

# Valutazione delle prestazioni di regolatori industriali

Antonio Visioli

Viene presentata una panoramica delle varie metodologie per la valutazione delle prestazioni di regolatori industriali. In particolare si farà riferimento alle prestazioni sia di tipo stocastico (ovvero la capacità del regolatore di compensare disturbi di tipo aleatorio) che di tipo deterministico (ovvero la capacità del regolatore di inseguire il segnale di riferimento compensando eventuali disturbi sul carico) e si considereranno primariamente controllori di tipo PID, che sono di gran lunga i più utilizzati in ambito industriale.

Per garantire la sicurezza e la resa economica di un impianto è essenziale verificare continuamente che le prestazioni dell'impianto stesso soddisfino gli obiettivi prefissati. Il monitoraggio del processo rappresenta quindi un fattore chiave per una conduzione efficiente dell'impianto. In questo contesto è ovviamente importante verificare che il sistema di controllo fornisca prestazioni adeguate. Tuttavia, dal momento che in un impianto vi possono essere centinaia di anelli di controllo, è praticamente impossibile monitorare ognuno di essi manualmente da parte degli operatori. È quindi importante avere strumenti che siano in grado di riconoscere automaticamente l'occorrenza di situazioni anomale e quindi di aiutare gli operatori nel capirne la causa ed eventualmente suggerire le azioni più opportune per risolvere il problema (per esempio, se si riscontra una taratura inappropriata di un regolatore, dovrebbero essere forniti i parametri corretti). In questo articolo vengono presentate delle metodologie per la valutazione delle prestazioni degli anelli di controllo. Nonostante esse possano essere analizzate in un unico contesto [8], può essere opportuno per chiarezza dividerle in due categorie [16]: quelle relative alla verifica delle prestazioni stocastiche (dove è di interesse verificare la capacità del sistema di controllo di far fronte ai disturbi aleatori) e quelle relative alla verifica delle prestazioni deterministiche, in cui si considerano specifiche di progetto più tradizionali, come la risposta allo scalino sul segnale di riferimento e la compensazione di disturbi sul carico [1]. Particolare enfasi viene data a quest'ultimo caso ed all'utilizzo dei regolatori industriali di tipo Proporzionale-Integrale-Derivativo (PID), dal momento che si ritiene abbia la maggiore rilevanza dal punto di vista industriale.

La valutazione delle prestazioni di un anello di controllo è un compito complicato che dovrebbe in generale essere svolto secondo i passi seguenti [10]:

- un indice di prestazione viene determinato, in base ai dati disponibili, al fine di misurare la prestazione del sistema di controllo in funzione;
- viene selezionato un indice che rappresenta la prestazione

migliore, in modo da raffrontare ad esso la prestazione del sistema di controllo in funzione;

- viene calcolata la differenza tra i due indici, in modo da valutare se la prestazione del sistema in funzione è soddisfacente oppure se deve essere migliorata;
- se la prestazione attuale non è soddisfacente, ne viene diagnosticato il motivo. In generale questo è il compito più difficile, dal momento che vi possono essere molteplici cause per una prestazione insoddisfacente (ad esempio un progetto errato della struttura del controllore, una taratura errata di esso, un progetto errato della componentistica od un guasto di essa ecc.);
- vengono suggerite le opportune azioni correttive al fine di raggiungere la prestazione migliore.

Si può facilmente intuire come possano essere impiegate tecniche diverse per i diversi passi e come quindi esse debbano essere opportunamente integrate al fine di progettare una strategia complessiva che sia consistente.

## Valutazione delle prestazioni stocastiche

Molte delle tecniche messe a punto nel contesto del monitoraggio delle prestazioni sono relative alla valutazione della varianza dell'uscita del processo a seguito di disturbi di tipo stocastico, che si assume siano generati da un sistema dinamico con rumore bianco in ingresso. In questo contesto, i metodi proposti si basano sul concetto di controllo a minima varianza [16, 7], che è stato sviluppato per sistemi a tempo discreto. La prestazione di un dato controllore può quindi essere valutata in relazione alla sua distanza dalla minima varianza ottenibile. Ciò può essere fatto abbastanza facilmente se il ritardo del processo è noto. Allo scopo, un modello autoregressivo a media mobile (ARMA) del sistema in anello chiuso che ha il rumore  $w$  come ingresso e la variabile di processo  $y$  come uscita deve essere stimato a partire da una serie

temporale di dati di impianto:

$$y(t) = \sum_{i=1}^{n_y} a_i y(t-i) + \sum_{i=1}^{n_w} c_i w(t-i) + w(t),$$

dove  $(n_y, n_w)$  è l'ordine del modello, che può essere determinato per tentativi. Il modello ARMA ottenuto deve quindi essere convertito in un modello basato sulla risposta all'impulso (attraverso una lunga divisione) che deve essere troncato dopo i primi  $d-1$  coefficienti (si noti che i primi  $d$  termini sono invarianti rispetto al controllore):

$$y(t) = w(t) + \sum_{i=1}^{d-1} \psi_i w(t-i).$$

La minima varianza può quindi essere stimata come

$$\sigma_{MV}^2 = \left( 1 + \sum_{i=1}^{d-1} \psi_i^2 \right) \sigma_w^2,$$

dove  $\sigma_w^2$  è la stima della varianza del rumore. Il valore di  $\sigma_{MV}^2$  può quindi essere comparato con la stima della varianza dell'uscita  $\sigma_y^2$  che è data da:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y(i) - \bar{y})^2$$

dove  $\bar{y}$  è il valor medio dell'uscita del processo. Ciò può essere fatto attraverso il cosiddetto *Harris Index*, che è definito come [6]:

$$HI = \frac{\sigma_y^2}{\sigma_{MV}^2}.$$

Si può facilmente verificare che  $HI \in [1, +\infty)$ . In pratica, se si determina un valore di  $HI$  vicino a uno significa che la prestazione fornita dal controllore in opera è vicina a quella a minima varianza, mentre un valore elevato di  $HI$  può indicare la necessità di ritardare il controllore.

Sebbene sia interessante determinare quanto la prestazione raggiunta da un dato controllore sia lontana da quella a minima varianza, quest'approccio presenta vari inconvenienti che diminuiscono la sua valenza in molte situazioni pratiche [16]. Infatti, la minima varianza raggiungibile teoricamente  $\sigma_{MV}^2$  è invariante rispetto alla struttura del controllore e quindi rappresenta un limite minimo che potrebbe non essere raggiungibile da una data tipologia di controllore (ad esempio un PID). Dal punto di vista pratico quindi non è facile stabilire se ritardando il controllore (ovvero modificando il valore dei suoi parametri) si possa migliorare la prestazione oppure se sia necessario cambiare la struttura del controllore stesso. In altre parole, se anche risultasse un valore elevato dell'Harris Index, potrebbe non essere possibile migliorare la prestazione semplicemente ritardando il controllore. Seguendo lo stesso ragio-

namento, la valutazione della prestazione basata sul concetto di minima varianza non può essere applicata ai processi con ritardo variabile. In ogni caso è opportuno ripetere il calcolo dell'Harris Index con cadenza regolare a causa della variabilità dei disturbi e della dinamica del processo. Questo significa che una stima accurata del ritardo del processo deve essere ottenuta ogni volta.

Da un altro punto di vista, una prestazione stocastica soddisfacente potrebbe non essere compatibile con le prestazioni deterministiche richieste (per esempio relativamente all'inseguimento del set-point e della reiezione dei disturbi sul carico). In questo contesto è interessante notare che il controllore a minima varianza si basa sulla cancellazione polo-zero e non è quindi possibile considerare esplicitamente le specifiche relative all'inseguimento del set-point o alla reiezione dei disturbi sul carico, piuttosto che gestire il compromesso tra aggressività e robustezza.

Riassumendo, l'approccio a minima varianza è efficace soprattutto in presenza di processi con dinamica semplice (di ordine basso) e ritardo trascurabile (come ad esempio nel controllo di portata), quando la reiezione dei disturbi stocastici è di primaria importanza.

## Valutazione delle prestazioni deterministiche

Dal punto di vista pratico le specifiche di controllo sono spesso descritte in termini di prestazioni deterministiche come la massima sovraelongazione, il tempo di assestamento, e così via. Inoltre, anche la robustezza del sistema e l'energia del controllo devono essere tenute in conto e comunque bisogna considerare in generale il compromesso tra prestazioni stocastiche e deterministiche.

In generale, in relazione alle specifiche deterministiche, va considerato il fatto che una prestazione insoddisfacente può essere causata da vari fattori e vi è quindi la necessità di integrare tecniche diverse, ognuna delle quali gestisca una particolare situazione. Ovviamente, è opportuno che ogni tecnica si basi per quanto possibile su dati di impianto relativi alle normali operazioni del processo e che un modello del processo stesso non sia necessario, in modo da poter essere applicabile in generale. Nel paragrafo seguente vengono presentate diverse funzionalità finalizzate a riconoscere ed analizzare una particolare situazione. Esse verranno in seguito sfruttate per la valutazione delle prestazioni dei controllori PID.

