

# Valutazione della taratura di controllori PI per processi autoregolanti

Antonio Visioli

In questo articolo viene proposto un metodo per la valutazione delle prestazioni ottenute da un regolatore di tipo Proporzionale-Integrale (PI) applicato ad un processo di tipo autoregolante ad un ingresso e ad un'uscita. In particolare viene determinata la prestazione del controllore nella reiezione dei disturbi sul carico. Ciò avviene valutando nello stesso tempo semplici indici che sono calcolati considerando solamente l'uscita del controllore e l'uscita del processo quando un disturbo dalla dinamica veloce ha luogo sul sistema. Nessun modello del sistema è quindi richiesto. Come risultato si hanno dei suggerimenti su come migliorare la taratura del controllore. Risultati sperimentali e ottenuti attraverso simulazioni mostrano come il metodo sia efficace nel contesto di un sistema generale di monitoraggio delle prestazioni.

## Keyword

*Valutazione delle prestazioni, controllori Pid, taratura.*

Al giorno d'oggi il monitoraggio di processo e la valutazione delle prestazioni di un sistema di controllo giocano un ruolo sempre più importante nel mondo industriale, al fine di migliorare la qualità dei prodotti e ridurre i costi nello stesso tempo. In questo contesto, negli ultimi anni vi è stato un grande sforzo da parte dei ricercatori allo scopo di sviluppare metodologie che siano in grado di stabilire se un sistema di controllo fornisce prestazioni soddisfacenti (si vedano ad esempio [1] e [2] ed i riferimenti in essi contenuti).

Sebbene le tecniche proposte possano essere classificate all'interno di uno stesso ambito [3], esse vengono in genere divise in due categorie [1]: il monitoraggio delle prestazioni stocastiche (stochastic performance monitoring), nel quale l'obiettivo principale è quello di valutare la capacità del sistema di controllo a compensare i disturbi di tipo aleatorio, e di quelle deterministiche (deterministic performance monitoring), nel quale si fa riferimento a specifiche di controllo più tradizionali, come la risposta ad un segnale a scalino sul set-point e la compensazione di un disturbo sul carico [4]. I lavori che fanno parte della prima categoria si basano in genere sul concetto di controllo a minima varianza [3], mentre quelli che appartengono alla seconda categoria prendono in considerazione diversi aspetti che deteriorano le prestazioni di un sistema di controllo, come la presenza di oscillazioni [5, 6, 7, 8], di attrito nelle valvole [9, 10, 11, 12], di variazioni della dinamica del processo [13] e, ovviamente, di una errata taratura del controllore [8, 14, 15, 16]. È evidente infatti che una prestazione insoddisfacente può essere causata da

diversi fattori [17].

D'altra parte, dal momento che in un grande impianto vi possono essere centinaia di anelli di controllo, è praticamente impossibile per gli operatori monitorarli manualmente ad uno ad uno. Quindi è importante disporre di strumenti che siano in grado di rilevare automaticamente il verificarsi di una situazione anomala e quindi di aiutare l'operatore a capire la ragione di ciò ed eventualmente di suggerire il modo per risolvere il problema (ad esempio, se viene rilevata una taratura scadente del controllore devono essere determinati valori più appropriati dei parametri). Da ciò si può facilmente evincere come vi sia la necessità di integrare tecniche differenti, ognuna adeguata ad affrontare una particolare situazione. Inoltre, per ovvi motivi di contenimento dei costi e per la loro applicabilità in generale, vi è la necessità per queste tecniche di utilizzare quanto più possibile dati di impianto raccolti durante il normale esercizio e di non abbisognare di un modello del sistema.

Questo lavoro si colloca nella categoria del monitoraggio deterministico delle prestazioni ed è relativo alla valutazione della taratura di un controllore di tipo Proporzionale-Integrale (PI), che è notoriamente il più utilizzato nella pratica industriale, rispetto alle prestazioni di reiezione dei disturbi sul carico. Specificatamente, il metodo proposto in [15], che è in grado di rilevare se un anello di controllo è troppo lento per mezzo del calcolo del cosiddetto *Idle Index*, è integrato con un ulteriore indice. Quest'ultimo è determinato molto semplicemente analizzando la variabile di controllo (si noti che non è richiesto un modello del processo) ed è direttamente legato al fattore di smorzamento del sistema in anello chiuso. Considerando i due indici simultaneamente, la taratura del controllore viene valutata. In particolare, viene determinato se i valori della costante proporzionale e della costante di tempo dell'azione integrale sono troppo bassi o troppo elevati (o se sono corretti, ovviamente).

A. Visioli, Dipartimento di Elettronica per l'Automazione Università degli Studi di Brescia. Questo lavoro è stato parzialmente finanziato da fondi del Ministero dell'Istruzione, Università e Ricerca.

### Formulazione del problema

Si consideri un sistema di controllo standard in retroazione unitaria, in cui un processo con funzione di trasferimento  $P(s)$  è controllato da un controllore PI descritto dalla funzione di trasferimento

$$C(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1)$$

dove  $K_p$  è il guadagno proporzionale e  $T_i$  è la costante di tempo dell'azione integrale. Si assuma che la specifica di controllo principale sia quella di garantire una buona reiezione dei disturbi sul carico (si noti che questa specifica è il più delle volte quella effettivamente importante nell'ambito industriale e che in ogni caso le prestazioni di inseguimento del setpoint possono essere comunque soddisfatte impiegando un controllore a due gradi di libertà [18]). In questo contesto, è desiderabile che la taratura dei parametri del controllore sia tale da minimizzare l'integrale dell'errore assoluto definito come

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (2)$$

dal momento che ciò garantisce nello stesso tempo sia bassi valori di picco dell'errore che una risposta sufficientemente stabile (ovvero un basso tempo di assestamento) [18].

