

Ottimizzazione della combustione di un forno di raffineria

In questo articolo si presenta un innovativo schema di controllo impiegato per la regolazione della combustione di un forno di raffineria orientata all'ottimizzazione dell'efficienza termica. La strategia di controllo permette di mantenere costante il rapporto stechiometrico tra l'aria e il fuel gas e di minimizzare la concentrazione di O_2 nei fumi. L'efficienza del forno è stata incrementata del 2% comportando un ritorno economico di circa 200.000 €/anno. La stessa soluzione può essere estesa a tutti i forni di una raffineria: considerando una lavorazione media di 3,3 Mton/anno di greggio, si è stimato un rientro economico minimo di 1 milione €/anno per ogni campagna di ottimizzazione dei controlli combustione.

Giacomo Astolfi
Luca Barboni

Keyword

Controllo combustione, efficienza termica, identificazione matematica, controllori PID.

In una raffineria la maggior parte del calore necessario ai processi di distillazione viene fornito dai forni. È evidente che un forno è un'apparecchiatura di fondamentale importanza e che il suo funzionamento influisce largamente sull'energia totale consumata da una raffineria. Sulla base di queste considerazioni, un fattore chiave per la minimizzazione dei costi operativi legati alla gestione di un forno è la scelta della strategia di controllo impiegata per la regolazione della combustione che avviene al suo interno. La combustione è finalizzata a produrre il calore necessario a riscaldare la carica inviata a degli impianti a valle.

Gli ingredienti della combustione sono l'aria comburente e il fuel gas combustibile che generalmente è costituito da una miscela di metano e altri idrocarburi. Le variabili di processo più critiche, impiegate in tutti gli schemi di controllo come variabili controllate, sono la temperatura della carica in uscita dal forno (TUF) e la concentrazione di O_2 presente nei fumi di scarico. Altre grandezze critiche, impiegate come vincoli di processo, sono le concentrazioni di CO e NOx anch'esse presenti nei fumi di scarico, che non devono superare i limiti imposti dalle vigenti norme ambientali.

Per soddisfare le norme ambientali e garantire alcune norme di sicurezza su apparecchiature critiche, altri studi sono stati proposti dagli autori [1], [2], [3], [4].

In un tipico schema di controllo impiegato per regolare la combustione di un forno, la concentrazione di O_2 viene misurata nel camino del forno e inviata ad un controllore AC; tale controllore in cascata regola il controllore dell'aria comburente (FC-aria). La TUF viene misurata sulle tubazioni di uscita della carica e inviata ad un differente

regolatore, TC, che in cascata controlla contemporaneamente i regolatori delle portate di fuel gas (FC-fuel gas) e di fuel oil (FC-fuel oil).

Quello presentato è il classico schema di regolazione impiegato nel controllo della combustione dei forni di raffineria. L'accorgimento che ogni forno di raffineria deve soddisfare, prevede che all'interno della camera di combustione sia inviata una quantità maggiore di aria rispetto alla quantità di fuel gas. In ambito tecnico questo vincolo viene spesso indicato come regolazione anti-smoke [5], [6]; in base a questo criterio si evita la produzione di CO e di NOx nei fumi di scarico.

Tale regolazione, benché utile per evitare emissioni di composti inquinanti in atmosfera, non tiene conto dell'effettivo eccesso di aria inviato nel forno. Per questo motivo molto del calore fornito dal forno alla carica in ingresso viene perso in parte attraverso l'iniezione di un eccesso di comburente "freddo", in parte negli stessi fumi di scarico per l'incremento della velocità di attraversamento della zona convettiva del forno. La conseguenza è un aumento della concentrazione di O_2 e con l'inevitabile abbassamento dell'efficienza complessiva.

Lo scopo di questo articolo è presentare le fasi di progettazione, simulazione e implementazione di una nuova logica di controllo che, oltre a garantire l'anti-smoke della combustione, ha come obiettivo il mantenimento di un basso rapporto stechiometrico aria/fuel gas con conseguente minimizzazione del tenore di O_2 nei fumi.

