

# Diagnostica avanzata di valvole di regolazione

Il contributo riporta lo stato dell'arte relativo alle problematiche di diagnostica delle valvole di regolazione. Viene presentata una rassegna delle tecniche automatiche di segnalazione e distinzione delle cause di malfunzionamento delle valvole e dei loop di regolazione. Tra queste: attrito, perdita di aria di alimentazione, malfunzionamento del convertitore E/P, disturbi esterni, tuning del regolatore. Viene anche illustrato un sistema di diagnostica, sviluppato presso il CPCLab dell'Università di Pisa, implementato da diversi anni in impianti di raffineria e di generazione di energia elettrica, con esempi di applicazione. In particolare sono evidenziati i vantaggi derivanti da una diagnostica basata sulle variabili ausiliarie rese disponibile da strumentazione intelligente e da comunicazioni via Bus di campo.

Riccardo Bacci di Capaci  
Claudio Scali  
Daniela Pestonesi  
Evaldo Bartaloni

La diagnostica dei loop di regolazione è un aspetto molto importante per migliorare l'efficienza e la competitività degli impianti industriali. Negli ultimi anni un significativo sforzo di ricerca è stato dedicato a questo tema. Solitamente, il monitoraggio e la diagnostica dei loop viene effettuata mediante le tre variabili comunemente acquisite negli impianti: il *Set Point* (SP), la *variabile controllata* (PV) e l'*uscita del regolatore* (OP).

L'obiettivo è quello di avere una rapida diagnosi della insorgenza di una condizione di bassa prestazione e di distinguere tra le diverse cause di malfunzionamento. La distinzione principale viene fatta tra perturbazioni esterne (disturbi), tuning dei regolatori e problemi connessi alle valvole. Per questo motivo sono state proposte tecniche automatiche di individuazione e diagnostica. Una delle prime tecniche [1] per la valutazione della presenza di oscillazioni significative è basata sulla analisi degli attraversamenti dello zero del *segnale di errore* ( $e = PV - SP$ ) e sul calcolo dell'integrale dell'errore (IAE) tra due successivi attraversamenti. Una caratterizzazione analoga dell'oscillazione può essere effettuata per mezzo della funzione di Auto-correlazione [2]. In [3] sono ampiamente recensiti gli sviluppi e le nuove direzioni sul tema dell'individuazione e della diagnostica di loop oscillanti.

Ultimamente, lo stato dell'arte e le tecniche più aggiornate per la diagnosi dell'attrito (in inglese, *stiction*: static-friction) delle valvole di regolazione hanno trovato un compendio completo in [4], dove sono illustrate e confrontate otto diverse tecniche sulla base di un benchmark di dati industriali. La possibilità di diagnosticare l'attrito è inclusa in molti dei sistemi di monitoraggio delle prestazioni dei loop di regolazione, propo-

sti attualmente 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, un numero elevato di tecniche è apparso in letteratura negli ultimi anni ([5], [6]); ma l'affidabilità di queste tecniche è ancora in fase di valutazione, come mostrato da [7] e [8].

Negli impianti di moderna installazione, 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. Questo fatto permette una diagnosi molto più precisa dei problemi della valvola. Le cause di malfunzionamento delle valvole pneumatiche non sono limitate alla presenza dell'attrito statico (e a problemi connessi, come banda morta, isteresi, gioco), 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 posizionario 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. Nonostante ciò, questo argomento non è stato ancora ampiamente affrontato in letteratura: [9] è uno dei pochi lavori pubblicati. Negli ultimi anni, *Enel Ingegneria e Ricerca* ha avviato un progetto di diagnostica avanzata dei loop di regolazione. Il punto di partenza è stato il sistema di monitoraggio delle prestazioni, già svi-

## GLI AUTORI

R. Bacci di Capaci, C. Scali - Laboratorio di Controllo dei Processi Chimici (CPCLab), Dipartimento di Ingegneria Civile e Industriale (Dici), Università di Pisa, Pisa;  
D. Pestonesi, Enel, Ingegneria e Ricerca, Area Tecnica Ricerca, Pisa;  
E. Bartaloni, Clui-Exera, Livorno.