Lo scopo della metodologia presentata in questo lavoro è quindi quello di verificare, valutando la risposta del sistema ad un disturbo a scalino sul carico, se la taratura corrente del PI è soddisfacente (nel senso che garantisce un basso valore di Iae) e di suggerire eventuali modifiche dei parametri del controllore nel caso risulti che le prestazioni possano essere incrementate.

### L'Area Index

#### Metodologia

Come già detto, nei tipici processi industriali è in genere desiderabile che la legge di controllo impiegata garantisca buone prestazioni nella reiezione dei disturbi sul carico, dal momento che questa specifica è spesso la più importante.

La tecnica descritta nel seguito si basa sull'analisi della variabile manipolabile quando sul processo si verifica una brusca variazione del carico e mira a stimare il fattore di smorzamento del sistema in anello chiuso. Per motivi di chiarezza solo l'idea di base verrà descritta in questo sottoparagrafo, mentre la sua applicazione nei casi pratici verrà discussa nel prossimo sottoparagrafo.

La metodologia consiste nel determinare un indice di prestazione, che sarà chiamato Area Index (AI), basato sul segnale di controllo  $u(t)$  che compensa un disturbo a scalino sul carico. Quindi, valutando il valore di AI, si può determinare se il sistema di controllo è troppo oscillatorio.

Si denoti con  $\bar{u}$  il nuovo valore di

regime assunto dalla variabile di controllo alla fine del transitorio di risposta al disturbo sul carico. Si denoti inoltre con  $t_0$  l'istante in cui il disturbo sul carico ha inizio (si noti che non è necessario che il valore di  $t_0$  sia noto) e con  $t_1, \dots, t_{n-1}$  i successivi istanti di tempo nei quali si ha  $u(t) = \bar{u}$ . Infine, si denoti con  $t_n$  l'istante di tempo nel quale il transitorio finisce e la variabile manipolabile raggiunge il suo valore di regime  $\bar{u}$ . Dal punto di vista pratico, il valore di  $t_n$  si può considerare come il minor tempo dopo il quale la variabile di controllo rimane dentro un range dell'uno per cento di  $\bar{u}$ . Si definisca quindi l'area delimitata dalla funzione  $u(t)$  e da  $\bar{u}$  tra due istanti consecutivi  $t_i$  e  $t_{i+1}$  come:

$$A_i := \int_{t_i}^{t_{i+1}} |u(t) - \bar{u}| dt. \quad (3)$$

La notazione introdotta è rappresentata graficamente nella figura 1. L'Area Index AI è calcolato come il rapporto tra il valore massimo delle prime  $n-2$  aree così determinate e la somma di tutte, escludendo dal computo l'area  $A_0$ , ovvero l'area tra l'istante in cui il disturbo inizia ed il primo istante in cui si ha  $u(t) = \bar{u}$ . Nel caso in cui durante l'intero transitorio si verifichi meno di tre volte la condizione  $u(t) = \bar{u}$ , l'Area Index è semplicemente posto uguale a uno. Formalmente quindi l'Area Index è definito come:

$$AI := \begin{cases} 1 & \text{se } n < 3 \\ \frac{\max\{A_1, \dots, A_{n-1}\}}{\sum_{i=1}^{n-1} A_i} & \text{altrimenti} \end{cases} \quad (4)$$

Dalla formula (4) si può banalmente dedurre che il valore di AI è sempre compreso nell'intervallo (0,1]. Il significato dell'indice può essere compreso meglio considerando l'analisi seguente. Si consideri la funzione di trasferimento  $T(s)$  dal segnale di disturbo sul carico (che per convenzione agisce sul segnale di ingresso del processo sotto controllo) alla variabile di controllo (ovvero l'uscita del controllore):

$$T(s) := - \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} \quad (5)$$

e si assuma che  $T(s)$  abbia una coppia di poli complessi coniugati dominante, ovvero che la sua dinamica possa essere bene approssimata dalla funzione di trasferimento seguente (si noti che questo caso non è sempre vero in pratica, come verrà discusso nel sottoparagrafo *Utilizzo combinato dell'Area Index e dell'Idle Index*):

$$\tilde{T}(s) := - \frac{1}{T_1^2 s^2 + 2\xi T_1 s + 1}. \quad (6)$$

L'Area Index AI è stato calcolato considerando la risposta allo scalino di  $\tilde{T}(s)$  per diversi valori di  $T_1$  e  $\xi \in (0,1]$ . Il risultato è che il valore di AI è indipendente dal valore di  $T_1$  e dipende quindi solo dal valore dello smorzamento  $\xi$ . La relazione tra  $\xi$  e

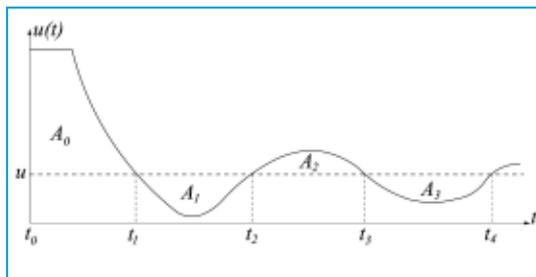
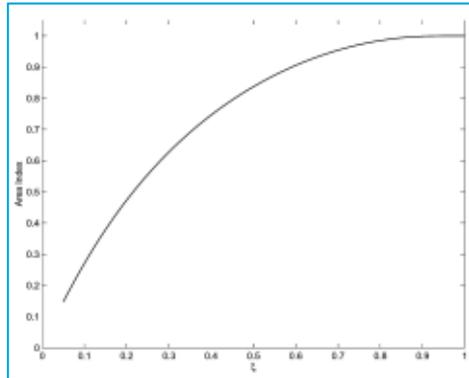


Figura 1 - Parametri significativi per il calcolo dell'Area Index

**Figura 2 - Dipendenza dell'Area Index dal fattore di smorzamento  $\xi$**



AI è illustrata dal grafico nella figura 2. È evidente come si abbia che più il valore di AI è vicino allo zero e più il sistema di controllo è oscillatorio, mentre più il valore di AI si avvicina ad uno più il sistema di controllo è smorzato. È utile notare a questo punto come l'Area Index può essere utilizzato comunque per ogni tipo di controllore. In questo lavoro tuttavia si farà riferimento solo ai controllori PI dal momento che il metodo presentato può essere utilmente impiegato per valutarne la taratura dei parametri.