In una prima fase sono state definite le specifiche del sistema di controllo e stati analizzati i principali punti deboli dell'attuale sistema di regolazione. Successivamente sono stati identificati in MatLab i modelli più critici per il processo in esame. I modelli identificati e la nuova strategia

GLI AUTORI

G. Astolfi, SY.@S. - System Automation Services; L. Barboni, API - Raffineria di Ancona

di controllo sono stati implementati in MatLab/Simulink al fine di verificare le prestazioni dinamiche in termini di robustezza e reiezione ai disturbi. Infine, dopo che la nuova logica è stata implementata nel sistema di controllo distribuito (DCS-Distributed Control System) impiegato nella raffineria, sono state valutate le prestazioni reali e sono stati valorizzati in termini economici i risultati raggiunti.

Definizione del problema

La combustione, in un forno di raffineria, richiede una quantità di aria maggiore alla quantità di fuel gas al fine di evitare combustioni incomplete che produrrebbero alte concentrazioni di CO nei fumi di scarico e fuliggine e incombusti all'interno della camera di combustione. D'altra parte, però, una quantità eccessiva di aria produrrebbe una quantità eccessiva di fumi di scarico con una significativa perdita di efficienza termica.

La ►figura 1 mostra le caratteristiche della combustione di un forno in base al rapporto aria/fuel gas misurato al suo interno. Aumentando il rapporto stechiometrico aria/fuel gas (rappresentato lungo l'asse delle ascisse) si noti come la produzione di CO e incombusti dovute all'eccesso di aria si azzeri, ma parallelamente l'efficienza termica si abbassa drasticamente rispetto alla condizione di combustione ottima. Al contrario, abbassando il rapporto stechiometrico, la produzione di componenti inquinanti sale notevolmente e l'efficienza termica, dopo aver raggiunto un punto di massimo, inizia a decadere.

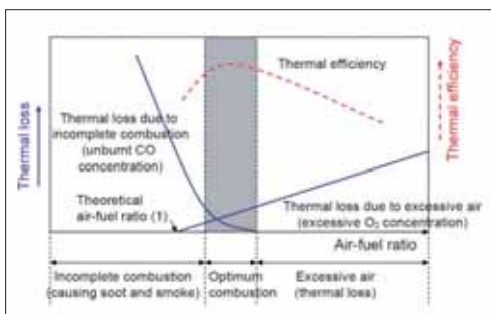


Figura 1 - Relazione tra rapporto stechiometrico aria/fuel gas ed efficienza termica in un forno

In base a queste considerazioni, risulta evidente che per garantire una combustione ottima dal punto di vista termico, è necessario garantire un rapporto stechiometrico adeguato. Per far sì che ciò avvenga, la regolazione di un forno di raffineria viene

espletata mediante regolatori PID (regolatori che includono le azioni Proporzionale, Integrata e Derivativa) [7].

Come spiegato nel corso della descrizione dello schema di regolazione, l'obiettivo fondamentale che deve essere garantito in un forno, è il mantenimento di una quantità di aria maggiore rispetto alla quantità di fuel gas. Questo obiettivo veniva correttamente garantito dal precedente sistema di controllo impiegato nel forno in esame. La logica di controllo è mostrata nella ►figura 2. Sebbene siano sempre state evitate emissioni di composti inquinanti, la vecchia logica di regolazione manifestava i seguenti punti deboli:

- 1) Difficoltà nel mantenere una bassa concentrazione di O₂ nei fumi di scarico.
- 2) Instabilità nella regolazione della temperatura della carica in uscita dal forno.
- 3) Rapporto stechiometrico aria/fuel gas non costante nei transitori.
- 4) Transitori pericolosi in cui si può avere un'elevata quantità di aria che poteva portare il forno a lavorare ad alte pressioni.
- 5) Non astatismo del sistema di controllo rispetto ai disturbi in ingresso.

