

MONITORAGGIO DELLE PRESTAZIONI E DIAGNOSTICA DEI SISTEMI DI CONTROLLO DEI PROCESSI INDUSTRIALI

Riccardo Bacci di Capaci, Claudio Scali

Laboratorio di Controllo dei Processi Chimici (CPCLab), Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale (DICI), Università di Pisa, Pisa (Italy), e-mail: scali@ing.unipi.it

Le prestazioni dei sistemi di controllo giocano un ruolo di primaria importanza nell'industria di processo. Una bassa prestazione degli anelli di regolazione può generare un'alterazione dell'attività produttiva: un abbassamento della qualità dei prodotti, maggiori consumi di materia e di energia, maggiori emissioni e impatti ambientali e, in generale, un forte abbassamento della profittabilità dell'impianto. Il monitoraggio delle prestazioni dei loop di regolazione ha quindi l'obiettivo di individuare, attraverso un'analisi automatica, i loop a bassa prestazione, comprendere le cause di malfunzionamento e fornire suggerimenti su come intervenire.

Negli ultimi anni un significativo sforzo di ricerca è stato dedicato a questi temi. Solitamente, il monitoraggio e la diagnostica viene effettuata mediante le 3 variabili comunemente acquisite: il Set Point (SP), la variabile controllata (PV) e l'uscita del regolatore (OP). La distinzione principale delle cause riguarda le perturbazioni esterne (disturbi), il tuning dei regolatori e i problemi connessi alle valvole di regolazione. In [1] sono ampiamente recensiti gli sviluppi e le nuove direzioni sul tema dell'individuazione e della diagnostica di loop oscillanti.

Un componente importante dei sistemi di controllo è costituito dalle valvole di regolazione che hanno la funzione di attuare sul processo le correzioni calcolate dal regolatore. Un loro malfunzionamento può essere legato a diverse cause e gli interventi richiesti per eliminarlo, sono diversi a seconda della causa. Una di queste può essere l'attrito (in inglese, *stiction*: static-friction), dovuto al fatto che lo stelo della valvola viene stretto con un sistema di tenuta per evitare la fuoriuscita del fluido. Questo porta, se la manutenzione non è ben fatta, ad un eccessivo sforzo richiesto per far muovere la valvola e continue oscillazioni nel suo cammino.

Lo stato dell'arte e le tecniche più aggiornate per la diagnosi dell'attrito delle valvole hanno trovato un compendio completo in [2], dove sono illustrate e confrontate 8 diverse tecniche sulla base di un benchmark di dati industriali. La possibilità di diagnosticare l'attrito è inclusa in molti dei sistemi di monitoraggio proposti dalle maggiori case di software. Dal momento che - solitamente - non è disponibile il segnale di posizione della valvola (MV), un tema di ricerca tutt'ora aperto è la quantificazione dell'attrito: l'obiettivo è la ricostruzione della MV a partire dai valori di PV e di OP. Al riguardo, negli ultimi anni, è apparso in letteratura un numero elevato di tecniche [3], [4]; tuttavia la loro affidabilità è ancora in fase di valutazione [5], [6].

Nei nuovi impianti, l'adozione di strumentazione intelligente, di valvole munite di posizionatori e di sistemi di comunicazione a Bus di Campo accresce sensibilmente il numero

di variabili acquisibili ed analizzabili da un sistema di monitoraggio. Ciò permette una diagnosi molto più precisa (*avanzata*) dei problemi della valvola. Le cause di malfunzionamento non sono quindi limitate alla presenza dell'attrito statico, ma possono includere anche variazioni di elasticità della molla, usura o rottura della membrana, perdita nel sistema di alimentazione dell'aria strumenti, ecc. Lo stesso posizionatore può essere fonte di altri specifici guasti che possono alterare le prestazioni del loop. Tutti questi malfunzionamenti richiedono delle contromisure specifiche. Risulta, quindi, molto importante poter diagnosticare e separare con precisione le diverse cause di malfunzionamento [7].

Negli ultimi anni, l'Università di Pisa sta lavorando ad un progetto di diagnostica avanzata dei loop di regolazione. Il punto di partenza è stato il sistema di monitoraggio delle prestazioni, già sviluppato all'interno del CPCLab del Dipartimento, sulla base delle 3 variabili classiche (SP, PV, OP) e denominato PCU (Plant Check-Up); questo sistema opera da anni su impianti di raffineria, supervisionando oltre 1200 loop [8]. Il primo passo del progetto è stato dedicato alla caratterizzazione qualitativa delle anomalie; nella seconda fase, la caratterizzazione ha avuto un approccio ben più quantitativo. Ciò ha permesso di sviluppare una diagnosi raffinata basata sulle variabili aggiuntive rese disponibili dalla strumentazione intelligente. I primi risultati di questo lavoro sono stati riportati in [9]; gli sviluppi successivi sono illustrati in [10]. Tale attività, dopo le fasi di sperimentazione e di validazione, ha recentemente portato allo sviluppo di nuova architettura del sistema di monitoraggio delle prestazioni PCU. Il progetto di ricerca si avvale di un impianto sperimentale su scala pilota, che ha l'obiettivo di testare nuove tecnologie di automazione per migliorare l'efficienza e la diagnostica predittiva delle centrali termoelettriche [9].