*Condizioni operative*

Quando il metodo descritto nel sottoparagrafo *Metodologia* deve essere applicato in pratica, ci sono alcuni problemi tecnici da risolvere. In primo luogo, il rumore inevitabilmente agente sul sistema deve essere considerato. Dal momento che l'Area Index è determinato off-line, un metodo di filtraggio standard può essere applicato prima di calcolare i valori delle varie aree. Alternativamente, è sufficiente scartare quelle aree  $A_i$  il cui valore è minore di una predeterminata soglia (dal momento che esse sono in pratica dovute al rumore). Il valore di questa soglia può essere facilmente determinato considerando il segnale di controllo per un intervallo di tempo sufficientemente lungo quando il sistema è all'equilibrio e determinando la massima area tra due attraversamenti consecutivi del suo valore di regime (quest'ultimo può essere semplicemente calcolato come il valor medio del segnale di controllo nell'intervallo considerato). Si noti che questa procedura è simile a quella che si basa sul concetto di banda di rumore (noise band) e che è già stata implementata con successo nei regolatori industriali [19]. In ogni caso, dal momento che la procedura si basa sul calcolo di integrali, essa è intrinsecamente poco sensibile al rumore.

Un altro aspetto da considerare è che l'Area Index è significativo solo quando ha luogo una brusca variazione del carico, ovvero quando la variazione del carico è sufficientemente veloce rispetto alla dinamica della funzione di sensitività (5). Quindi, il metodo deve essere applicato solo in queste situazioni (ad esempio quando si ha un cambiamento significativo nella produzione oppure, ovviamente, quando un segnale a scalino è volontariamente aggiunto alla variabile manipolabile per questo scopo), altrimenti può risultare un valore più elevato dell'Area Index. Per verificare se questa condizione è verificata si può comunque utilizzare il metodo descritto in [7].

**Valutazione della taratura**

*L'Idle Index*

Il metodo proposto da Hagglund in [15] si basa sul fatto che una risposta lenta ad un disturbo sul carico è caratterizzata dal fatto che la derivata della variabile di controllo e quella dell'uscita del sistema presentano lo stesso segno per lunga parte del transitorio. È quindi sensato applicare al transitorio stesso il seguente calcolo:

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

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

dove  $h$  è il tempo di campionamento e  $\Delta u$  e  $\Delta y$  sono rispettivamente gli incrementi della variabile di controllo e della variabile di processo. L'Idle Index è definito quindi come

$$II = \frac{t_{pos} - t_{neg}}{t_{pos} + t_{neg}} \tag{7}$$

È evidente come il valore di II sia sempre compreso nell'intervallo [-1, +1] e come un valore positivo vicino ad uno indichi un controllo lento. Il problema relativo all'utilizzo dell'Idle Index è che un valore negativo vicino a -1 può essere ottenuto in virtù sia di un controllore ben tarato, che di un anello con dinamica troppo oscillatoria.

*Utilizzo combinato dell'Area Index e dell'Idle Index*

Dall'analisi sviluppata nel sottoparagrafo precedente appare chiaro, come d'altronde sottolineato in [15], che l'Idle Index deve essere utilizzato assieme ad una procedura di rilevazione di oscillazioni. Rispetto alle varie che sono state proposte in letteratura (si veda ad esempio [5, 6]), il merito dell'Area Index è di fornire un'indicazione di come il controllore debba essere ritarato, come sarà spiegato nel seguito.

È evidente infatti che un controllore ben tarato fornirà un basso valore dell'Idle Index e nello stesso tempo un valore medio dell'Area Index, dal momento che questo significa che il sistema di controllo non è né lento né troppo oscillatorio. Tuttavia è interessante valutare i valori dei due indici che si ottengono con diversi valori dei parametri del controllore, al fine di utilizzare II e AI per fornire indicazioni su come migliorare la taratura. Specificatamente, è stata condotta la seguente analisi. Sono stati considerati differenti processi con funzione di trasferimento del primo ordine più ritardo, ovvero

$$P(s) = \frac{1}{Ts + 1} e^{-Ls} \tag{8}$$

con tempi di ritardo normalizzati  $L/T$  che variano nel range da 0,1 a 1 (con passo di discretizzazione di 0,1). La scelta è motivata dal fatto che questa funzione di trasferimento modella efficacemente molti tipi di processi industriali ed è comunque utilizzata per la stragrande maggioranza delle regole di taratura

per controllori PI. In seguito, la metodologia proposta in [20] è stata impiegata per determinare l'insieme dei controllori PI stabilizzanti per ogni sistema. In particolare, l'intervallo di valori risultante per  $K_p$  (sono stati considerati solo valori positivi) è stato discretizzato finemente e per ogni valore del guadagno proporzionale il corrispondente intervallo di valori di  $T_i$  è stato considerato (e anch'esso discretizzato). Si noti come, per un dato valore di  $K_p$ , l'intervallo di valori stabilizzanti della costante di tempo dell'azione integrale varia da un dato estremo inferiore all'infinito (in questo caso il controllore è semplicemente di tipo proporzionale). L'intervallo è stato quindi convenientemente troncato quando sono stati comunque ottenuti risultati significativi. Quindi, per ogni sistema con un controllore PI così determinato è stata simulata una risposta ad uno scalino sul carico ed i valori corrispondenti di AI, II e Iae sono stati calcolati.

