

Datv per l'autosintonia di regolatori Pid

Aldo Balestrino, Alberto Landi, Luca Sani

Si illustra l'impiego di una tecnica di autosintonia per regolatori standard, basata sulla stima del guadagno critico e dell'oscillazione critica, attraverso una tecnica a relè con dither, detta Datv. Rispetto alle tecniche tipiche per l'autosintonia, la Datv permette di stimare i parametri critici con notevole precisione, pur mantenendo caratteristiche di semplicità realizzativa e insensibilità al rumore, che ne suggeriscono l'uso nel caso di processi con amplificatori Pwm e/o attuatori a relè.

Keyword

Autosintonia, Regolatori standard, Dither

Molti controllori industriali sono di tipo PI(D). Nel caso di processi di ordine basso (primo, secondo, terzo ordine più ritardo) la tecnica classica per la sintonizzazione (tuning) dei parametri del regolatore si basa sulle regole di Ziegler-Nichols [1] nella loro forma originale o secondo le numerosissime varianti proposte. Il merito principale degli studi di Ziegler-Nichols non consiste tanto nella determinazione di regole specifiche di tuning, quanto nell'individuazione di procedure standard per correlare alcuni parametri critici del processo in esame ai parametri del controllore.

Il punto di partenza di tali procedure è rappresentato dalla stima, nel piano di Nyquist, del punto critico della funzione di trasferimento $G(s)$ dell'impianto, cioè il punto d'intersezione della $G(s)$ con il semiasse reale negativo. È una stima che può essere ottenuta forzando l'impianto, chiuso in retroazione con un controllore proporzionale, ai limiti di stabilità. Le informazioni critiche identificate sono allora il periodo critico T_c , determinato dalla misura del periodo di oscillazione e il guadagno critico K_c , misurato a partire dal valore del guadagno del controllore. Un metodo pratico per rilevare i due parametri critici evitando di operare rischiando l'instabilità e velocizzando la procedura è stato proposto da Astrom e Hagglund [2] con l'introduzione di una tecnica di indagine semplice ed elegante, che permette, di ottenere una stima automatica di T_c e K_c , usando un relè nell'anello di controllo. Luyben [3], partendo da applicazioni su colonne di distillazione, ha utilizzato e perfezionato il metodo di Astrom, chiamandolo Atv (Automatic Tune Variation).

Tale procedura si basa sulla considerazione che, se la $G(s)$ è chiusa in retroazione attraverso una non linearità (tipicamente un relè), si può manifestare un ciclo limite stabile con una pulsazione ω^* prossima a quella relativa al punto critico ω_c (figura 1).

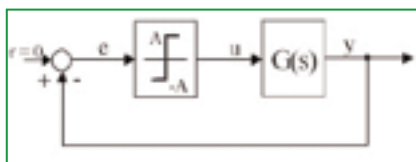


Figura 1 - Schema Atv

La tecnica Atv annovera molti pregi, tra cui, va sottolineato ancora, la capacità intrinseca di portare il sistema in anello chiuso ad oscillare con la pulsazione critica e la velocizzazione dei tempi di prova rispetto al caso di risposte a gradino o all'impulso (una

stima pratica è che il tempo di prova in genere varia da 2 a 4 volte il periodo critico). Qualora si utilizzi la procedura mediante relè è possibile eseguire una predisposizione adeguata del controllore Pid, variando le stesse regole di predisposizione, ad esempio si considerino le regole di Zhuang-Atherton [4].