Il posizionatore di una valvola agisce come un loop di controllo interno e permette di velocizzarne la risposta. Una rappresentazione schematica di un loop di portata (FC) con valvola con posizionatore è riportato in Figura 1.

Figura 1 - Diagramma a blocchi di un loop FC con posizionatore.

In aggiunta alle misure standard (SP, OP e PV) disponibili attraverso un controllore PID industriale (Ce), i segnali DS, P ed MV rappresentano le variabili aggiuntive derivanti dal posizionatore. Il segnale di comando (DS, Drive Signal) è il segnale elettrico generato dal controllore interno (Ci). Attraverso il convertitore elettro-pneumatico E/P, si genera il segnale di pressione (P) che agisce sul cappello della valvola e che determina la posizione della valvola (MV, Manipulated Variable). Il blocco P indica il processo fra MV e PV.

Sperimentalmente, sono stati riprodotti numerosi malfunzionamenti e guasti tipicamente riscontrabili sulle valvole industriali. Per fare ciò è stato impiegato un apposito dispositivo, montato sopra il cappello delle valvole testate (Figura 2). Questa apparecchiatura ha permesso di riprodurre le anomalie più comuni: attrito statico, attrito dinamico, perdita di aria e malfunzionamento del convertitore E/P [9].

Figura 2 - Le valvole di regolazione modificate.

L'obiettivo della seconda fase del progetto è stato quello di sviluppare un sistema (potenziato) di monitoraggio, che tenesse conto di queste variabili aggiuntive, dando così origine ad una versione PCU_N, con un massimo di N=6 variabili. A tal proposito, sono stati eseguiti numerosi esperimenti nel campo operativo delle valvole e delle perturbazioni sovrainposte. Le casistiche esaminate sono rappresentative del comportamento generale del sistema, consentendo così di trarre alcune importanti conclusioni.

Nella prima fase del progetto, sono state caratterizzate qualitativamente le diverse risposte in termini di variabili del loop e dell'attuatore (OP, PV; MV, DS, P) a fronte di un cambiamento di SP, per le prove in condizioni nominali e per quelle in condizione di malfunzionamento [9]. La disponibilità della MV permette di introdurre una variabile chiave: l'errore di posizione (TD, Travel Deviation), cioè la differenza tra la posizione reale e la posizione desiderata dello stelo ($TD = MV - OP$). La TD è la variabile più immediata per una prima distinzione tra i diversi fenomeni (Figura 3).

Figura 3 - Andamenti della TD per il caso nominale e per differenti malfunzionamenti.

Ad esempio, l'attrito statico produce oscillazioni persistenti anche quando il SP è costante e viene spesso oltrepassata una banda di accettabilità (TDlim) definita per il caso nominale. L'analisi automatica dell'attuatore si è basata proprio sulla TD e la metodologia è stata convalidata complessivamente su oltre 50 set di dati. Sulla base di semplici metriche della TD, sono stati adottati 6 indici chiave di prestazione (KPI) [10]. Questi indici consentono una valutazione quantitativa dei diversi comportamenti nei casi nominali e in quelli caratterizzati da malfunzionamenti o perturbazioni.

In seguito è stata eseguita un'attenta calibrazione dei valori di soglia dei KPI dell'attuatore e dei parametri addizionali, come la banda TDlim. La calibrazione delle soglie consente di discriminare il comportamento nominale e riconoscere i diversi malfunzionamenti. È stato testato un ampio range di variazione dei parametri e, di conseguenza, sono stati calcolati i valori assunti dai KPI [10].

La nuova logica di diagnostica è basata sulla definizione di tre gradi di performance dell'attuatore: 1) Good - nessun problema; 2) Alert - deterioramento incipiente; 3) Bad - scarsa efficienza. Viene inoltre indicata la causa di malfunzionamento quando la prestazione è considerata non accettabile (livello 2 o 3). Il sistema permette di diagnosticare tre cause di malfunzionamento dell'attuatore: Stiction (individuabile singolarmente); Perdita d'aria o malfunzionamento al convertitore E/P (diagnosticati soltanto insieme); Malfunzionamento generico (comprendente tutte le cause non direttamente riconoscibili) [10].

La logica proposta è stata inclusa nel nuovo sistema di monitoraggio delle prestazioni (PCU_4). La Figura 4 mostra l'architettura del sistema. La disponibilità della MV (e quindi della TD) permette di valutare i KPI dell'attuatore e di attivare il nuovo percorso di analisi e diagnostica (modulo Act_AIM), con test specifici che risultano più accurati nell'individuare le cause reali di malfunzionamento.