Basandosi sui risultati così ottenuti, allo scopo di valutare la taratura del controllore PI, sono state sviluppate le regole presentate in tabella 1. Il valore dell'Area Index è da considerarsi basso allorché è minore di 0,35, medio se è  $0,35 < AI < 0,7$  ed elevato se è maggiore di 0,7. Il valore dell'Idle Index invece è da considerarsi basso se è minore di -0,6, medio se è compreso tra -0,6 e 0 ed elevato se è maggiore di zero.

Sebbene queste regole possano apparire abbastanza intuitive, è opportuno discutere due di esse con maggior dettaglio. In primo luogo si esaminerà il caso in cui AI è basso e II è medio/elevato, dal momento che questi due risultati sembrano indicare un sistema oscillante da un lato (AI) e lento dall'altro (II). La situazione può essere valutata meglio considerando il processo seguente:

$$P(s) = \frac{1}{10s + 1} e^{-5s} \quad (9)$$

controllato da un PI i cui parametri sono  $K_p = 1,81$  e  $T_i = 20$  (si noti che i parametri che forniscono il minimo Iae di 6,11 sono  $K_p = 1,81$  e  $T_i = 10,36$  che forniscono valori di  $AI = 0,61$  e  $II = -0,71$ ). La risposta del sistema ad un disturbo a scalino sul carico di ampiezza unitaria e la corrispondente variabile di controllo sono riportate nella figura 3. I valori risultanti dell'Area Index e dell'Idle Index sono rispettivamente  $AI = 0,14$  e  $II = -0,21$  (con  $Iae = 11,03$ ). Appare evidente come qui il basso valore di AI non sia associato ad un sistema oscillante, ma ad una funzione di sensitività complementare (si veda (5)) la cui dinamica non è dominata da una coppia di poli complessi coniugati. Quindi, sebbene in questo caso l'Area Index non sia indicativo del fattore di smorzamento del sistema in anello chiuso (si veda il sottoparagrafo *Metodologia*), esso fornisce comunque l'importante informazione relativa al fatto che il valore della costante di tempo dell'azione integrale è troppo elevato. Si noti come a questa conclusione non si possa arrivare facilmente grazie all'impiego di tecniche che rilevino semplicemente la presenza di oscillazioni (ad esempio quelle che si basano sulla funzione di autocorrelazione).

La seconda regola che è opportuno analizzare è quella per cui i valori di AI e II sono entrambi bassi. Questo infatti significa che il sistema di controllo presenta una dinamica troppo oscillatoria e questo può essere dovuto ad un valore troppo elevato del guadagno proporzionale e/o troppo basso della costante di tempo

integrale. Allo scopo di fornire una possibile ulteriore informazione sul valore di  $T_i$  è quindi utile calcolare un altro semplice indice relativo alla variabile di processo. Questo fatto può essere meglio compreso analizzando i risultati mostrati nelle figure 4 e 5 che si riferiscono ancora al processo (9). Nel primo caso i parametri del PI sono  $K_p = 3$  ed  $T_i = 20$  e quindi il comportamento oscillatorio è causato dal valore troppo alto della costante proporzionale. I valori risultanti degli indici sono  $AI = 0,19$  e  $II = -0,9$  (l'integrale dell'errore assoluto è  $Iae = 9,75$ ). Nel secondo caso invece i valori del PI sono  $K_p = 2,2$  e  $T_i = 6,5$  e quindi la risposta oscillante è dovuta sia al valore troppo elevato del guadagno proporzionale che al valore troppo basso della costante di tempo dell'azione integrale. I valori risultanti degli indici sono  $AI = 0,23$  e  $II = -0,64$  ( $Iae = 14,02$ ). È evidente come i due indici considerati non siano sufficienti a distinguere le due situazioni. Tuttavia, uno sguardo alle due funzioni di uscita del processo suggerisce di calcolare un nuovo indice, chiamato Output Index (OI) consistente nel rapporto tra la somma delle aree negative rispetto al valore di regime finale e la somma delle aree positive, escludendo la prima dal computo (si noti come uno scalino positivo sia stato assunto in questo frangente, senza perdita di generalità). Nel caso in cui l'uscita del processo non intersechi mai il suo valore di regime, si deve semplicemente porre  $OI = 0$ . Questa scelta è motivata dal fatto che quando sia  $K_p$  che  $T_i$  sono elevati la dinamica della funzione di trasferimento tra il disturbo sul carico e l'uscita del processo non è dominata da una coppia di poli complessi coniugati. I valori risultanti di OI sono 0,26 nel primo caso e 0,56 nel secondo. Riassumendo, quando sia il valore dell'Area Index che dell'Idle Index sono bassi, è opportuno valutare anche l'Output Index. Nel caso in cui  $OI < 0,35$  può essere concluso che sia il valore della costante proporzionale che di quella integrale sono troppo elevati. Altrimenti la risposta oscillatoria è causata da un valore troppo elevato di  $K_p$  e/o da un valore troppo basso di  $T_i$ . Si noti che in questa eventualità l'esperienza suggerisce comunque di decrementare il valore del guadagno proporzionale.

**Tabella 1**

Valore di AI	Valore di II	Valutazione della taratura
elevato	elevato	$K_p$ troppo basso, $T_i$ troppo alto
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	$K_p$ troppo elevato
basso	basso	$K_p$ troppo elevato e/o $T_i$ troppo basso <sup>1</sup>

<sup>1</sup>È utile un test addizionale (si veda il testo).