## Funzionalità aggiuntive

### Rilevazione di oscillazioni

Una delle principali cause del deterioramento della qualità del prodotto di un processo (oltre che una delle principali cause di aumento del consumo di energia) è la presenza di oscillazioni in un anello di controllo. Le oscillazioni possono essere generate da diversi fattori ed è pertanto importante, oltre a rilevarne la presenza, stabilirne la causa in modo

automatico, al fine di poter prevedere le opportune azioni correttive sull'impianto.

Al fine di rilevare un'oscillazione persistente, una metodologia, la cui efficacia è già stata verificata in ambiente industriale, è stata proposta in [2]. Essa si basa su una procedura di rilevazione di un disturbo sul carico che consiste nel determinare l'integrale del valore assoluto dell'errore fra due istanti successivi  $t_{i-1}$  e  $t_i$  in cui l'errore di controllo attraversa il valore zero, ovvero:

$$IAE = \int_{t_{i-1}}^{t_i} |e(t)| dt.$$

Si ritiene che un disturbo sul carico si sia verificato se il valore di IAE supera una data soglia  $IAE_{lim}$ .

La procedura di rilevazione delle oscillazioni può essere in questa fase messa a punto verificando se il numero di accadimenti di disturbi sul carico supera la soglia di  $n_{lim} = 10$  in un dato intervallo di supervisione  $T_{sup} = 50T_u$ , dove  $T_u$  è il periodo ultimo del processo (alternativamente, si può fissare  $T_{sup} = 50T_i$ ). Quindi, se almeno  $n_{lim}$  disturbi sul carico sono rilevati durante l'ultimo intervallo di durata  $T_{sup}$ , viene concluso che un'oscillazione è presente.

Per una implementazione della procedura più efficace da un punto di vista pratico, è opportuno pesare esponenzialmente le rilevazioni ed utilizzare una procedura ricorsiva.

**Diagnosi delle oscillazioni**

Una volta che un'oscillazione è stata rilevata, è importante diagnosticarne le cause al fine di stabilire le opportune azioni correttive. Ci sono infatti diversi fattori possibili che possono causare un comportamento oscillatorio del sistema. Per esempio, un carico di tipo oscillatorio potrebbe fungere da disturbo per l'anello di controllo. In questo caso, se l'oscillazione ha una frequenza bassa (rispetto alla banda dell'anello chiuso) può essere facilmente compensata dal controllo in retroazione, mentre se ha una frequenza alta deve essere filtrata in modo appropriato dal controllore in modo da non essere trasferita all'attuatore che potrebbe alla lunga danneggiarsi. Il caso peggiore accade quando l'oscillazione ha una frequenza vicina alla frequenza critica dell'anello di controllo, dal momento che in questo caso essa potrebbe essere amplificata dall'anello di controllo stesso. In questo caso il controllore dovrebbe essere ritardato (oppure la causa dell'oscillazione dovrebbe essere eliminata).

Un'altra possibile causa di un comportamento oscillatorio di un anello di controllo è una taratura troppo aggressiva del controllore. Questo fatto implica che spesso l'operatore finisce con il fare un detuning del controllore quando rileva delle oscillazioni (indipendentemente dalla causa reale). Tuttavia, viene spesso sottolineato in letteratura come la ragione più frequente delle oscillazioni sia in realtà la presenza di un eccessivo attrito statico nelle valvole [2]. In questo caso, fare un detuning del controllore non è conveniente ed invece è necessaria un'opera di manutenzione delle valvole stesse.

Al fine di fornire strumenti efficaci per diagnosticare la

causa di un'oscillazione, diverse soluzioni sono state comunque proposte in letteratura (per esempio, [19, 18]).

**Rilevazione di disturbi eccitanti sul carico**

Oltre al rilevare la presenza di un disturbo sul carico è spesso necessario verificare se la sua dinamica è sufficientemente eccitante per l'anello di controllo. Ciò è di particolare importanza se viene utilizzata una legge di controllo adattativo, ma è anche utile nel contesto della valutazione delle prestazioni, come si vedrà nei paragrafi successivi.