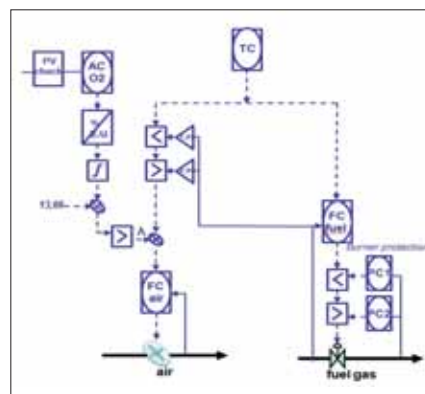


Figura 2 - Vecchio schema di controllo

Il primo passo compiuto nella realizzazione della nuova architettura di controllo è consistito nella realizzazione dei modelli matematici in grado di individuare le dinamiche delle grandezze critiche del processo in esame.

Identificazione dei modelli

In ambito industriale, soprattutto nei processi chimici e petrolchimici, le dinamiche di processo possono essere agevolmente identificate da modelli del primo o secondo ordine con ritardo [8], [9], [10]. In particolare, le dinamiche del forno oggetto

di questo studio, sono state identificate tramite modelli del primo ordine con ritardo in accordo alla seguente struttura espressa nel dominio di Laplace:

$$g_i(s) = \frac{K_i}{1 + \tau_i s} e^{-T_{di}s}$$

dove K_i è il guadagno del processo, τ_i è la costante di tempo del processo e T_{di} è il ritardo del processo. Impostando il problema di identificazione in questi termini, si può dedurre che la modellazione ha seguito quello che tecnicamente viene definito un approccio grey-box: la struttura del modello è nota, mentre i parametri del modello sono stati identificati. L'identificazione è stata realizzata, dopo aver condotto uno step-test nel forno, impiegando dei tools di identificazione presenti in MatLab.

Per brevità di trattazione nel seguito verranno presentati i modelli relativi alle due variabili più critiche del processo: la concentrazione di O₂ nei fumi di scarico e la temperatura della carica in uscita dal forno (TUF). Le figure che verranno mostrate nel seguito, si riferiscono a dati di validazione.

Modello dell'O₂

La concentrazione di O₂ presente nei fumi di scarico rappresenta una misura dell'efficienza termica del forno: più la concentrazione è alta, più è la quantità di calore perso in atmosfera. Questa grandezza può essere agevolmente predetta tramite le quantità di aria (in convezione forzata) e di fuel gas inviate nella camera di combustione, e la posizione della valvola (dumper) che regola la depressione all'interno del forno. Come si può osservare dalla ►figura 3 il modello esibisce un ottimo fitting: l'RMSEP (Root Mean

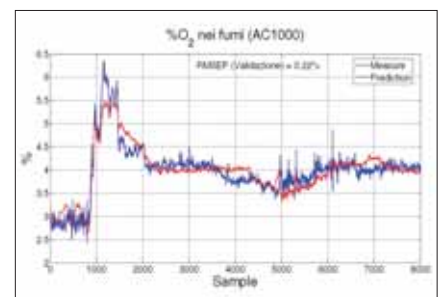


Figura 3 - Risultati in validazione del modello di predizione del tenore di O₂ nei fumi

Square Prediction) in validazione, si assesta intorno allo 0,22%; considerando che il fondo scala della misura del tenore di O₂ è di 10%, l'errore di modellazione è esattamente il 2,2% del fondo scala dello strumento.

Modello della temperatura di uscita forno

La temperatura della carica in uscita dal forno (TUF) è la variabile di processo più critica; una sua instabilità può comportare notevoli inconvenienti ai processi a valle, che usualmente sono costituiti da colonne di distillazione. È compito del sistema di controllo di un forno mantenere il più stabile possibile questa grandezza anche a seguito di forti oscillazioni della temperatura o della quantità della carica in ingresso al forno.

La TUF può essere facilmente stimata dalle quantità di combustibile e comburente e dalla temperatura della carica in ingresso al forno. Nella ► **figura 4** si mostrano i risultati in validazione del modello ottenuto; anche in questo caso il modello esibisce un ottimo fitting mostrando un RMSEP intorno ai 0,50 °C. Considerando che in questo caso il fondo scala dello strumento per la misura della TUF è di 300 °C, l'errore di modellazione è inferiore allo 0,2% del fondo scala.