### Regole per la valutazione della taratura del PI

È opportuno sottolineare a questo punto che una risposta oscillante può essere causata sia dall'errata selezione dei parametri del controllore che dalla presenza eccessiva di attrito negli attuatori. In questo caso quindi, prima di applicare la metodologia presentata in questo lavoro, ovvero una ritaratura del PI, è quindi opportuno determinare se non sia necessario effettuare un in-

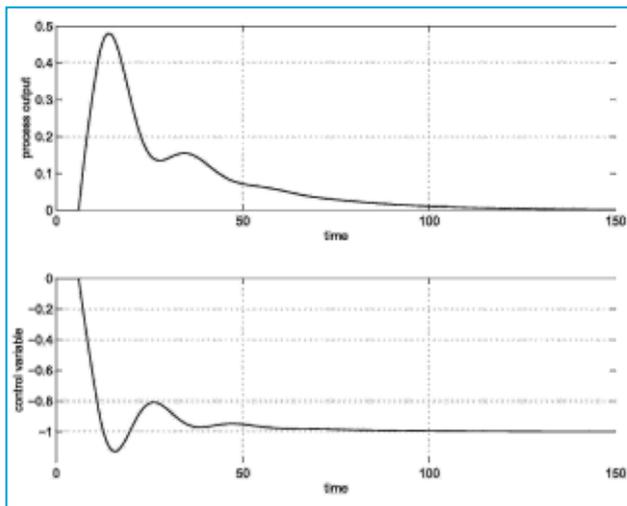


Figura 3 - Esempio di risposta ad un disturbo sul carico con un valore troppo elevato di  $T_i$

tervento di manutenzione sugli attuatori stessi. Questo può essere verificato applicando uno (o più) degli algoritmi proposti in letteratura per questo scopo (ad esempio [9, 10, 12]).

Si noti infine che vi sono situazioni dove i parametri del PI che minimizzano l'integrale dell'errore assoluto possono portare ad un comportamento troppo oscillatorio (rispetto all'applicazione) della variabile di controllo [21]. Questi casi possono comunque essere ben affrontati dal metodo proposto in questo lavoro semplicemente modificando opportunamente il range dei valori medi dell'Area Index in modo da venire incontro alle specifiche dell'operatore.

### Simulazioni

Come primo esempio è stato considerato il seguente processo:

$$P_1(s) = \frac{1}{10s + 1} e^{-2s} \quad (10)$$

I parametri del PI che minimizzano l'indice Iae sono stati trovati utilizzando un algoritmo genetico [22]. Risulta  $K_p = 4,61$  e  $T_i = 6,06$  e gli indici corrispondenti sono Iae = 1,42, AI = 0,61 e II = -0,81. Secondo le regole della tabella 1 si ha quindi giustamente che la taratura è corretta. La risposta ad uno scalino di disturbo sul carico di ampiezza unitaria, assieme alla corrispondente variabile di controllo, è illustrata dal grafico nella figura 6. In seguito, si è fissato  $K_p = 2$ , mantenendo lo stesso valore di prima per la costante di tempo dell'azione integrale. Le prestazioni ottenute in questo caso sono mostrate nella figura 7 e gli indici risultanti sono AI = 0,97 e II = -0,68. La tecnica proposta evidenzia quindi il valore troppo basso del guadagno proporzionale.

Come secondo esempio è stato invece considerato il seguente processo del quarto ordine:

$$P_2(s) = \frac{1}{(s + 1)^4} \quad (11)$$

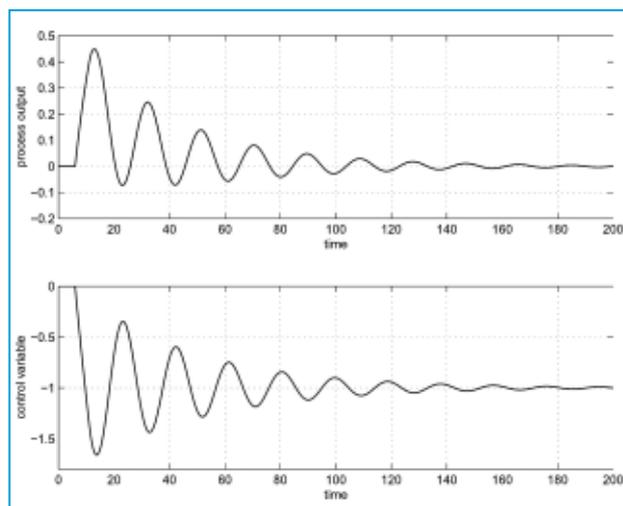


Figura 4 - Esempio di risposta ad un disturbo sul carico con valori troppo elevati di  $K_p$  e  $T_i$

Si noti che esso può essere approssimato da una funzione di trasferimento del primo ordine più ritardo con una costante di tempo  $T = 2,1$  ed un ritardo  $L = 1,9$ . Come in precedenza la taratura ottima è stata trovata mediante un algoritmo genetico. Il risultato è  $K_p = 1,65$  e  $T_i = 4,15$ , con un relativo integrale dell'errore assoluto minimo di 2,79 e AI = 0,36 e II = -0,80. La risposta del sistema di controllo ad un disturbo a scalino sul carico (sempre di ampiezza unitaria) è riportata nella figura 8. Se i valori dei parametri del PI vengono entrambi decrementati fino a  $K_p = 1,2$  e  $T_i = 2$  si ottengono i risultati della figura 9. I valori corrispondenti degli indici sono Iae = 4,07, AI = 0,40 e II = -0,55.