Per rilevare l'accadimento di un disturbo brusco (cioè a scaglino o simil tale) si può applicare un'idea derivata dall'analisi presentata in [5]. Specificatamente, la variabile di controllo e la variabile di processo possono essere filtrate passa-alto, secondo l'espressione (per semplicità si adopera qui la trasformata di Laplace dei segnali):

$$U_{hp}(s) = \frac{s}{s + \omega_{hp}} U(s) \quad Y_{hp}(s) = \frac{1}{K} \frac{s}{s + \omega_{hp}} Y(s)$$

dove  $K$  è il guadagno del processo (che può essere stimato considerando i valori a regime dei segnali) che viene utilizzato per scalare i segnali in modo appropriato. La pulsazione  $\omega_{hp}$  può essere fissata in modo inversamente proporzionale alla costante di tempo dell'azione integrale  $T_i$ . Il disturbo sul carico viene quindi considerato brusco se i segnali così ottenuti superano una certa soglia che può essere fissata pari al 3% dell'ampiezza del disturbo, la quale può essere facilmente calcolata considerando i valori iniziale e finale di regime della variabile di controllo.

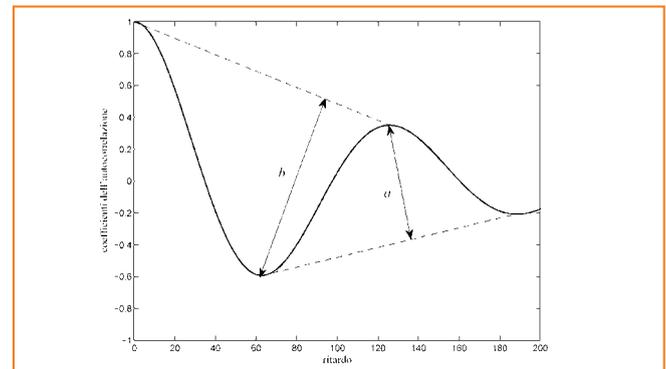


Figura 1 - Calcolo dell'indice di oscillazione  $R = a/b$

**Rilevazione di un controllore aggressivo**

La rilevazione di un controllore aggressivo può essere fatta mediante la rilevazione di un comportamento oscillatorio dell'anello di controllo in presenza di una brusca variazione del carico o del segnale di riferimento. A questo scopo un approccio statistico è stato proposto in [13]. Il metodo consiste nel calcolare l'autocorrelazione della variabile di controllo o dell'errore di controllo. I coefficienti dell'autocorrelazione sono calcolati come:

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (z(t) - \bar{z})(z(t+k) - \bar{z})}{\sum_{t=1}^N (z(t) - \bar{z})^2}$$

dove  $z(t)$ ,  $t = 1, \dots, N$  è la serie temporale analizzata e  $\bar{z}$  è il valore medio degli  $N$  campioni. Un indice di oscillazione è quindi calcolato come il rapporto di decadimento della funzione di autocorrelazione ottenuta. Esso è definito come:

$$R = \frac{a}{b}$$

dove  $a$  è la distanza tra il primo massimo e il segmento che connette i primi due minimi e  $b$  è la distanza tra il primo minimo e il segmento che connette il primo coefficiente della funzione di autocorrelazione con il primo massimo (cfr figura 1). Se vi sono meno di due minimi nella funzione di autocorrelazione allora il valore di  $R$  viene posto a zero. Un anello è considerato oscillatorio se il valore di  $R$  supera una certa soglia, ad esempio pari a 0,5.

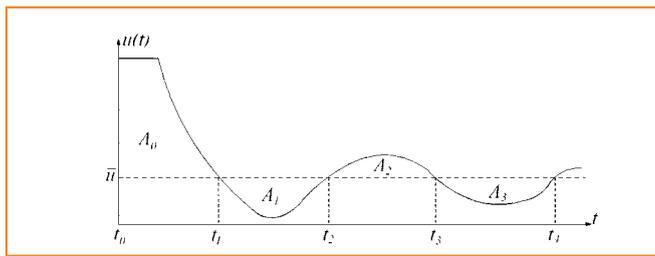


Figura 2 - Parametri significativi per il calcolo dell'Area Index

Un indice alternativo, chiamato l'Area Index (AI), il cui scopo è di fornire un fattore di smorzamento generalizzato, è stato proposto in [21]. Esso si basa sull'analisi del segnale di controllo  $u(t)$  che compensa una repentina variazione del segnale di disturbo sul carico  $d$  del processo. In particolare, il nuovo valore di regime raggiunto dal segnale di controllo dopo che il transitorio si è esaurito è denotato come  $\bar{u}$ . L'istante di tempo al quale avviene il disturbo sul carico è denotato come  $t_0$  (si noti che il suo valore non deve essere noto) e  $t_1, \dots, t_{n-1}$  sono gli istanti di tempo seguenti per i quali si ha  $u(t) = \bar{u}$ . Infine,  $t_n$  denota l'istante di tempo nel quale il transitorio si esaurisce e la variabile manipolabile raggiunge il nuovo valore di regime  $\bar{u}$ . Dal punto di vista pratico il valore di  $t_n$  può essere fissato come il tempo minimo dopo il quale  $u(t)$  rimane in un range dell'1% di  $\bar{u}$ . Le aree delimitate dalla funzione  $u(t)$  e da  $\bar{u}$  tra due istanti consecutivi  $t_i$  e  $t_{i+1}$  sono definite come:

$$A_i := \int_{t_i}^{t_{i+1}} |u(t) - \bar{u}| dt.$$

La notazione introdotta è rappresentata nella figura 2. L'Area Index AI è calcolato eliminando dapprima l'area  $A_0$ , ovvero l'area tra l'istante di tempo nel quale accade il disturbo sul carico ed il primo istante nel quale  $u(t) = \bar{u}$ . Quindi si determina il rapporto tra il valore massimo delle varie aree e la loro somma, tenendo presente che l'ultima area  $A_{n-1}$  deve essere esclusa dal calcolo dell'area massima. Nel caso in cui duran-

te il transitorio non si abbia mai  $u(t) = \bar{u}$ , oppure lo si abbia una sola volta, l'Area Index viene semplicemente posto a uno. Formalmente l'Area Index è quindi definito come:

$$AI := \begin{cases} 1 & \text{se } n < 3 \\ \frac{\max\{A_1, \dots, A_{n-2}\}}{\sum_{i=1}^{n-1} A_i} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Dalla formula (13) si può facilmente dedurre che il valore di AI è sempre compreso tra zero e uno. Più il valore di AI si avvicina a zero più l'anello di controllo è oscillatorio, mentre più il valore di AI si avvicina a uno più l'anello di controllo è lento.

Val la pena sottolineare ancora a questo punto che l'indice di oscillazione  $R$  e l'Area Index AI si basano sulla corretta stima di una brusca variazione del carico, per la quale può essere utilizzata una procedura come quella descritta al paragrafo precedente. In questo contesto la variazione si considera brusca quando la sua dinamica è molto più rapida di quella dell'anello chiuso.

#### Rilevazione di un controllore lento

Molto spesso in ambiente industriale non vi è il tempo di ottimizzare il progetto dei controllori durante l'installazione dell'impianto. I parametri vengono quindi fissati in modo molto conservativo al fine di evitare problemi di instabilità in caso di variazione delle condizioni operative.

Un metodo per rilevare automaticamente anelli di controllo lenti è stato proposto in [3] e discusso successivamente in [4, 12]. Esso si basa sul fatto che, in presenza di una brusca variazione del carico, una risposta lenta è caratterizzata dal fatto che la derivata prima dei segnali di controllo e dell'uscita del processo hanno lo stesso segno per un lungo intervallo di tempo. È quindi utile applicare al transitorio il calcolo seguente:

$$t_{pos} = \begin{cases} t_{pos} + T_c & \text{se } \Delta u \Delta y > 0 \\ t_{pos} & \text{se } \Delta u \Delta y \leq 0 \end{cases}$$

$$t_{neg} = \begin{cases} t_{neg} + T_c & \text{se } \Delta u \Delta y < 0 \\ t_{neg} & \text{se } \Delta u \Delta y \geq 0 \end{cases}$$

dove  $T_c$  è il tempo di campionamento e  $\Delta u$  e  $\Delta y$  sono rispettivamente gli incrementi della variabile manipolabile e dell'uscita del processo. Quindi, il cosiddetto Idle Index II può essere calcolato come

$$II = \frac{t_{pos} - t_{neg}}{t_{pos} + t_{neg}}$$

Dal momento che si basa sull'incremento dei segnali, la procedura è piuttosto sensibile al rumore, ed è quindi necessario filtrare appropriatamente i segnali [12]. In ogni caso è evidente che il valore di II è sempre nell'intervallo  $[-1, +1]$  ed un

valore positivo vicino a uno è indicativo di un sistema di controllo lento. Il problema relativo all'uso dell'Idle Index è che un valore vicino a -1 può significare sia che il controllore è tarato bene sia che l'anello di controllo è oscillatorio. È quindi necessario utilizzare un metodo di rilevazione delle oscillazioni assieme all'Idle Index.

