile il contenuto del paragrafo successivo, è necessario evidenziare che se vale l'equazione (8)  $\bar{v}$  è soggetto a sua volta ad una legge dinamica ovvero:

$$\bar{v} = -\frac{1}{T_V} \bar{v} + \frac{1}{T_V} \bar{v}^{ref} \quad (9)$$

Ci focalizzeremo ora sull'Lcc. In generale il creatore d'ansa è controllato per mezzo di un cilindro idraulico comandato da una servovalvola il cui tempo di risposta è molto veloce. Nel caso la dinamica introdotta dall'Lcc non sia trascurabile vale la pena assumere che la coppia idraulica che impone il movimento al creatore d'ansa è anch'essa soggetta ad una dinamica del primo ordine:

$$M_{hyd} = -\frac{1}{T_c} M_{hyd} + \frac{1}{T_c} M_{hyd}^{ref} \quad (10)$$

Il controllore multivariabile viene sintetizzato a partire da un modello lineare ottenuto linearizzando le equazioni precedenti. Il vettore delle variabili di stato rappresentate dal simbolo  $x$ , è dato dalle variazioni rispetto al loro valore nominale delle seguenti variabili  $\{\theta, \eta, \sigma, S, \bar{v}, M_{hyd}\}$  (si vedano le equazioni (3), (5), (6), (7), (9) e (10)):

$$x = [\Delta\theta \quad \Delta\eta \quad \Delta\sigma \quad \Delta S \quad \Delta\bar{v} \quad \Delta M_{hyd}]^T$$

Il modello linearizzato attorno ad un punto di lavoro è quindi l'insieme di sei matrici di dimensioni opportune  $\{A, B_u, B_w, C_y, D_{yu}, D_{yw}\}$  che definiscono la relazione fra il vettore delle variabili di stato  $x$ , il vettore delle variabili misurate  $y$  ed il vettore delle variabili di controllo  $u$ :

$$\dot{x} = Ax + B_u u + B_w w \quad (11.1)$$

$$y = C_y x + D_{yu} u + D_{yw} w \quad (11.2)$$

dove  $w$  è il vettore dei disturbi e delle dinamiche non modellate ovvero (si vedano le equazioni (3.2) e (6)):

$$w = [w_\eta \quad w_\xi]^T \quad (12)$$

## Definizione del problema di controllo

L'approccio qui considerato si basa su un controllore dinamico basato su concetti di ottimizzazione multiobiettivo [3]. L'approccio proposto permette di sintetizzare un controllore dinamico del seguente tipo:

$$\begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c(p)x_c + B_c(p)y \\ u &= C_c(p)x_c + D_c(p)y \end{aligned} \quad (13)$$

dove  $x_c$  è il vettore di stato del controllore,  $y$  è il vettore delle grandezze misurate,  $u$  è il vettore delle variabili di controllo e  $\{A_c, B_c, C_c, D_c\}$  è una quadrupla di matrici di dimensioni congruenti che deve essere calcolata attraverso uno strumen-

carico computazionale dei metodi basati sulle equazioni di Hamilton-Jacoby-Isaacs (Hji). Sulla base della nostra esperienza e sulla base di una approfondita campagna di simulazione, si è formulato il problema di controllo multivariabile in termini della seguente lista di obiettivi:

- un vincolo di tipo  $H_2$  generalizzato imposto alla tensione del nastro d'acciaio nell'intergabbia è utile allo scopo di evitare eccessive elongazioni di tale variabile attorno al punto di lavoro che potrebbero invalidare l'ipotesi di linearità del sistema controllato;
- un vincolo di tipo  $H_\infty$  imposto sulle variabili controllate  $z$  permette di tenere in conto le limitazioni in frequenza degli attuatori. Inoltre fornisce robustezza verso le dinamiche non modellate;