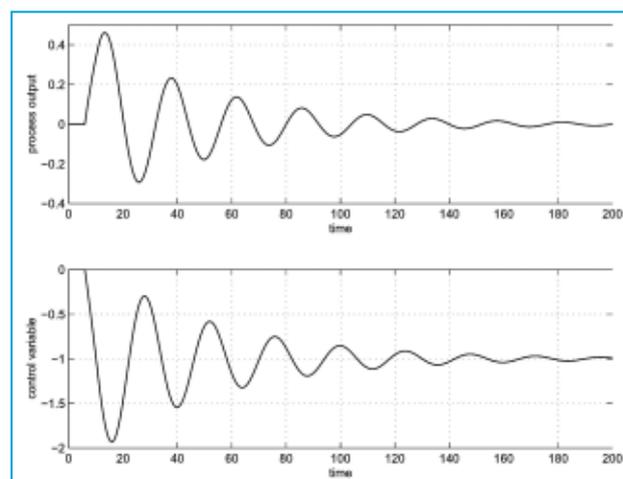
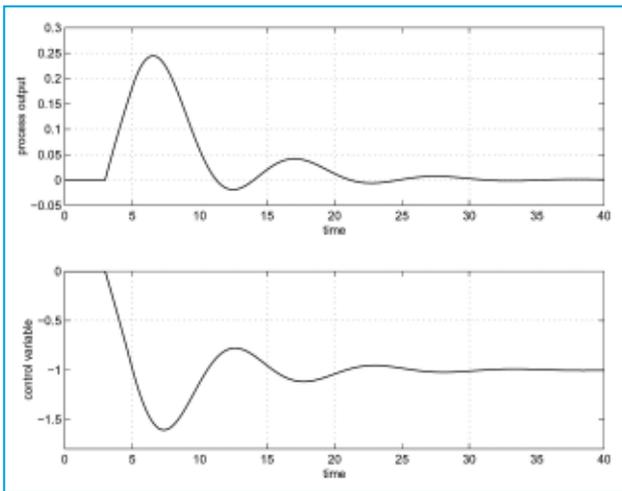


Figura 5 - Esempio di risposta ad un disturbo sul carico con un valore troppo elevato di  $K_p$  e troppo basso di  $T_i$

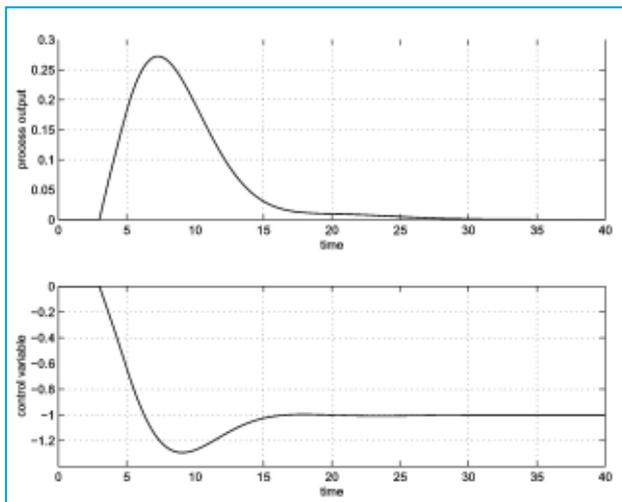
L'efficacia del metodo è quindi confermata anche in questo caso, dal momento che dalla tabella 1 risulta che entrambi i parametri del PI sono troppo bassi. Si noti infine che laddove la tabella conferma che la taratura è corretta si ha che il valore di Iae ottenuto non è significativamente lontano dall'ottimo.

**Risultati sperimentali**

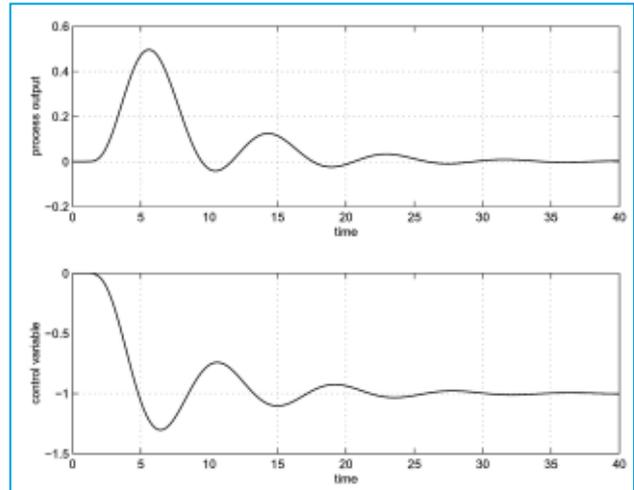
Al fine di verificare l'efficacia della tecnica proposta in applicazioni pratiche, si è utilizzato un apparato da laboratorio (prodotto dalla KentRidge Instruments) che consiste in un piccolo serbatoio di plexiglass rettangolare (la cui area è 40 cm<sup>2</sup>) al quale è applicato un controllo di livello mediante un controllore basato su PC. Il serbatoio è riempito di acqua mediante una pompa la cui velocità è impostata da una tensione che varia da 0 a 5 V tramite un sistema Pwm. Un foro di uscita sulla parte inferiore del serbatoio consente all'acqua di ritornare ad un altro serbatoio più grande da dove può essere di nuovo prelevata. La misura del livello avviene per mezzo di un sensore capacitivo che fornisce un'uscita da 0 (serbatoio vuoto) a 5 V (serbatoio pieno). Un secondo flusso in ingresso (manipolato per mezzo di un'altra pompa) è stato adoperato come disturbo. Specificatamente, con il sistema all'equilibrio ed un'uscita di 3 V, è stata attivata la seconda pompa appli-



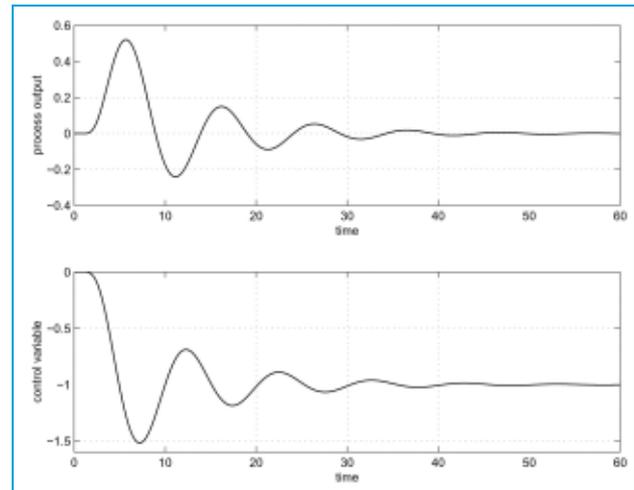
**Figura 6 - Risposta al disturbo nel caso di  $P_1(s)$  con  $K_p = 4,61$  e  $T_i = 6,06$  ( $I_{ae} = 1,42$ ,  $AI = 0,61$ ,  $II = -0,81$ )**