*Miglior prestazione ottenibile per sistemi a singolo anello*

La prestazione ottima ottenibile in termini di minimizzazione dell'integrale del valore assoluto dell'errore per la risposta al set-point è stata analizzata in [9]. In particolare, vengono considerate una funzione di trasferimento generale di un controllore

$$C(s) = \frac{K_c(a_m s^m + a_{m-1} s^{m-1} + \dots + a_1 s + 1)}{s(b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + 1)}$$

ed una funzione di trasferimento generale di un processo

$$P(s) = \frac{K(\tau_m s^m + \tau_{m-1} s^{m-1} + \dots + \tau_1 s + 1)}{T_n s^n + T_{n-1} s^{n-1} + \dots + T_1 s + 1} e^{-Ls}$$

La funzione di trasferimento di anello  $L(s) := C(s)G(s)$  che minimizza l'indice di prestazione

$$J = \int_0^\infty |e(t)| dt$$

è determinata mediante il metodo del semplice. Se viene considerata una funzione di trasferimento di anello del primo ordine, la funzione di trasferimento ottima risulta:

$$L^*(s) = \frac{0.76(1 + 0.47Ls)}{Ls}$$

Il valore ottimo del corrispondente integrale del valore assoluto dell'errore è  $J^* = 1,377 L$ .

Analogamente, se si considera una funzione di trasferimento del secondo ordine, il metodo di ottimizzazione fornisce come risultato  $J^* = 1,314 L$ . Quindi, per una funzione di trasferimento del terzo ordine si ha  $J^* = 1,310 L$ . Vedendo che il valore ottimo dell'integrale del valore assoluto dell'errore non desce aumentando l'ordine della funzione di trasferimento di anello si può concludere che il valore minimo dell'integrale del valore assoluto dell'errore ottenibile da un sistema di controllo in retroazione unitaria è  $J^* = 1,31 L$ .

Nel caso il processo abbia una dinamica del primo ordine più ritardo o del secondo ordine più ritardo la funzione di trasferimento ottima è quella dell'espressione (20) e pertanto il valore ottimo ottenibile dell'integrale del valore assoluto dell'errore è  $J^* = 1,38 L$ .

Applicando un ragionamento simile si trovano le espressioni delle prestazioni ottime per un PI e per un PID applicati ad un processo del primo e del secondo ordine più ritardo (tali

espressioni dipenderanno dai parametri del modello del processo). Le prestazioni di un dato controllore (PID) possono quindi essere valutate facilmente comparando il valore dell'integrale del valore assoluto dell'errore ottenuto con quello ottimo ottenibile.

*Valutazione della taratura di un PID*

In casi pratici è molto utile verificare la bontà della taratura di un PI(D) al fine di verificare se sia necessario ritarlo. Ovviamente, la verifica deve essere fatta relativamente alle specifiche di controllo dal momento che, per esempio, ottenere una prestazione soddisfacente nella reiezione ai disturbi sul carico richiede una taratura differente in generale da quella richiesta per ottenere una prestazione soddisfacente nell'inseguimento del set-point. Inoltre, diversi tipi di dati di impianto potrebbero essere disponibili ai fini della valutazione delle prestazioni, ragion per cui vi è la necessità di avere tecniche diverse da applicare in contesti diversi. Alcune di esse sono presentate nel seguito.

Classe	$T_s$	$IAE_d$	sovravelongazione
Prestazione elevata	$\leq 4.6$	$\leq 2.8$	*
Troppo lento	$> 13.3$	$> 6.3$	$\leq 10\%$
Tarato male	$> 13.3$	$> 6.3$	$> 10\%$

**Tabella 1 - Classificazione delle prestazioni di inseguimento del set-point di un controllore PI**

*Valutazione basata sulla risposta allo scalino*

Il metodo proposto in [17] si basa sull'analisi dei dati della risposta allo scalino e si riferisce alla valutazione delle prestazioni di un controllore PI relativamente all'inseguimento del set-point. La filosofia dell'approccio è quella di comparare la prestazione ottenuta con quella di un PI tarato secondo il metodo del controllo a modello interno [14].

In questo contesto si valutano due indici, ovvero il tempo di assestamento adimensionale  $T_s$  e l'integrale del valore assoluto dell'errore adimensionale  $IAE_d$ . Formalmente essi sono definiti come:

$$T_s := \frac{t_s}{L}$$

dove  $L$  è il ritardo del processo e  $t_s$  è il tempo di assestamento misurato (definito come il tempo richiesto dall'uscita del processo per raggiungere e rimanere in un range del  $\pm 10\%$  dell'ampiezza  $A$  dello scalino in ingresso) e

$$IAE_d := \frac{IAE}{|A|L}$$

dove  $IAE$  è la misura dell'integrale del valore assoluto dell'errore. Basandosi sui valori di  $T_s$  e  $IAE_d$  che si ottengono col metodo del controllo a modello interno, si è costruita la tabella 1 che permette di classificare la prestazione del controllore PI impiegato (si noti come anche la sovravelongazione registra-

ta sia utilizzata come indice di prestazione). Vale la pena sottolineare che il metodo è utile anche in quelle situazioni in cui risulta una prestazione elevata ma le specifiche di controllo non sono soddisfatte. In questo caso si può concludere che il controllore PI non è sufficiente e si deve considerare un controllore di struttura più complessa.