luppato all'interno del CPCLab dell'Università di Pisa, sulla base delle *tre variabili classiche* (SP, PV, OP) e denominato PCU (Plant Check-Up, [10]). Il primo passo di questo progetto è stato dedicato alla caratterizzazione sperimentale delle anomalie delle valvole ed è stato orientato ad una diagnosi raffinata basata sulle variabili aggiuntive rese disponibili dalla strumentazione intelligente. I primi risultati di questo lavoro sono riportati in [11]; gli sviluppi successivi sono illustrati in [12]. Tale attività, dopo una fase di sperimentazione e di validazione, ha portato allo sviluppo di nuova architettura del sistema di monitoraggio delle prestazioni PCU, sulla base di quattro o sei misure disponibili. Il presente articolo è strutturato come segue: la prossima sezione descrive l'impianto sperimentale, la strumentazione ed i diversi tipi di anomalie riprodotte; la sezione seguente illustra brevemente la procedura di definizione degli indici di prestazione, la calibrazione dei valori di soglia e la logica del sistema di diagnostica; nella penultima sezione sono descritti i risultati ottenuti per alcuni loop industriali; infine, nell'ultima sezione sono riportate le conclusioni e gli sviluppi futuri.

di comunicazione *Fieldbus Foundation*, il sistema di controllo è in grado di raccogliere i dati provenienti dai numerosi strumenti "intelligenti" installati. Tra gli altri, sono stati considerati due posizionatori elettro-pneumatici (Fisher Rosemount - tipo DVC5020F e ABB - tipo TZID). Gli attuatori sono accoppiati a valvole sferiche che controllano la portata dell'acqua nelle tubazioni di ricircolo. Il posizionatore della valvola agisce come un loop di controllo interno sulla posizione della valvola e permette di velocizzarne la risposta. Una rappresentazione schematica di un *loop di portata* (FC) con valvola con posizionatore è riportato nella ► **figura 1**. In aggiunta alle misure SP, OP e PV, disponibili attraverso un *controllore PID industriale* (Ce), i segnali DS, P ed MV rappresentano le variabili derivanti dal posizionatore (per un totale di sei). Il *segnale di comando* (DS, Drive Signal) è il segnale elettrico generato dal *controllore interno* (Ci). Attraverso il convertitore elet-

tro-pneumatico E/P, si genera il *segnale di pressione* (P) che agisce sul cappello della valvola e che determina la posizione della valvola (MV, dall'inglese 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 dispositivo apposito, montato sopra il cappello della valvola (► **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. Ulteriori dettagli sono riportati in [11].

Nella seconda fase del progetto, l'attenzione è stata focalizzata sulle principali cause di oscillazione di un loop e sulle più comuni cause di anomalia delle valvole. L'obiettivo è stato quello di sviluppare un sistema (potenziato) di monitoraggio, che tenesse conto delle variabili aggiuntive messe a disposizione dalla strumentazione intelligente, dando così origine ad una versione *PCU<sub>N</sub>*, 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 possono essere considerate rappresentative del comportamento generale del sistema, consentendo così di trarre alcune importanti conclusioni. Le prove sono state effettuate con

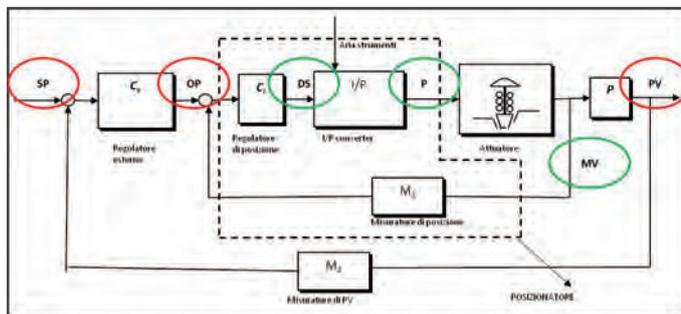


Figura 1 - Diagramma a blocchi di un loop FC con posizionatore

### L'impianto sperimentale

*Idrolab* è un impianto sperimentale su scala pilota di proprietà Enel Ingegneria e Ricerca, costruito con l'obiettivo di testare nuove tecnologie di automazione per migliorare l'efficienza e la diagnostica predittiva delle centrali termoelettriche. Il progetto in questione riguarda lo sviluppo di una nuova architettura del sistema automatico per il monitoraggio delle prestazioni dei loop di regolazione e la diagnosi dei malfunzionamenti (PCU).