Variabili controllate $z(\cdot)$	Variabili di controllo $u(\cdot)$	Variabili misurate $y(\cdot)$
$\Delta h$ Spessore di uscita del nastro	$\Delta S$ Posizione del cilindro idraulico agente sulla gabbia di laminazione	$\Delta F$ Forza di laminazione
$\Delta \sigma$ Tensione del nastro	$\Delta M_{hyd}$ Coppia idraulica prodotta dal cilindro idraulico agente sul creatore d'ansa	$\Delta \sigma/(wh)$ Tensione specifica del nastro
$\Delta \theta$ Posizione angolare del creatore d'ansa	$\Delta \omega$ (o equivalentemente $\Delta \bar{v}$ ) Velocità angolare dei rulli di lavoro della gabbia di laminazione	$\Delta \theta$ Posizione angolare del creatore d'ansa

to di sintesi opportuno. L'approccio scelto permette di far dipendere agevolmente le matrici del controllore  $\{A_c, B_c, C_c, D_c\}$  da alcuni parametri che variano fuori-linea e che sono indicate dal vettore di parametri  $p$  messo in evidenza nell'equazione (13) (si veda [2]). Questa caratteristica verrà approfondita nel Paragrafo *Implementazione software* dove viene discussa la progettazione dell'architettura di automazione. In questo vettore di parametri si considera: la larghezza nominale del nastro d'acciaio ( $w$ ), i valori nominali dello spessore del nastro in ingresso ed uscita ( $H_0$  e  $h_0$ ) e la posizione nominale del creatore d'ansa ( $\theta_0$ ) cioè:

$$p = [w, H_0, h_0, \theta_0]$$

Il controllore multivariabile dell'equazione (13) può essere utilizzato per controllare la struttura meccanica presentata nella figura 1 con diverse configurazioni a seconda delle peculiarità dell'impianto considerato. La configurazione completa corrisponde alla seguente definizione delle variabili controllate (vettore  $z$ ), di controllo (vettore  $u$ ) e misurate (vettore  $y$ ):

$$z = \begin{bmatrix} \Delta h \\ \Delta \sigma \\ \Delta \theta \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} \Delta F \\ \Delta \sigma \\ \Delta \theta \end{bmatrix}, \quad u = \begin{bmatrix} \Delta S^{ref} \\ \Delta M_{hyd}^{ref} \\ \Delta \omega^{ref} \end{bmatrix}$$

## L'approccio di sintesi del regolatore

In questo paragrafo viene descritto come l'approccio di controllo multiobiettivo riportato in [3] viene applicato al sistema di laminazione a caldo fino ad ora descritto. Tale tecnica appare estremamente flessibile per diverse applicazioni di controllo di sistemi anche non lineari e non soffre dei limiti di

- gli autovalori ad anello chiuso vengono vincolati ad essere in un settore stabile del piano complesso. In questo modo è possibile garantire una migliore stabilità e di conseguenza risulterà più facile la messa a punto dei parametri di prestazione del secondo punto;
- alcuni vincoli di tipo  $H_2$  generalizzato sono imposti anche alle variabili controllate  $u$  allo scopo di prevenire la saturazione degli attuatori
- un ulteriore vincolo di tipo  $H_\infty$  serve a garantire attraverso il principio del "Piccolo Guadagno" stabilità robusta verso incertezze sulla stima del Mill Modulus (si veda l'equazione (2)).

## Campagna di validazione

In questa sezione vengono proposti alcuni esperimenti basati su simulazioni allo scopo di paragonare l'approccio convenzionale basato su controllori Pid con l'approccio basato su un controllore multivariabile sintetizzato attraverso l'approccio multiobiettivo descritto nel paragrafo *L'approccio di sintesi del regolatore*. Tutti i dati che verranno proposti nel seguito fanno riferimento al laminatoio a nastri stretti di Sovel SA (Grecia).

### Controllo della tensione del nastro e della posizione angolare del creatore d'ansa

Nella campagna di simulazione che verrà descritta nel seguito si è considerato il caso in cui il controllore multivariabile ha lo scopo di regolare la tensione del nastro d'acciaio e la posizione del creatore d'ansa mentre il controllo di spessore è realizzato da una legge di tipo Pid. L'approccio di controllo convenzionale alternativo all'utilizzo del controllore multivariabile è basato su due controllori Pid separati. In questo paragrafo si propongono alcuni esperimenti che ci permetteranno di paragonare il sistema di controllo convenzionale con

quello basato sul controllore multivariabile: un disturbo a scalino agente sulla coppia applicata al creatore d'ansa  $\Delta M_{hyd}$ ; un disturbo sinusoidale agente sulla coppia applicata al creatore d'ansa  $\Delta M_{hyd}$ ;

*Disturbo a scalino agente sulla coppia applicata al creatore d'ansa*

Il disturbo a gradino che consideriamo agisce su  $\Delta M_{hyd}$  all'istante di tempo 0,1 s. mentre il controllore viene inserito in anello chiuso all'istante 0,3 s.