*Approccio basato sul controllo a relè*

Un metodo per la verifica delle prestazioni di inseguimento del set-point da parte di un PI è stato proposto in [20]. Esso si basa sull'analisi della forma dell'uscita del processo quando un relè è connesso in serie con un controllore PI standard in uno schema di controllo in retroazione unitaria (cfr figura 3). Valutando la forma d'onda ottenuta in uscita si può valutare la prestazione ottenuta dal controllore e soprattutto ritrarlo al fine di raggiungere la prestazione ottima (in termini di integrale del valore assoluto dell'errore nella risposta allo scalino sul set-point).

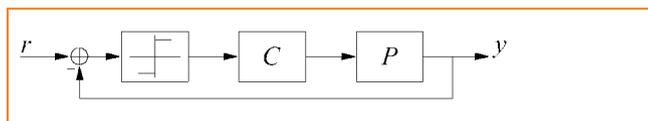
Valore di <i>AI</i>	Valore di <i>II</i>	Valutazione della taratura
elevato	elevato	$K_p$ troppo basso, $T_i$ troppo elevato
elevato	basso	$K_p$ troppo basso
medio/elevato	medio	$K_p$ troppo basso, $T_i$ troppo basso
medio	basso	$K_p$ ok, $T_i$ ok
basso	medio/elevato	$T_i$ troppo elevato
basso	basso	$K_p$ troppo elevato e/o $T_i$ troppo basso

**Tabella 2 - Regole per la valutazione della taratura di un controllore PI**

*Valutazione delle prestazioni di reiezione dei disturbi sul carico*

Una tecnica per la valutazione delle prestazioni di reiezione dei disturbi sul carico di un controllore PI (ancora in termini di integrale del valore assoluto dell'errore *IAE*) è stata proposta in [21]. Essa si basa sull'analisi dell'Area Index e dell'Idle Index quando si rileva una brusca variazione del carico. Come risultato si hanno delle indicazioni su come migliorare la taratura del controllore.

È evidente infatti che un controllore ben tarato fornisce un valore negativo vicino a -1 dell'Idle Index e allo stesso tempo un valore non troppo piccolo dell'Area Index, dal momento che ciò significa che l'anello di controllo non è né troppo lento né troppo aggressivo. Valutare contemporaneamente i due indici può tuttavia fornire utili indicazioni su come migliorare la taratura. In questo contesto, si sono ricavate le regole riportate nella tabella 2 che indicano come (eventualmente) ritrarre il controllore PI. Il valore dell'Area Index è considerato basso se è minore di 0,35, medio se  $0,35 < AI < 0,7$  e elevato se è maggiore di 0,7. Il valore dell'Idle Index è considerato basso se è minore di -0,6, medio se  $-0,6 < II < 0$  e elevato se è maggiore di zero. Una discussione dettagliata di queste regole, assieme a vari risultati illustrativi, è riportata in [21].



**Figura 3 - Schema per la valutazione delle prestazioni di un controllore PI basata sull'uso di un relè in retroazione**

*Discussione*

Dall'analisi presentata si può facilmente evincere che ci sono diversi metodi per diverse specifiche di prestazioni. In casi pratici è quindi necessario selezionare la metodologia adatta all'applicazione.

In ogni caso bisogna sottolineare che le tecniche più consolidate sono relative all'utilizzo di un controllore PI per processi la cui dinamica è del primo ordine più ritardo (nonostante si sia dimostrato che esse sono robuste rispetto alle inaccurattezze del modello).

Vi è quindi sicuramente la necessità di ideare nuove tecniche che trattino esplicitamente controllori di tipo PID e processi con dinamica più complessa come i processi di tipo integrale e quelli oscillatori.

**Conclusioni**

In questo articolo si è trattato il problema della valutazione delle prestazioni di un sistema di controllo. È stato evidenziato come diverse metodologie siano disponibili a seconda delle diverse esigenze operative. È quindi necessario prevedere l'utilizzo di strumenti automatici che integrino varie funzioni, ognuna dedicata ad un particolare aspetto del problema.