Nell'impianto viene garantito un ricircolo continuo di acqua tra due serbatoi posti a quote diverse [11]. La presenza di tubazioni di bypass dotate di valvole di regolazione e la possibilità di agire su pressione e livello del serbatoio superiore, permette di effettuare esperimenti in un'ampia gamma di condizioni operative. Con il protocollo



Figura 2 - Le valvole di regolazione modificate



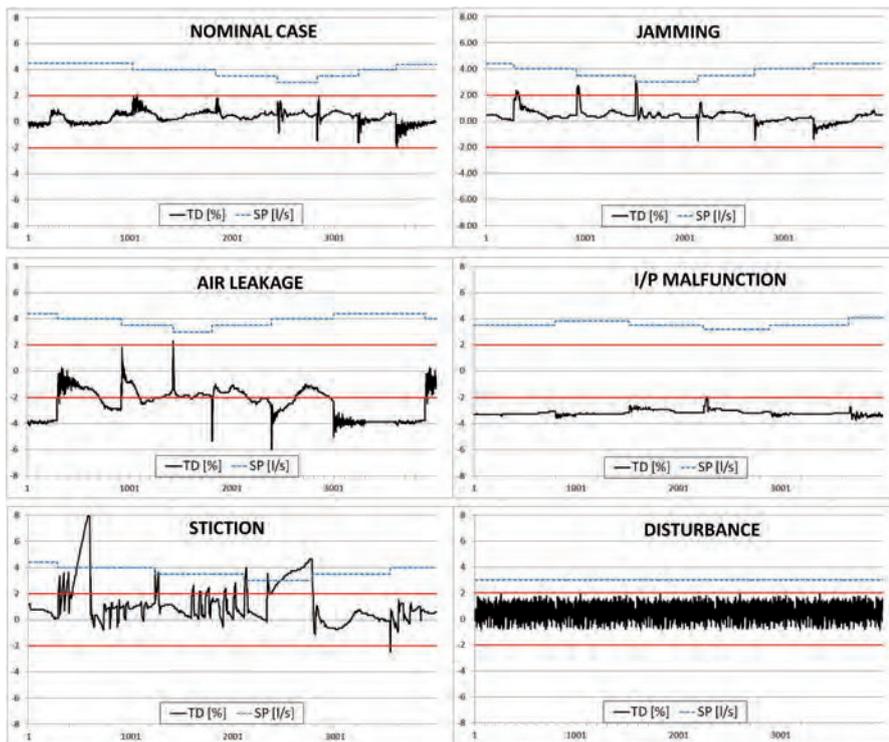


Figura 3 - Andamenti della TD per il caso nominale e per differenti malfunzionamenti

la valvola operante in *modalità a vuoto* (Travel Mode) e in *modalità di controllo* (Control Mode). In Control Mode il loop FC può agire direttamente sulla valvola oppure un *loop LC* agisce in cascata sul loop FC. Le acquisizioni di dati sono state caratterizzate dall'introduzione di anomalie alla valvola o di perturbazioni esterne, dapprima nel loop operante in condizioni stazionarie (a Set Point costante) e poi ripetute applicando variazioni a gradino al SP di portata.

Per prima cosa, 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 nominali e per le prove in condizione di malfunzionamento (dettagli in [11]). 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. Nella ► **figura 3** sono mostrati gli andamenti tipici della TD nel caso nominale e in presenza dei diversi malfunzionamenti.