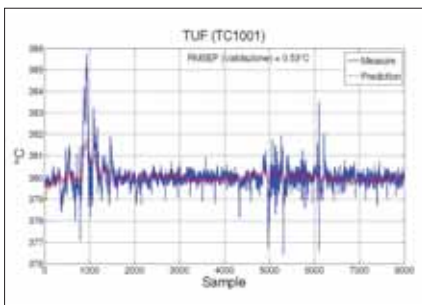


Figura 4 - Risultati in validazione del modello di predizione della TUF

Nuova architettura di controllo

Dopo aver identificato i modelli matematici del processo, è stata ingegnerizzata la nuova strategia di controllo. Il nuovo schema ha permesso di superare le limitazioni precedentemente evidenziate della vecchia logica; con la nuova architettura di regolazione viene garantita una maggiore stabilità nel controllo della TUF, viene minimizzata la concentrazione di O₂ nei fumi e viene aumentata la robustezza del sistema di controllo garantendo un discreto livello di astatismo rispetto ai

disturbi agenti sul processo.

La chiave per il raggiungimento di questi obiettivi è il mantenimento, sia in condizioni di regime che durante tutti i transitori, del rapporto stechiometrico aria/fuel gas intorno al valore ottimale. Si è calcolato che, in base al peso molecolare del fuel gas impiegato come combustibile nel forno in esame, il rapporto stechiometrico aria/fuel minimo è 13,66.

Per ottenere un rapporto stechiometrico pressoché costante è stata ingegnerizzata una logica di controllo del tipo *cross-linked limiting ratio*. Il sistema di controllo, per raggiungere il set-point (SP) impostato nei controllori della TUF e del tenore di O₂ nei fumi, manipola automaticamente i controllori slave del fuel gas e dell'aria. I SP dei controllori master (TUF e O₂) non vengono inviati direttamente ma vengono processati da una logica che, utilizzando le misure attuali della portata di aria e di fuel, ne limita le variazioni. In questo modo viene garantito l'anti-smoke del forno e, soprattutto, viene limitato l'eccesso di aria rispetto al fuel, sia a regime che durante i transitori di salita e discesa.

L'introduzione del doppio selettore pass-alto/passa-basso che processa i set-point e le misure provenienti dal campo, fa sì che non venga eseguita alcuna manovra sui set-point fintanto che la stechiometria desiderata non è effettivamente raggiunta in campo, a meno di una soglia impostabile da utente. Qualora si verifichi un cambiamento nella temperatura di uscita forno, la portata d'aria e quella di fuel sono libere di aumentare o diminuire per riportare a set la variabile controllata, ma le manovre vengono eseguite automaticamente in maniera sincrona.

Per garantire maggiore stabilità all'architettura di controllo è stato inserito un controllo in FeedForward (FF) [7] che, in base alle variazioni della temperatura o della portata della carica di ingresso, effettua delle correzioni in anticipo sui SP dei controllori dell'aria e del fuel.

In aggiunta, poiché tramite questa nuova struttura di controllo si è scelto di tentare di raggiungere un target sulla concentrazione di O₂ nei fumi molto basso (al limite della zona di combustione incompleta/emissione del grafico riportato nella ► **figura 2**), si è deciso di prevedere una ulteriore protezione inserendo un controllo in override che garantisce il vincolo sulla

concentrazione di CO nei fumi: in caso di innalzamento della concentrazione di monossido di carbonio, il controllore del CO prenderebbe il sopravvento ed alzerebbe la portata di aria ristabilendo le corrette concentrazioni dei composti nei fumi. Infine sono stati predisposti due controlli in override in cui le condizioni di guardia sono rappresentate dal controllore di pressione del fuel gas.

La nuova architettura di controllo, con tutte le logiche di protezione precedentemente descritte, è riportata nella ► **figura 5**.