Facendo ricorso alla teoria della funzione descrittiva [5] è possibile ricavare una stima del guadagno critico della $G(s)$. Nel caso di un relè con ampiezza A, la funzione descrittiva è:

$$N(E) = \frac{4A}{\pi E} \quad (1)$$

dove E è l'ampiezza della sinusoide di ingresso al blocco non lineare. Si manifesta un ciclo limite quando si verifica la seguente relazione sul piano di Nyquist:

$$1 + G(j\omega) \cdot N(E) = 0 \quad (2)$$

Poiché la funzione descrittiva del relè è una quantità reale, la condizione (2) si può manifestare solo per $\omega = \omega_c$. In tali condizioni il valore di K_c è:

$$K_c = \frac{4A}{\pi E_c} \quad (3)$$

dove E_c è l'ampiezza del segnale di ingresso al relè, in corrispondenza della pulsazione critica ω_c . Tale tecnica, trattandosi di una linearizzazione armonica della non linearità, fornisce valori accettabili della ω_c e del K_c solo nel caso che il processo si comporti come un filtro passa basso, in modo che l'uscita y (e quindi l'ingresso alla non linearità) sia prossima ad una sinusoide. Da un punto di vista matematico tale ipote-

si si traduce nella seguente condizione sul processo $G(j\omega)$:

$$|G(jk\omega_c)| \ll |G(j\omega_c)|, \quad k = 3, 5, 7, \dots \quad (4)$$

Tale situazione è particolarmente critica nel caso di sistemi passa-alto, con ritardo oppure a fase non minima. Inoltre in presenza di rumore sul segnale y , affinché continui a manifestarsi un'oscillazione stabile, occorre introdurre un'isteresi sul relè e la stima del punto critico peggiora ulteriormente. Tale tecnica, essendo basata su una linearizzazione armonica della non linearità, fornisce valori accettabili della ω_c e del K_c solo nel caso che il processo si comporti come un filtro fortemente passa basso, in modo che l'uscita y (e quindi l'ingresso alla non linearità) sia prossima ad una sinusoide. In parole povere la stima sarebbe esatta nell'ipotesi ideale in cui il sistema si comportasse in modo

'lineare' e proprio per questo molti ricercatori si sono dedicati a proporre soluzioni atte a ridurre l'effetto distortore della non linearità nella stima del punto critico. Ad esempio Chen-Ching Yu [6] ha sostituito il relè con una saturazione, in modo da ridurre il contenuto armonico del segnale di ingresso al processo. Lee e Wang [7] hanno proposto una soluzione in cui viene forzato l'ingresso (u) a essere una sinusoide coincidente con la fondamentale all'uscita della non linearità. Entrambe le soluzioni migliorano la stima del punto critico, ma continuano a non essere particolarmente robuste in presenza di rumore sul segnale di uscita.

In [8] abbiamo proposto una nuova tecnica, denominata Satv (Sinusoidal Auto Tune Variation), introdotta con il duplice obiettivo di migliorare la stima del punto critico della $G(s)$ e di renderla insensibile al rumore. L'idea di base è quella di forzare l'ingresso al processo ad essere una sinusoide, con una frequenza tale per cui lo sfasamento tra il segnale di ingresso e quello di uscita sia esattamente $-\pi$ radianti. Tale tecnica introduce una maggiore complicazione realizzativa rispetto alla soluzione originale di Astrom, ma ha il vantaggio di riuscire a stimare in modo preciso i parametri critici anche nel caso di processi non passa-basso. Inoltre, verificata recentemente da Clarke [9] in un confronto accurato con altri metodi, è stata valutata come particolarmente valida. Le simulazioni eseguite e le prove sperimentali hanno dimostrato il notevole miglioramento della stima di ω_c e di K_c , rispetto alla classica Atv, in particolar modo nel caso di sistemi con ritardo e in presenza di rumore.

Lo schema di principio della Satv è rappresentato nella figura 2. Inizialmente il deviatore è chiuso sul relè (posizione A) realizzando un anello di retroazione tipico della Atv, al fine di ottenere una stima iniziale, seppure grossolana, dei parametri critici. L'ingresso al processo è rappresentato dal segnale U_A . Si innesca così un ciclo limite e si manifesta un'oscillazione

con una pulsazione ω^* , prossima a quella critica ω_c .