Figura 4 - Rappresentazione schematica della PCU_4 (MV e TD disponibili).

In [10] sono messi a confronto i risultati delle due versioni del sistema (PCU_3 e PCU_4) applicate alle prove sperimentali effettuate. Nel complesso emerge chiaramente che la MV permette una diagnosi più accurata di quella basata solamente su OP e PV. L'analisi dell'attuatore della PCU_4 permette di riconoscere guasti che altrimenti rimarrebbero nascosti dalla dinamica del loop.

La convalida della PCU_4, basata sulle 4 variabili SP, PV, OP, MV, è stata effettuata installando il sistema su una centrale termoelettrica a ciclo combinato costituita da 4 unità di produzione. Il sistema operante in linea è stato arricchito con un modulo complementare che esegue la pianificazione delle operazioni, acquisisce e analizza i dati dal DCS tramite server OPC, emette verdetti di diagnostica e consente la visualizzazione dei risultati su una interfaccia grafica.

Nella fase di convalida, 28 loop - considerati critici dagli operatori - sono stati configurati e analizzati per alcuni mesi. Per esempio, gli attuatori per il controllo del livello dei corpi cilindrici ad alta pressione (AP) sono stati costantemente diagnosticati in attrito. Questi problemi sono stati confermati in seguito dagli operatori, che durante la manutenzione, avevano osservato evidenti segni di usura delle valvole. La Figura 5 mostra gli andamenti nel tempo per due diversi loop: un loop LC del corpo cilindrico AP e un loop TC per l'unità di preriscaldamento del metano. In Figura 6 sono riportati i relativi schemi d'impianto.

Figura 5 - Andamenti nel tempo per: sinistra) loop LC con attrito nella valvola; destra) loop TC con buona prestazione.

Il loop LC mostra chiaramente una valvola affetta da attrito. La TD è particolarmente oscillante e oltrepassa spesso la banda di accettabilità TDlim. La MV è oscillante, a causa dei continui movimenti di blocco e sblocco della valvola. Il verdetto sul attuatore è stiction. Al contrario, il loop TC non mostra alcuna oscillazione significativa ad indicare buone prestazioni sia nel loop che nell'attuatore.

Figura 6 - Schemi di impianto: sinistra) corpo cilindrico; destra) preriscaldamento metano.

Per concludere si può affermare che l'adozione di ulteriori variabili, rese disponibili dalla strumentazione intelligente, permette una valutazione più efficiente delle prestazioni dei loop di controllo e degli attuatori ed una diagnosi più accurata delle cause di malfunzionamento. In particolare, l'errore di posizione della valvola (TD) è in grado di rilevare i differenti tipi di malfunzionamento riscontrabili nelle valvole pneumatiche. Dapprima, su un impianto pilota, sono stati definiti e calibrati alcuni indici di prestazione ed una logica di assegnazione del livello di prestazione. In seguito lo stesso algoritmo è stato implementato e validato con successo su un impianto industriale. Pertanto il sistema è attualmente considerato uno strumento affidabile per il monitoraggio delle prestazioni e la diagnostica dei malfunzionamenti. Ulteriori miglioramenti saranno possibili utilizzando le variabili

aggiuntive del posizionatore, come il Drive Signal e la Pressione al convertitore E/P. La prossima attività sarà dedicata alla loro analisi e alla convalida su scala industriale.

- [1] N.F. Thornhill, A. Horch, *Control Eng. Pract.*, 15 (2007) 1196-1206.
- [2] M. Jelali, B. Huang, *Detection and Diagnosis of Stiction in Control Loops: State of the Art and Advanced Methods*, first ed., Springer, London (UK) (2010).
- [3] M.A.A.S. Choudhury, M. Jain, S.L. Shah, D.S. Shook, *J. of Proc. Control*, 18 (2008) 232-243.
- [4] M. Jelali, *J. of Proc. Control*, 18 (2008) 632-642.
- [5] F. Qi, B. Huang, *J. of Proc. Control*, 21 (2011) 1208-1216.
- [6] R. Bacci di Capaci, C. Scali, *Ind. Eng. Chem. Res.*, accettato, in corso di stampa.
- [7] X. Huang, F. Yu, *In Proc. of VII WCICA*, Chongqing (CN), (2008) 6863-6866.
- [8] C. Scali, M. Farnesi, *Ann. Rev. Control*, 34 (2010) 263-276.
- [9] C. Scali, E. Matteucci, D. Pestonesi, A. Zizzo, E. Bartaloni, *In Proc. of XVII IFAC World Congr.*, Milano (I), (2011) 7334-7339.
- [10] R. Bacci di Capaci, C. Scali, D. Pestonesi, E. Bartaloni. *In Proc. of 10th DYCOPS-13*, Mumbai (IND), (2013).