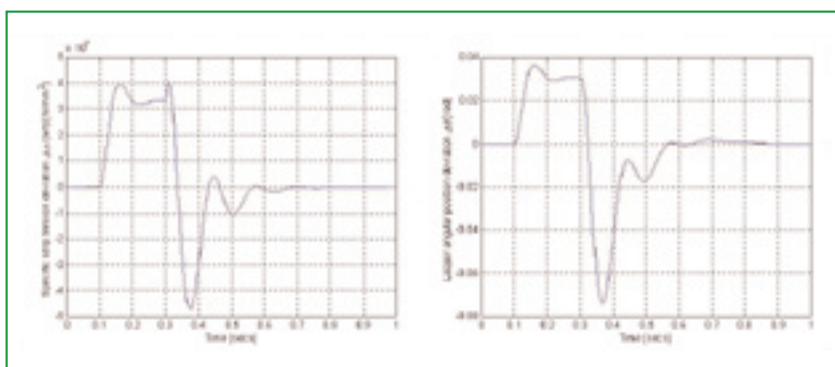
Nella figura 4 presentiamo i risultati ottenuti attraverso il controllore convenzionale basato sulle leggi di controllo Pid mentre nella figura 4 viene presentato il risultato prodotto dal controllore multivariabile.

*Disturbo sinusoidale agente sulla coppia applicata al creatore d'ansa*

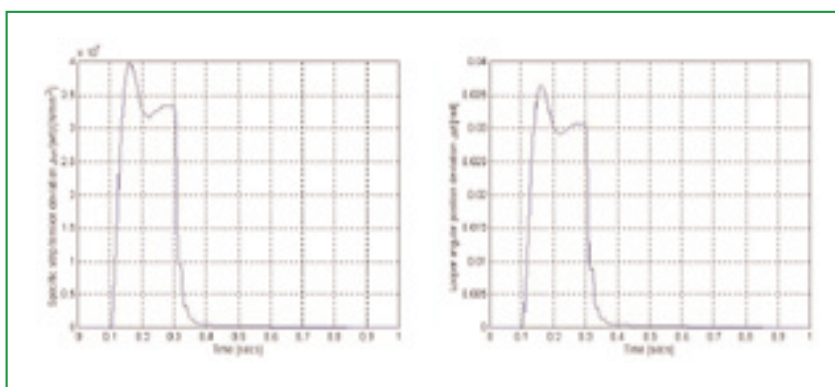
In questo secondo esperimento si considera un disturbo sinusoidale con frequenza di 100 rad/s agente sulla coppia applicata al creatore d'ansa  $\Delta M_{hyd}$ . Il controllore viene inoltre inserito in anello chiuso all'istante 0,3 s. come nel precedente esperimento. Nella figura 6 e nella figura 7 vengono proposti i transitori ottenuti attraverso il controllore convenzionale ed il controllore multivariabile rispettivamente.