Il deviatore commuta in posizione B a transitorio esaurito sul fronte di salita del segnale U_A , idealmente per $U_A = 0$. L'impianto è quindi connesso con un Phase Locked Loop (PLL) e il segnale di ingresso al processo diventa una sinusoide, con pulsazione ω^* e ampiezza pari a quella della prima armonica del segnale in uscita dal relè. Successivamente l'anello di aggancio in fase regola la frequenza dell'oscillatore in modo che $\varphi = \varphi^* = -\pi$.

Le tecniche avanzate di stima dei punti critici tendono tutte a ottenere una più efficiente predisposizione dei controllori standard allo scopo di migliorare le prestazioni dei processi controllati in anello chiuso. Va chiarito che, mentre per processi passa-basso e con non elevati tempi di ritardo le tecniche standard Atv, nonostante la loro sensibilità al rumore, si comportano in modo più che soddisfacente, nel caso di processi meno 'regolari', invece, la ricerca di nuove soluzioni per il miglioramento della stima dei punti critici risulta di notevole interesse. Purtroppo però tutte le tecniche avanzate rispetto all'Atv presentano una elevata sensibilità al rumore, e tale problema può essere superato solo a spese di una certa complessità dell'algoritmo di stima, il che le rende poco attraenti dal punto di vista dell'implementazione pratica a livello industriale.

Lo scopo della presente memoria è di mostrare come una possibile variante alla tecnica dell'Atv sia la cosiddetta Datv, Dithered Auto Tune Variation e come in alcuni casi applicativi tale modifica si presenti come una possibile alternativa alle tecniche avanzate di tipo Satv, rispetto alle quali ha il vantaggio di una più semplice implementazione.

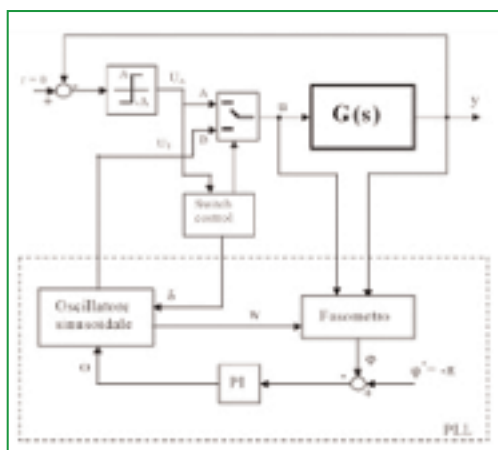


Figura 2 - Schema Satv

Lo schema di principio della tecnica Datv è riportato nella figura 3. L'idea di base è quella di iniettare una vibrazione additiva, cioè un segnale in alta frequenza (dither) e di ampiezza opportuna all'interno di un anello di controllo. L'effetto di tale operazione è quello di imporre una restrizione del settore non lineare, sostanzialmente con una azione vibrazionalmente stabilizzante. In proposito gli studi iniziali si devono a Zames [10], mentre gli effetti linearizzanti di diverse tipologie di dither nel caso di sistemi a relè sono stati analizzati in [11].

Tecnica della vibrazione imposta implementata nel Datv

Lo schema di principio della tecnica Datv è riportato nella figura 3. L'idea di base è quella di iniettare una vibrazione additiva, cioè un segnale in alta frequenza (dither) e di ampiezza opportuna all'interno di un anello di controllo.

L'effetto di tale operazione è quello di imporre una restrizione del settore non lineare, sostanzialmente con una azione vibrazionalmente stabilizzante. In proposito gli studi iniziali si devono a Zames [10], mentre gli effetti linearizzanti di diverse tipologie di dither nel caso di sistemi a relè sono stati analizzati in [11].