I metodi trattati in questo articolo sono spiegati più in dettaglio in [22]. In letteratura sono comunque presenti molti lavori sul tema e lo sforzo dei ricercatori in questo campo è in costante aumento negli anni recenti. Per un approfondimento in materia si consiglia l'eccellente rassegna riportata in [10]. Altre rassegne relative all'approccio a minima varianza si trovano in [16, 7] mentre discussioni che evidenziano gli aspetti più industriali sono riportate in [11, 15].

**Riferimenti**

[1] P.G. Eriksson, A. J. Isaksson, "Some aspects of control loop performance monitoring", in *Proceedings IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 1029-1034, Glasgow, UK, 1994.  
 [2] T. Hagglund, "A control-loop performance monitor", *Control Engineering Practice*, 3, pp. 1543-1551, 1995.  
 [3] T. Hagglund. "Automatic detection of sluggish control loops". *Control Engineering Practice*, 7, pp. 1505-1511, 1999.  
 [4] T. Hagglund, "Industrial applications of automatic performance monitoring tools", In *Preprints of the 15th IFAC World Congress on Automatic Control*, Barcelona, E, 2002.  
 [5] T. Hagglund, K. J. Astrom. "Supervision of adaptive control algorithms", *Automatica*, 36(2), pp. 1171-1180, 2000.

- [6] T. J. Harris, "Assessment of control loop performance", *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 67, pp. 856-861, 1989.
- [7] T. J. Harris, C. T. Seppala, L. D. Desborough, "A review of performance monitoring and assessment techniques for univariate and multivariate control systems", *Journal of Process Control*, 9(1), pp. 1-17, 1999.
- [8] B. Huang, S. L. Shah, *Performance Assessment of Control Loop*, Springer-Verlag, UK, 1999.
- [9] H.P. Huang, J.C. Jeng, "Monitoring and assessment of control performance for single loop systems", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41, pp. 1297-1309, 2002.
- [10] M. Jelali, "An overview of control performance assessment technology and industrial applications", *Control Engineering Practice*, 14, pp. 441-466, 2006.
- [11] D. J. Kozub, "Controller performance monitoring and diagnosis: industrial perspective", *In Preprints of the 15th IFAC World Congress on Automatic Control*, Barcelona, E, 2002.
- [12] P. Kuehl, A. Horch, "Detection of sluggish control loops - experiences and improvements", *Control Engineering Practice*, 13:1019-1025, 2005.
- [13] T. Miao, D. E. Seborg, "Automatic detection of excessively oscillatory feedback loops", *In Proceedings IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 359-364, Kohala Coast, HW, 1999.
- [14] M. Morari, E. Zafiriou, *Robust Process Control*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [15] M. A. Paulonis, J. W. Cox. "A practical approach for large-scale controller performance assessment, diagnosis, and improvement", *Journal of Process Control*, 13, 155-168, 2003.
- [16] S. J. Qin. "Control performance monitoring - a review and assessment", *Computers and Chemical Engineering*, 23, pp. 173-186, 1998.
- [17] A. P. Swanda, D. E. Seborg, "Controller performance assessment based on setpoint response data". *In Proceedings American Control Conference*, pp. 3863-3867, San Diego, CA, 1999.
- [18] O. Taha, G. A. Dumont, M. S. Davies, "Detection and diagnosis of oscillations in control loops", *In Proceedings IEEE International Conference on Decision and Control*, pp. 2432-2437, Kobe, J, 1996.
- [19] N. F. Thornhill, T. Hagglund, "Detection and diagnosis of oscillation in control loop", *Control Engineering Practice*, 5(10), pp. 1343-1354, 1997.
- [20] T. Thyagarajan, C. C. Yu, "Improved autotuning using the shape factor from relay feedback", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 42, pp. 4425-4440, 2003.
- [21] A. Visioli, "Method for proportional-integral controller tuning assessment", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 45, pp. 2741-2747, 2006.
- [22] A. Visioli, *Practical PID Control.*, Springer, London (UK), 2006. ■

## IL CONNETTORE MEDICALE ORIGINALE PUSH PULL



### REDEL Serie 1P - 2P - 3P

- Connettori plastici ad innesto rapido
- Sterilizzabili
- Contatti a saldare, crimpare ed a circuito stampato
- Connettori fluidici e ibridi
- Contatti fibra ottica, coassiali e alto voltaggio
- Da 2 a 32 contatti

REDEL IS A LEMO GROUP  
COMPANY - Switzerland

LEMO Italia srl

Telefono: (+39 02) 66 71 10 46  
Fax: (+39 02) 66 71 10 66  
sales.it@lemo.com



readerservice.it n.16321

Contact your local partner on [www.lemo.com](http://www.lemo.com)