**Implementazione**

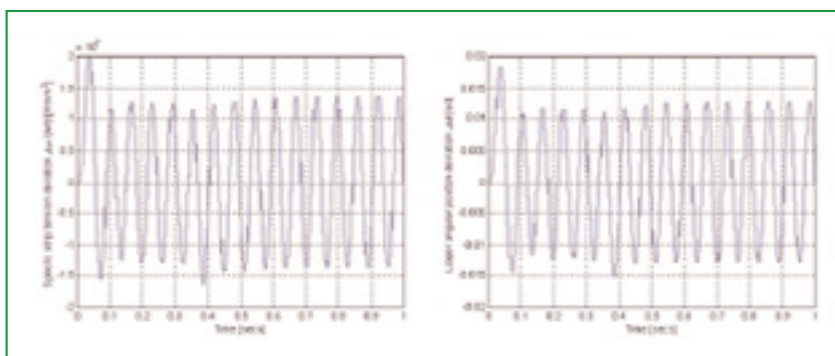
In questo paragrafo verrà descritta l'implementazione hardware e software sviluppata per l'impianto di Sovel SA per la produzione di nastri stretti. L'automazione fornita da Danieli Automation comprende un sistema di supervisione basato su PC (Livello 2 di automazione) che ha lo scopo di: produrre il setup per la macchina a partire da un modello matematico o da tabelle; calcolare i guadagni del controllo convenzionale e del controllore multivariabile; acquisire dati dal campo e adattare il modello matematico; gestire il database (storici, fermate d'impianto, parametri del modello, regole di conduzione del processo). Inoltre include un sistema di automazione tempo-reale (Livello 1 di automazione) denominato HiPac (Hi Performance Automation and Control) fondato su tecnologia Vme e programmato attraverso l'ambiente CoDeSys che si basa sullo standard di programmazione Iec 1131-3. L'anello di controllo gestito dal sistema è estremamente veloce ed ha un tempo di ciclo di 1 ms.



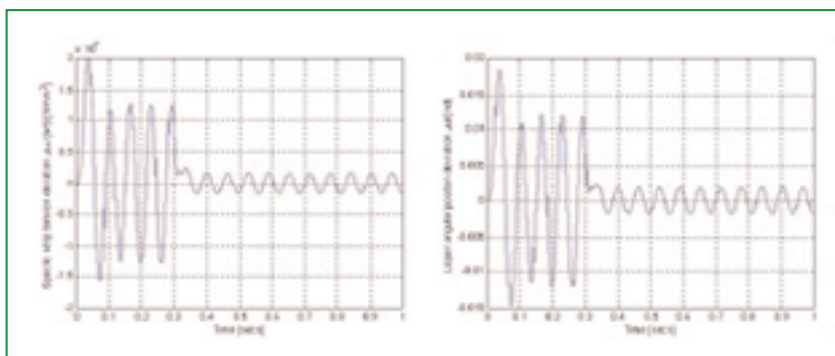
**Figura 3 - Compensazione di un disturbo a scalino agente sulla coppia applicata al creatore d'ansa  $\Delta M_{hyd}$  per mezzo del controllore convenzionale**



**Figura 4 - Compensazione di un disturbo a scalino agente sulla coppia applicata al creatore d'ansa  $\Delta M_{hyd}$  per mezzo del controllore multivariabile**



**Figura 5 - Compensazione di un disturbo sinusoidale agente sulla coppia applicata al creatore d'ansa  $\Delta M_{hyd}$  per mezzo del controllore convenzionale**



**Figura 6 - Compensazione di un disturbo sinusoidale agente sulla coppia applicata al creatore d'ansa  $\Delta M_{hyd}$**

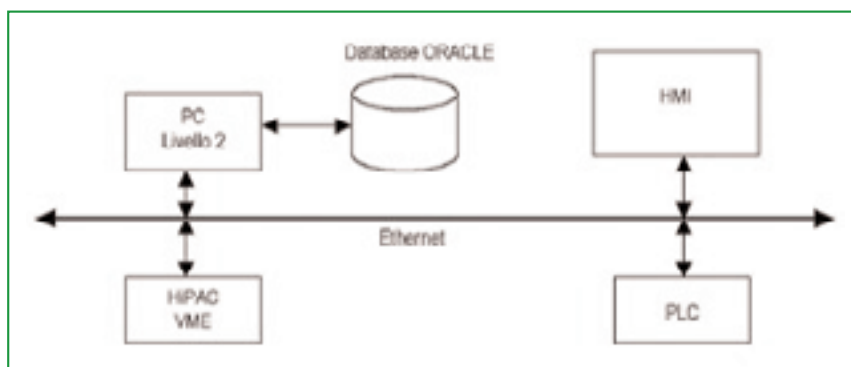


Figura 7 - Architettura hardware per l'automazione del treno a nastri stretti di Sovel SA