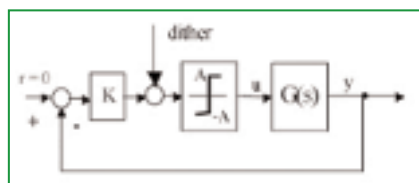


Figura 3 - Diagramma a blocchi della tecnica Atv con dither

Lo schema descritto nella figura 3 è ben noto, in quanto corrisponde alla implementazione dei comuni amplificatori Pwm. Questa configurazione è tipica di molte applicazioni dell'elettronica di potenza e degli azionamenti ad alte prestazioni. Se la frequenza e l'ampiezza della vibrazione imposta (usualmente un dente di sega triangolare) sono opportunamente scelte, in particolare se la frequenza del dither ω_d è consistentemente più alta della ω_c dell'impianto ($\omega_d \gg 10 \omega_c$), allora il modello medio (averaged model) può essere adeguatamente descritto sostituendo il relè più la vibrazione imposta con una saturazione equivalente, il che comporta di fatto il recupero dello schema ideale proposto da Chen-Ching Yu [6], con il vantaggio di ottenere una implementazione intrinsecamente più robusta al rumore e soprattutto di avere a che fare con un sistema di tipo *switching* già fisicamente presente nel processo. Il sistema a ciclo chiuso oscillerà soltanto se il guadagno di anello è abbastanza alto (ovvero se il sistema linearizzato equivalente risulta instabile). Se il guadagno è inferiore a quello critico allora si ha il fenomeno del *quenching*, ovvero il sistema è trascinato ad oscillare alla frequenza della vibrazione imposta: la natura passa basso dell'impianto comporterà un segnale di uscita praticamente trascurabile.

Risulta anche evidente che qualora il guadagno di anello sia molto alto rispetto a K_c allora il segnale di errore sarà molto superiore alla soglia della saturazione equivalente e pertanto sarà riconducibile ad un relè ideale.

Nel caso di un impianto stabile a ciclo aperto con un guadagno proporzionale K e un dither ad ampiezza costante, facendo variare il guadagno K a partire da zero, avremo tre modalità distinte di funzionamento.

Per $K < K_c$ il sistema è stabile e non sono rilevabili oscillazioni all'interno del sistema con $\omega < \omega_d$. Per $K_c < K < (1+\delta)K_c$ il sistema presenta una oscillazione quasi sinusoidale con pulsazione $\omega_0 = (1+c\delta)\omega_c$.

Per $K \gg K_c$ il sistema presenterà una oscillazione con forte distorsione e con $\omega_0 = \omega_r$, dove ω_r è la pulsazione ricavabile con la procedura esatta di Tsytkin [12].

Nelle ipotesi fatte si noti che risulta essere $c < 0$. Va aggiunto che è stata valutata la possibilità equivalente di tenere costante il guadagno K e di variare l'ampiezza della vibrazione imposta. Per semplicità implementativa si è preferita la prima possibilità.

Applicazioni del Datv su processi critici

Nel seguito sono riportati alcuni risultati di simulazioni a riprova di quanto esposto. I risultati sono riferiti ai casi studio già presentati in [13] al fine di operare un confronto obiettivo con le altre tecniche.

Dal confronto risulta evidente che con la tecnica Datv proposta: viene mantenuta la semplicità dell'originaria soluzione proposta da Hagglund-Astrom; la stima di K_c e della pulsa-

zione di cross-over ω_c è in pratica equivalente a quella ottenibile con la tecnica Satv; la tecnica è quasi insensibile alla presenza di un rumore sull'uscita il cui Nsr (Noise to Signal Ratio) arriva al 50%.

L'efficacia del Datv è stata verificata in simulazione e confrontata con l'Atv e il Satv. Si consideri il seguente sistema dinamico con ritardo:

$$G(s) = \frac{(s + 0,2)e^{-5s}}{s^2 + s + 1} \quad (5)$$

Con la Atv il segnale di uscita presenta un'elevata distorsione e perciò la tecnica della funzione descrittiva non risulta particolarmente efficace.