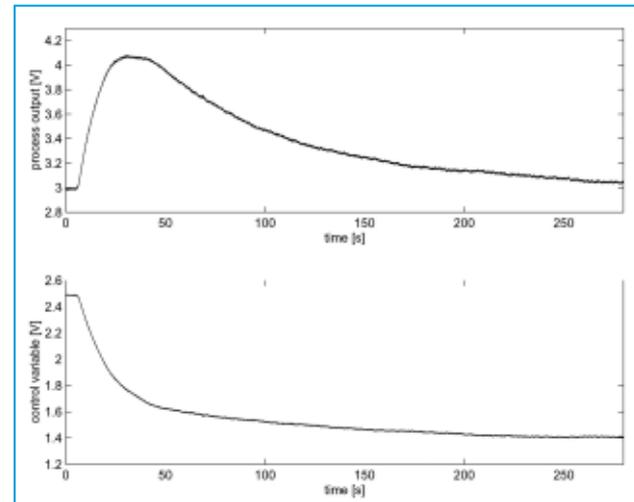
**Figura 7 - Risposta al disturbo nel caso di  $P_1(s)$  con  $K_p = 2$  e  $T_i = 6,06$  ( $I_{ae} = 2,02$ ,  $AI = 0,97$ ,  $II = -0,68$ )**



**Figura 8 - Risposta al disturbo nel caso di  $P_2(s)$  con  $K_p = 1,65$  e  $T_i = 4,15$  ( $I_{ae} = 2,79$ ,  $AI = 0,36$ ,  $II = -0,80$ )**



**Figura 9 - Risposta al disturbo nel caso di  $P_2(s)$  con  $K_p = 1,2$  e  $T_i = 2$  ( $I_{ae} = 4,07$ ,  $AI = 0,40$ ,  $II = -0,55$ )**



**Figura 10 - Risposta al disturbo ottenuta sperimentalmente con  $K_p = 0,5$  e  $T_i = 50$  ( $I_{ae} = 106,5$ ,  $AI = 1$ ,  $II = 0,22$ )**

cando un segnale a scalino da 0 a 1,8 V. Dal momento inoltre che il ritardo apparente del processo è piccolo rispetto alla costante di tempo dominante, un ritardo di 10 s è stato aggiunto via software all'ingresso del sistema. Si noti che il sistema è in realtà non lineare dal momento che la portata di uscita dipende dalla radice quadrata del livello.

Tre esperimenti sono stati condotti. Nel primo il parametri del PI sono stati fissati a  $K_p = 0,5$  e  $T_i = 50$ . La risposta al disturbo è illustrata nel grafico della figura 10 e gli indici risultanti sono  $AI = 1$  e  $II = 0,22$  (l'integrale dell'errore assoluto è 106,5).

La tabella 1 suggerisce quindi di aumentare il valore del guadagno proporzionale e di diminuire il valore della costante di tempo dell'azione integrale. Con i valori del PI modificati a  $K_p = 1$  e  $T_i = 25$  si sono quindi ottenuti i risultati della figura 11. In questo caso risulta  $AI = 0,25$  e  $II = -0,73$  (e  $I_{ae} = 49,17$ ). La risposta oscillante è stata quindi rilevata dal valore basso dell'Area Index e secondo la tabella 1 il valore del guadagno proporzionale deve essere diminuito. Questo fatto è confermato dal terzo esperimento, dove si è fissato  $K_p = 0,8$  e  $T_i = 25$ . I risultati sono riportati nella figura 12 (si noti l'utilizzo di una scala diversa per l'asse dei tempi). Si ha infatti  $AI = 0,40$  e  $II = -0,69$ , il che denota che il controllore è ben tarato, come evidenziato dal valore di  $I_{ae} = 34,83$ .

I risultati sperimentali sono riepilogati per chiarezza in tabella 2, da cui si può dedurre l'efficacia del metodo.

**Conclusioni**

In questo lavoro è stata presentata una tecnica per la valutazione della taratura di un controllore PI per processi autoregolanti. La sua caratteristica principale è quella di fornire un'indicazione di come i parametri debbano essere ritirati nel caso in cui sia rilevata una prestazione insoddisfacente. Un ruolo chiave è svolto dall'Area Index, di cui è stata sottolineata l'importanza rispetto ad altri metodi per la rilevazione di oscillazioni. Sia i risultati delle simulazioni che quelli sperimentali hanno mostrato come, integrata con altre funzionalità

di monitoraggio del processo, questa metodologia possa rappresentare un utile strumento per gli operatori.

**Riferimenti**

[1] S. J. Qin, "Control performance monitoring - a review and assessment", *Computers and Chemical Eng.*, Vol. 23, pp. 173-186, 1998.  
 [2] 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*, Vol. 9, pp. 1-17, 1999.  
 [3] B. Huang, S. L. Shah, *Performance assessment of control loop*, Springer, London, 1999.  
 [4] P.-G. Eriksson, A. J. Isaksson, "Some aspects of control loop performance monitoring", *Proc. of the Ieee International Conference on Control Applications*, Glasgow, UK, pp. 1029-1034, 1994.  
 [5] T. Hagglund, "A control -loop performance monitor", *Control Engineering Practice*, Vol. 3, pp. 1543-1551, 1995.  
 [6] T. Miao, D. E. Seborg, "Automatic detection of excessively oscillatory control loops", *Proc. of the Ieee International Conference on Control Applications*, Kohala Coast, Hawai'i, pp. 359-364, 1999.  
 [7] T. Hagglund, K. J. Astrom "Supervision of adaptive control algorithms", *Automatica*, Vol. 36, pp. 1171-1180, 2000.