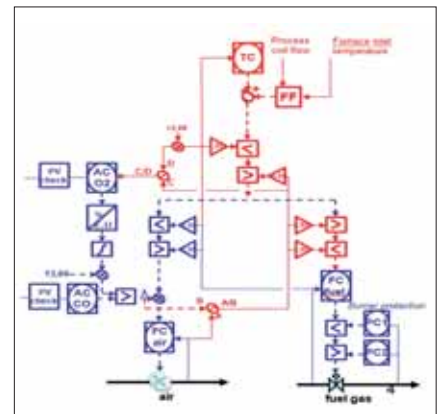


Figura 5 - Nuovo schema di controllo impiegato per la regolazione della combustione di un forno di raffinaria

Risultati

Nelle figure che seguono si possono osservare i benefici introdotti dopo l'implementazione della nuova logica di controllo. La regolazione della temperatura della carica in uscita dal forno risulta essere molto stabile. Infatti, come si può osservare dalla ► **figura 6**, attraverso il nuovo schema di regolazione, l'errore di controllo ha una deviazione standard (2σ) non superiore ai 2 °C.

Allo stesso modo, sono molto evidenti, i benefici ottenuti nella regolazione del tenore di O₂ nei fumi di scarico. La

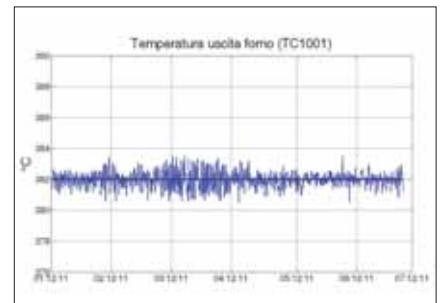


Figura 6 - Regolazione della temperatura della carica in uscita dal forno tramite il nuovo schema di controllo

► **figura 7** mostra l'andamento di questa grandezza regolata dalla nuova architettura di controllo.

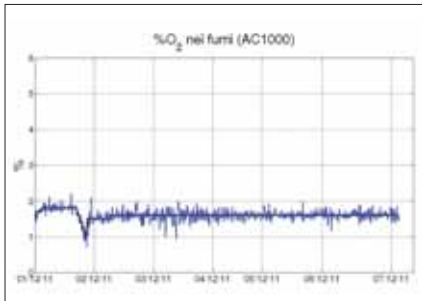


Figura 7 - Regolazione della concentrazione dell'O₂ nei fumi tramite il nuovo schema di controllo

L'effettivo incremento delle performance nella regolazione, è illustrato nella seguente ► **figura 8**. La deviazione standard dell'errore di controllo impiegando il vecchio schema di controllo era di $2\sigma=1,51\%$, mentre la deviazione standard ottenuta con il nuovo schema è di $2\sigma=0,37\%$ con una riduzione di oltre il 75%. L'aumento della stabilità di controllo nella regolazione della concentrazione di O₂ nei fumi, ha permesso di abbassare il SP

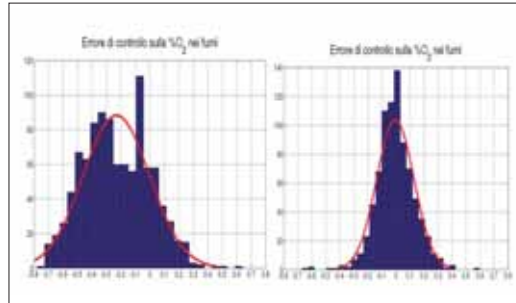


Figura 8 - Confronto delle deviazioni standard degli errori di controllo della %O₂ nei fumi prodotti dal vecchio schema di controllo (figura a sinistra) e dal nuovo schema di controllo (figura a destra)

del regolatore dell'ossigeno avvicinandosi così ai vincoli del processo. Questo ha portato ad un incremento significativo dell'efficienza termica del forno che può essere verificata dalla ► **figura 9**. Dalla figura è possibile notare come la temperatura dei fumi di scarico misurata alla base del camino del forno si sia abbassata di circa 3 °C, dopo l'inserimento della nuova architettura di controllo; prima dell'ottimizzazione proposta la termocoppia posta nel camino del forno misurava una temperatura media di circa 254 °C,

mentre dalla data di inserimento della nuova logica (17/11/12), il sensore ha rilevato una temperatura media di circa 251 °C; ciò ha portando ad un incremento dell'efficienza termica di oltre il 2%. La conseguenza di ciò è quantificabile in un abbassamento del fuel gas effettivamente inviato al forno per fornire lo stesso calore al processo a valle. Considerando gli attuali prezzi di mercato a cui è scambiato il fuel gas, la valorizzazione economica di questo miglioramento è quantificabile in 200.000 €/anno.