### Architettura hardware e software

L'architettura hardware del sistema di automazione visualizzata nella figura 8 ha lo scopo di calcolare le matrici che definiscono il controllo multivariabile (Livello 2 di automazione) sulla base delle caratteristiche primarie del prodotto che si vuole ottenere. Tali matrici vengono poi trasmesse al Livello 1 di automazione (Vme) attraverso comunicazione ethernet. Successivamente l'automazione di Livello 1 (Vme) ha la possibilità di acquisire nuovi dati per adattare il modello matematico e migliorarne le prestazioni di predizione del setup d'impianto. Un Plc inoltre viene utilizzato per mantenere traccia dello stato e della posizione del prodotto lungo tutto l'impianto. La comunicazione fra Livello 1 e Livello 2 di automazione viene realizzata attraverso un database di comunicazione tempo-reale denominato Rtds (Real Time Database Server) che permette di organizzare i dati in gruppi a seconda della loro semantica e della loro provenienza. Una Interfaccia Uomo-Macchina (Hmi) (si veda la figura 9) è disponibile per la gestione dell'impianto. Tale Hmi ha il compito di gestire le cinque gabbie del treno finitore in questo impianto costituito da: due gabbie di laminazione comandate da un vitone elettrico (le prime due); tre gabbie di laminazione comandata da un cilindro idraulico (le ultime tre); cinque creatori d'ansa. Il controllore multivariabile è applicato alle tre gabbie comandate idrauliche e ai due creatori d'ansa nell'intergabbia. Il resto dell'impianto è gestito solo dal controllo convenzionale.

#### Implementazione software

Le matrici del controllore multivariabile vengono calcolate in due stadi successivi: 1) una elaborazione fuori-linea condotta attraverso MatLab e basata sugli algoritmi descritti in [3] e [2] viene eseguita sulla base delle caratteristiche geometriche dell'impianto, 2) il Livello 2 di automazione (programmato in C++ e Delphi) acquisisce i dati prodotti dalla elaborazione MatLab e riadatta le matrici alle caratteristiche peculiari del prodotto da generare (si veda [2]) ogni volta che è necessa-

Questo articolo è stato premiato come migliore memoria del Convegno Anipla 2004.

rio generare un nuovo setup d'impianto. Più esattamente (equazioni (13) e (14) le matrici del controllore multivariabile vengono adattate in funzione dei seguenti dati: la larghezza nominale del nastro d'acciaio ( $w$ ), i valori nominali dello spessore del nastro in ingresso ed uscita alla gabbia di laminazione ( $H_0$  e  $h_0$ ) e la posizione nominale del creatore d'ansa ( $\theta_0$ ). Le matrici prodotte dal software di Livello 2 vengono così trasmesse al software di Livello 1. Tale software programmato attraverso CoDeSys in linguaggio Iec 1131-3 esegue il controllore multivariabile. Il software sviluppato in Iec 1131-3 ha

il compito di gestire tutte le seguenti funzionalità del controllore multivariabile: gestione della inizializzazione del controllore; esecuzione del controllo attraverso il metodo di integrazione Runge-Kutta; controllo della situazioni di errore e individuazione di possibili instabilità; gestione della commutazione bump-less tra controllore convenzionale e controllore multivariabile e viceversa; gestione della comunicazione con il Livello 2 e con il resto dell'automazione; simulazione dell'impianto per la taratura del controllo.

### Riferimenti

- [1] F.A. Cuzzola, I. Boriani, "Un approccio multivariabile e multiobiettivo per il controllo di treni di laminazione a caldo", *Atti del 48° Convegno Anipla*, Milano 2004.
- [2] P. Apkarian, R.J. Adams, "Advanced Gain Scheduling Techniques for Uncertain Systems", *Ieee Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 6, N. 1, 1998, pp. 21-32.
- [3] C.W. Scherer, P. Gahinet, M. Chilali, "Multiobjective output feedback control via Lmi optimization", *Ieee Transactions on Automatic Control*, Vol. 42, N. 7, 1997, pp. 896-911. ■



Figura 8 - Interfaccia Uomo-Macchina (Hmi) per l'impianto di laminazione a caldo