Possono essere formulate le seguenti osservazioni qualitative. Nel caso nominale la TD ha un valore medio prossimo allo zero

e presenta solamente picchi di ampiezza modesta in corrispondenza delle variazioni del SP. Pertanto, può essere facilmente definita una *banda di accettabilità* (TDlim). L'attrito dinamico (jamming) si presenta molto simile al caso nominale e quindi risulta difficile da rilevare con precisione. La perdita d'aria determina un netto spostamento verso il basso del valore medio della TD, che staziona a lungo fuori dalla banda di accettabilità. Il malfunzionamento del convertitore E/P manifesta un comportamento molto simile alla perdita d'aria. L'attrito statico produce oscillazioni persistenti, anche quando il SP è costante e viene spesso oltrepassata la banda di accettabilità. Le oscillazioni sulla TD possono essere causate anche dalla presenza di disturbi periodici (o da un regolatore con tuning aggressivo) ma, in questo caso, le ampiezze dei picchi di oscillazione sono molto piccole perché la MV tende a seguire la OP. Tale differenza permette quindi di escludere la presenza di attrito statico. È importante considerare che queste osservazioni sono abbastanza generali poiché riguardano malfunzionamenti sui singoli componenti del loop di controllo. Il loro aspetto non è quindi influenzato dalle diverse caratteristiche del processo, sia esso di natura chimica o fisica.

### Nuova logica di diagnostica

L'analisi automatica dell'attuatore si è basata proprio sull'errore di posizione della valvola. La metodologia è stata convalidata complessivamente su oltre 50 set di dati. Sulla base di semplici metriche della TD, sono stati adottati sei indici chiave di prestazione (KPI) [12]. 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 di alcuni parametri addizionali (fra cui la banda TDlim). La calibrazione delle soglie consente di discriminare il comportamento nominale e consente di 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. Per ragioni di brevità, non sono riportati questi risultati. Ovviamente, i valori di calibrazione delle soglie possono dipendere dagli specifici dispositivi presenti nel loop; inoltre, in vista di una applicazione del sistema su scala industriale, sono da correlare con il livello di prestazione accettabile proprio degli operatori di sala controllo. Pertanto, i valori di soglia possono variare nelle diverse applicazioni, ma gli andamenti qualitativi della ► **figura 3** rimangono complessivamente inalterati.

I valori calibrati per i KPI degli attuatori di Idrolab e la sintesi della logica che determina lo stato dell'attuatore sono riportati in [12]. A ciascun indice è associata una o più anomalie della valvola. Di seguito si danno alcuni richiami: l'attrito statico è prontamente rilevabile; la perdita d'aria e il malfunzionamento del convertitore E/P non sono chiaramente separabili; l'attrito dinamico non sembra rilevabile attraverso la TD. Va osservato che questo tipo di approccio ignora la situazione in cui si verificano simultaneamente due o più guasti, fatto che potrebbe accadere nella pratica. Questo scenario è tuttora oggetto di ricerca e sperimentazione.

Ovviamente, per verificare l'affidabilità della diagnosi sono necessarie convalide e conferme da parte degli operatori degli impianti: ciò è stato fatto nel periodo successivo all'implementazione del sistema e ha portato ad aggiustamenti minori dei parametri. 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 verdetto di Stato dell'attuatore si basa sugli indici KPI confrontati con i valori di soglia. 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 ma responsabili di un guasto).

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). Questo modulo emette un verdetto di Stato e diagnostica le cause di malfunzionamento.

Nella precedente PCU (PCU\_3) l'unico percorso di analisi era orientato alla diagnostica del loop (ora indicato come Loop\_AIM) e serviva per rilevare la presenza di disturbi esterni o problemi di tuning. Le anomalie delle valvole venivano rilevate solo indirettamente e sempre classificate come attrito statico. Nonostante questa limitazione, il sistema opera da anni su impianti di raffineria, supervisionando oltre 1200 loop; maggiori dettagli sui diversi moduli della PCU\_3 si trovano in [10] e [13]. Nella PCU\_4, l'analisi del loop si attiva in seguito all'analisi dell'attuatore e vengono eseguiti test più accurati, in grado di distinguere le diverse cause sull'attuatore.