Nella tabella 1 è riportato il confronto tra le due tecniche al variare del livello di rumore presente sul segnale di uscita. Si osserva che con la Satv l'errore sulla stima del punto critico si riduce in modo considerevole, mentre la Datv migliora notevolmente le stime rispetto alle altre tecniche.

Tabella 1 - Risultati dell'identificazione per il processo (1). Confronto tra le tecniche Atv, Satv e Datv

Percentuale di rumore sul segnale di uscita	Atv		Satv		Datv	
	K_c	ω_c	K_c	ω_c	K_c	ω_c
0%	1,05	0,61	1,17	0,69	1,2	0,699
40%	0,96	0,60	1,14	0,68	1,2	0,695
Valori esatti	Costante Critica K_c			Pulsazione Critica ω_c (rad/s)		
	1,19			0,70		

Si consideri ora il caso di un processo dinamico con ritardo elevato:

$$G(s) = \frac{e^{-10s}}{s + 1} \quad (6)$$

Nella tabella 2 è riportata la stima del punto critico ottenuta con le due tecniche.

Tali valori sono utilizzati per la sintonizzazione del controllore Pid, ricorrendo alle regole suggerite da Ziegler-Nichols [1]. Nella figura 6 si mostra a scopo di esempio il confronto tra le prestazioni del sistema ad anello chiuso con controllore Pid sintetizzato usando le stime della Atv tradizionale e della Datv nel caso di risposta al gradino unitario.

Va notato che le differenze tra sistemi in cui la sintesi del controllore dipenda da una stima dei punti critici effettuata utilizzando la tecnica Satv o la tecnica Datv non sono significative. Ciò che varia è l'implementazione dello stimatore e in alcuni casi la fisicità del problema (alimentatori Pwm, valvole on-off) incoraggia l'implementazione di tipo Datv.

Tabella 2 - Risultati dell'identificazione per il processo (2). Confronto tra le tecniche Atv, Satv e Datv

Percentuale di rumore sul segnale di uscita	Atv		Satv		Datv	
	K_c	ω_c	K_c	ω_c	K_c	ω_c
0%	1,27	0,290	1,038	0,290	1,05	0,286
40%	1,12	0,295	1,04	0,294	1,05	0,287
Valori esatti	Costante Critica K_c			Pulsazione Critica ω_c (rad/s)		
	1,04			0,286		

Problemi aperti e sviluppi futuri

La trattazione completa della tecnica Datv è ancora in corso di studio: quello che al momento sembra inconfutabile è che si tratti di un metodo sostanzialmente equivalente nei suoi risultati al metodo che sostituisce il relè delle tecniche Atv con una saturazione [5], con il vantaggio di essere maggiormente robusto al rumore e di prestarsi meglio ad esse-

re usato in tutti quei processi che prevedano fisicamente l'uso di relè. Nella memoria presentata non ci si è occupati della definizione di indici di prestazione efficaci a valutare quantitativamente la bontà del metodo ma ci si è riferiti a casi di processi in cui la stima dei parametri critici con tecniche Atv porta alla sintesi di controllori Pid poco efficienti in termini di qualunque indice di prestazione standard (Ise, Itae, Itse, massima sovraelongazione).

Un altro aspetto importante ancora allo studio è il perfezionamento delle procedure di automatizzazione della Datv e la stima dei suoi tempi di prova. Il tuning del guadagno proporzionale K appare un elemento chiave per portare le stime dei parametri critici a livelli di precisione comparabili con quelli della tecnica Satv.