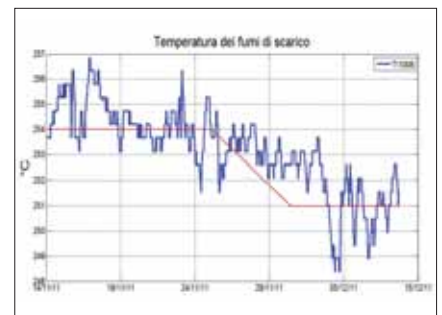


Figura 9 - Andamento della temperatura dei fumi di scarico misurata in uscita dal camino del forno

Conclusioni

In questo articolo è stata presentata una innovativa strategia di controllo impiegata per la regolazione della combustione in un forno di raffineria. L'architettura prevede una limitazione incrociata sulle portate di aria e di fuel gas, in modo da prevedere una regolazione sincrona con un mantenimento costante del rapporto stechiometrico.

L'intero processo di combustione è stato modellato matematicamente dopo uno step test condotto in impianto. Con lo scopo di valutare le prestazioni dinamiche, il modello del processo così come il nuovo schema di controllo sono stati implementati nell'ambiente di simulazione dinamica MatLab/Simulink.

I risultati ottenuti dopo l'implementazione della nuova strategia di controllo sono stati molto significativi; il miglioramento principale è stato il mantenimento di un basso tenore di O₂ nei fumi. Ciò ha determinato un decremento significativo della portata di fuel gas bruciato nel forno, con un risparmio annuo di circa 200.000 €.

Eseguendo una campagna di ottimizzazione, impiegando questa strategia di

controllo a tutti i forni impiegati in un impianto di raffineria, si potrebbero ottenere dei risultati molto significativi: considerando infatti una lavorazione media di 3,3 Mton/anno di greggio ed ipotizzando un incremento di efficienza di circa il 2%, si avrebbe un risparmio di fuel gas pari a circa 607 kg per ogni 1.000 ton di carica. Valorizzando questo fuel gas risparmiato secondo il valore di mercato a cui attualmente è scambiato, si otterrebbe un ritorno economico superiore a 1 milione €/anno.

Bibliografia

- [1] S. M. Zanolì, G. Astolfi and L. Barboni, "Applications of Fault Diagnosis Techniques for a Multishaft Centrifugal Compressor", *18th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED'10)*, June 23-25 2010, Marrakech.
- [2] S. M. Zanolì, G. Astolfi and L. Barboni, "FDI of Process Faults based on PCA and Cluster Analysis", *Conference on Control and Fault-Tolerant Systems (SysTol'10)*, October 6-8 2010, Nice.
- [3] S. M. Zanolì, G. Astolfi and L. Barboni, "Fault Detection and Isolation System

for a Multishaft Centrifugal Compressor", *Offshore Mediterranean Conference (OMC'11)*, March 23-25 2011, Ravenna.

[4] S. M. Zanolì, G. Astolfi and L. Barboni, "Prediction of the Syngas composition of a Gasification Process", *5th International Symposium on Communications Control & Signal Processing (ISCCSP'12)*, May 02-04 2012, Rome.

[5] Shell, *Practice Worth Replicating for Automatic Excess Oxygen Control for Natural Draft Fired Heaters*, GS.07.52472 - ECCN EAR 99 - October 2009

[6] Shell, *Control System And Instrumented Protective Functions For Fired Equipment: Multi Burner Control*, DEP 32.24.20.37 January 1998

[7] Shinskey F.G., *Process Control Systems*, Mc Graw Hill, New York, 1996.

[8] Maciejowski J.M., *Predictive control with constraints*, Prentice Hall, 2002.

[9] Ljung, L. *System Identification - Theory for the User*, Prentice-Hall, 1897.

[10] Zhu Y., T. Backx, *Identification of Multivariable Industrial Processes for Simulation, Diagnosis and Control*, Springer - Verlag, 1993. ■