In [12] sono messi a confronto i risultati delle due versioni del sistema PCU applicate alle prove sperimentali effettuate su Idrolab. Come osservazione complessiva, emerge chiaramente che la MV (e la TD) permette una diagnosi più accurata di quella basata solamente su OP e PV. L'a-

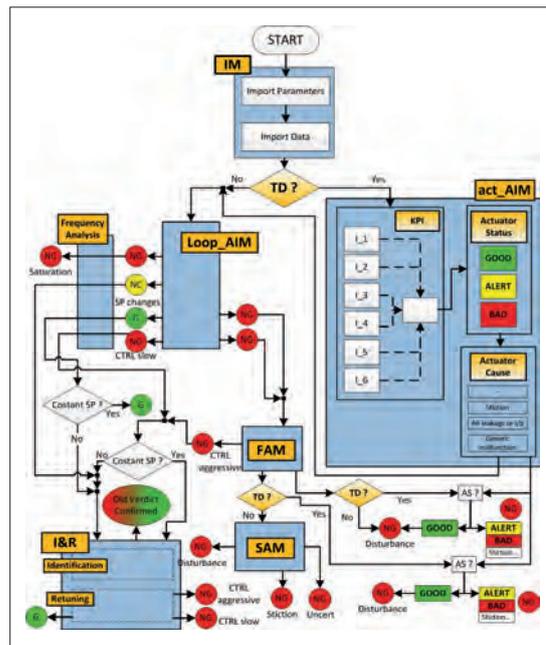


Figura 4 - Rappresentazione schematica della PCU\_4 (MV e TD disponibili)

nalisi dell'attuatore della PCU\_4 permette di riconoscere guasti che altrimenti rimarrebbero nascosti dalla dinamica del loop. Successive sperimentazioni, basate sull'analisi dei segnali DS e P, hanno consentito di diagnosticare ulteriormente i malfunzionamenti dell'attuatore. In questo caso, è stato possibile separare la perdita d'aria e il malfunzionamento E/P. Sono stati condotti esperimenti a livello di impianto pilota, in un range meno esteso di condizioni operative e sono stati proposti quattro indici KPI aggiuntivi. Di conseguenza, è stata proposta una specifica struttura del programma: PCU\_6, con sei variabili e dieci indici. Questa attività di ricerca è tutt'ora in corso, grazie alla collaborazione con Enel & Clui-Exera, ma necessita di dati industriali per una convalida completa.

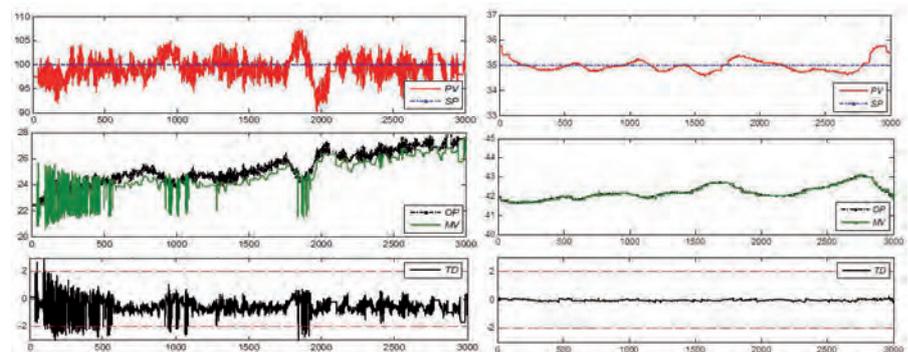


Figura 5 - Andamenti nel tempo per: (sinistra) loop LC con attrito nella valvola; (destra) loop TC con buona prestazione

## Convalida su un impianto industriale

La convalida del sistema PCU\_4, basato sulle quattro variabili SP, PV, OP, MV (ovvero TD), è stata effettuata installando il sistema su una centrale termoelettrica a ciclo combinato costituita da quattro unità di produzione da 370 MWe ciascuna. I gruppi elettrici esaminati sono composti da una turbina a gas, uno scambiatore a recupero di calore ed una turbina a vapore. La regolazione viene eseguita attraverso valvole pneumatiche con posizionatore.

Il sistema operante in linea è stato arricchito con un modulo complementare (denominato PCU\_4\_GUI), che esegue la pianificazione delle operazioni, acquisisce e analizza i dati dal DCS tramite server OPC, emette verdetto di diagnostica e consente la visualizzazione dei risultati su una interfaccia grafica. Nella fase di convalida in campo, 28 loop - considerati critici dagli operatori - sono stati configurati e analizzati per alcuni mesi.