Al momento il tuning avviene attraverso una procedura di adattamento del parametro K, basata sulla minimizzazione delle componenti armoniche di ordine superiore al primo nel segnale di uscita. In genere bastano pochi passi per arrivare a convergenza, con tempi simili a quelli legati all'aggancio in fase del metodo Satv, ma rimane ancora da quantificare la durata delle prove, che comunque risulta superiore a quella delle tecniche Atv standard. Un ultimo elemento

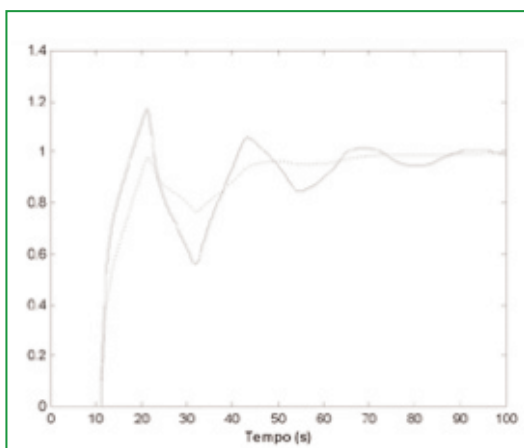


Figura 4 - Confronto delle prestazioni ad anello chiuso. Risposta al gradino. Sintonizzazione del PI utilizzando la formula di ZN e le stime ottenute con Atv (linea continua in blu) e con Datv (linea tratteggiata)

incoraggia l'indagine sulla struttura Datv: sembra particolarmente idonea per la sintesi di controllori nel caso di sistemi di tipo Hammerstein o Wiener [14].

Riferimenti

[1] Ziegler, J.G, Nichols, N.B., "Optimum Setting for Automatic Controllers", Trans. ASME, Vol. 64, pp. 443-444, 1942.
 [2] K.J. Astrom, T. Hagglund, "Automatic Tuning of Simple Regulators with Specifications on Phase and Amplitude Margins", *Automatica*, Vol. 20, pp. 645-651, 1984.
 [3] W.L. Luyben, "Derivation of Transfer Function from Relay Feedback Systems", *Ind. Eng. Chemical Research*, Vol. 26, pp. 2490-2495, 1987.
 [4] M. Zhuang, D.P. Atherton, "Automatic Tuning of Optimum Pid Controllers", *Iee Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 140, pp. 216-224, 1993.
 [5] A. Gelb, W.E. Vander Velde, *Multiple-Input Describing Functions and Nonlinear System Design*, McGraw-Hill, 1968.
 [6] C.C. Yu, *Autotuning of Pid Controllers*, Springer-Verlag, London, 1999.
 [7] T.H. Lee, Q.G. Wang, K.K. Tan, "A modified Relay -based Technique for Improved Critical Point Estimation in Process Control", *Ieee Transaction on Control System Technology*, Vol. 3, pp. 330-337, 1995.
 [8] A. Balestrino, A. Landi, L. Sani, "Atv Techniques: Troubles and Remedies", *Proceedings of the International Symposium on Advanced Control in Chemical Processes AdChem2000*, Vol. 2, pp. 755-759, June 14-16, Pisa, 2000.
 [9] D.W. Clarke, J.W. Park, "Phase-locked Loops for Plant Tuning and Monitoring", *Ieee Proc. Control Theory Appl.*, Vol. 150, pp. 155-169, 2003.
 [10] G. Zames, N.A. Shneydor, "Dither in Nonlinear Systems," *Ieee Trans. Automat. Control*, Vol. 21, pp. 660-667, 1976.
 [11] L. Iannelli, K.H. Johansson, U.T. Jonnson, F. Vasca, "Dither for Smoothing Relay Feedback Systems", *Ieee Transactions on Circuits and Systems*, Vol. 50, pp. 1025-1035, 2003.
 [12] Y.Z. Tsympkin, *Relay Control Systems*, Cambridge Univ. Press, U.K., 1984.
 [13] Balestrino, A., Landi, A., Sani, L., Di Moia, A., "SATV per l'Autosintonia di Regulatori PID," *Automazione e Strumentazione*, pp.107-111, 2001.
 [14] Balestrino, A., Landi, A., Sani, L., "Procedure Automatiche di Autosintonia per Modelli Hammerstein-Wiener," *Automazione e Strumentazione*, pp. 107-112, 2000. ■