**Tabella 2**

$K_p$	$T_i$	AI	II	$I_{ae}$
0,5	50	1	0,22	106,5
1	25	0,25	-0,73	49,17
0,8	25	0,40	-0,69	34,83

**Riassunto dei risultati sperimentali**

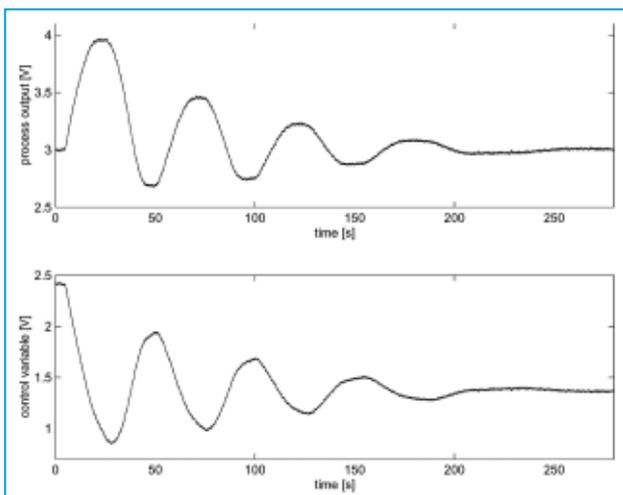


Figura 11 - Risposta al disturbo ottenuta sperimentalmente con  $K_p = 1$  e  $T_i = 25$  ( $I_{ae} = 49,17$ ,  $AI = 0,25$ ,  $II = -0,73$ )

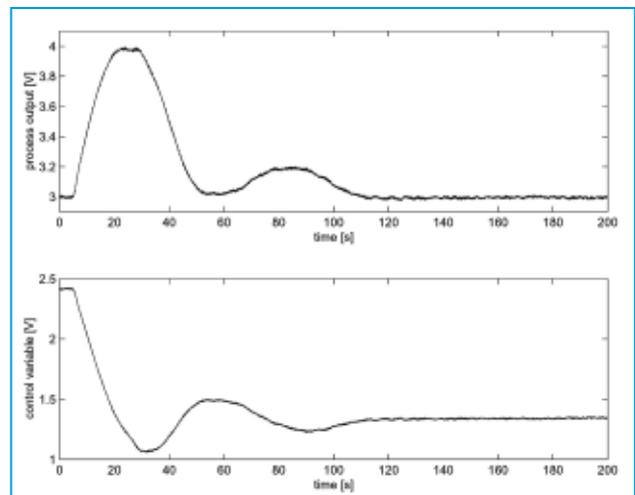


Figura 12 - Risposta al disturbo ottenuta sperimentalmente con  $K_p = 0,8$  e  $T_i = 25$  ( $I_{ae} = 34,83$ ,  $AI = 0,40$ ,  $II = -0,69$ )

- [8] T. Hagglund, "Industrial applications of automatic performance monitoring tools", *Preprints of the 15th Ifac World Congress*, Barcelona, Spain, 2002.
- [9] O. Taha, G. A. Dumont, M. S. Davies, "Detection and diagnosis of oscillations in control loops", *Proc. of the Ieee International Conference on Decision and Control*, Kobe, Japan, pp. 2432-2437, 1996.
- [10] A. Horch, "A simple method for detection of stiction in control valves", *Control Engineering Practice*, Vol. 7, pp. 1221-1231, 1999.
- [11] T. Hagglund, "A friction compensator for pneumatic control valves", *Journal of Process Control*, Vol. 12, pp. 897-904, 2002.
- [12] G. Mori, M. Rossi, C. Scali, "Monitoraggio delle prestazioni di impianti industriali: una procedura per individuare la presenza di attrito negliattuatori", *Atti 47° Convegno Anipla*, Brescia, 2003.
- [13] A. Leva, G. Magnani, "Detecting process variations in low-end Pid autotuners", *Preprints of the 15th Ifac World Congress*, Barcelona, Spain, 2002.
- [14] A. P. Swanda, D. E. Seborg, "Controller performance assessment based on set-point response data", *Proceedings of the American Control Conference*, San Diego, California, pp. 3863-3867, 1999.
- [15] T. Hagglund, "Automatic detection of sluggish control loops", *Control Engineering Practice*, Vol. 7, pp. 1505-1511, 1999.
- [16] H.-P. Huang, J.-C. Jeng, "Monitoring and assessment of control performance for single loop systems", *Industrial Engineering and Chemistry Research*, Vol. 41, pp. 1297-1309, 2002.
- [17] R. S. Patwardhan, S. L. Shah, "Issues in performance diagnostics of model-based controllers" *Journal of Process Control*, Vol. 12, pp. 413-417, 2002.
- [18] F. G. Shinskey, *Feedback controllers for the process industries*, McGraw-Hill, New York, Usa, 1994.
- [19] K. J. Aström, T. Hagglund, C. C. Hang, W. K. Ho, "Automatic tuning and adaptation for Pid controllers - a survey", *Control Engineering Practice*, Vol. 1, No. 4, pp. 699-714, 1993.
- [20] G. J. Silva, A. Datta, S. P. Bhattacharyya "Robust control design using the Pid controller", *Proc. of the Ieee International Conference on Decision and Control*, Las Vegas, Usa, pp. 1313-1318, 2002.
- [21] S. Skogestad, "Simple analytic rules for model reduction and Pid controller tuning" *Journal of Process Control*, Vol. 13, pp. 291-309, 2003.
- [22] C. Houck, J. Joines, M. Kay, "A genetic algorithm for function optimization: a Matlab implementation", *Ncsu-Ie Technical Report*, 95-09, 1995. ■