Come primo risultato, il sistema ha permesso di valutare: 21 loop con buone prestazioni e 7 con prestazioni scadenti (di cui 2 affetti da disturbi esterni e 5 da problemi di tuning); 19 valvole con buone prestazioni e 9 affette da stiction.

Per esempio, gli attuatori per il controllo del livello dei corpi cilindrici ad alta pressione (HP) 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 HP e un loop TC per l'unità di preriscaldamento del metano.

Il loop LC mostra chiaramente una valvola affetta da attrito. La TD è particolarmente

oscillante e spesso oltrepassa la banda di accettabilità TDlim. Si noti che anche la PV è oscillante. La MV è oscillante, a causa dei continui movimenti di blocco e sblocco della valvola. Il verdetto sul attuatore è stiction poiché i valori degli indici KPI superano i rispettivi valori di soglia. Al contrario, il loop TC non mostra alcuna oscillazione significativa ad indicare buone prestazioni sia nel loop che nell'attuatore.

### Conclusioni

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), mediante opportuni indici di prestazione, 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 può essere 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.

### Bibliografia

- [1] T. Hägglund, *Control Eng. Pract.*, n. 3, pp. 1543-1551, 1995.
- [2] N. F. Thornhill, B. Huang, H. Zhang, *J. of Proc. Control*, n. 13, pp. 91-100, 2003.
- [3] N. F. Thornhill, A. Horch, *Control Eng. Pract.*, n. 15, pp. 1196-1206, 2007.
- [4] 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.
- [5] M. A. A. S. Choudhury, M. Jain, S.L. Shah, D.S. Shook, *J. of Proc. Control*, n. 18, pp. 232-243, 2008.
- [6] M. Jelali, *J. of Proc. Control*, n. 18, pp. 632-642, 2008.
- [7] F. Qi, B. Huang, *J. of Proc. Control*, n. 21, pp. 1208-1216, 2011.
- [8] R. Bacci di Capaci, C. Scali, *Chemical Engineering Transactions*, n. 32, pp. 1201-1206, 2013.
- [9] X. Huang, F. Yu, *In Proc. of VII WCICA*, Chongqing (China), pp. 6863-6866, 2008.
- [10] C. Scali, M. Farnesi, *Ann. Rev. Control*, n. 34, pp. 263-276, 2010.
- [11] C. Scali, E. Matteucci, D. Pestonesi, A. Zizzo, E. Bartaloni, *In Proc. of XVII IFAC World Congr.*, Milano (Italy), pp. 7334-7339, 2011.
- [12] R. Bacci di Capaci, C. Scali, D. Pestonesi, E. Bartaloni, *In Proc. of 10<sup>th</sup> Dycops-13*, Mumbai (India), 2013.
- [13] C. Scali, S. Marraccini, M. Farnesi, *In Proc. of IFac-Dycops 2010*, Louvain (Belgium), pp. 683-688, 2010. ■

## Nati per creare e mantenere sicurezza



## Rilevatori di gas

**INDUSTRIAL  
SCIENTIFIC**

**OLDHAM**  
Gas Monitoring Solutions

Una gamma completa di rilevatori di gas che comprende sensori, fissi e portatili, e centraline di controllo per la sicurezza delle persone e degli impianti, adatti a qualsiasi applicazione, in campo civile e industriale.

- Sensori e centraline certificati SIL e ATEX
- Rilevatori portatili, dall'usa e getta al multigas (fino a 6 gas)
- Sensori catalitici, a semiconduttore, a cella elettrochimica, a infrarosso o PID
- Stazioni di calibrazione automatiche
- Noleggio possibile grazie all'esclusivo servizio **iNet**
- Calibrati in fabbrica, già pronti per l'uso

Cinisello B. - Mi (Italy)  
tel. +39 02660271  
www.isoil.com  
vendite@isoil.it

**ISOIL**  
INDUSTRIA

**Le soluzioni che contano**

