

La simulazione dinamica per progettare e realizzare un impianto GNL

Nella progettazione di un impianto di produzione GNL, principalmente basata su simulazioni in condizioni stazionarie, l'esecuzione di studi di simulazione dinamica risulta sempre più importante per migliorare il design dei sistemi più critici, legati ai cicli di compressione. L'articolo descrive l'esperienza maturata nell'esecuzione di studi dinamici per un impianto in Algeria, evidenziandone problematiche, soluzioni intraprese e "lessons learned" acquisite, da un punto di vista tecnico e gestionale.

Anton Marco Fantolini
Francesco Croci
Massimiliano Sbarsi
Luigi Pedone

Keyword

*simulazione dinamica,
GNL, compressore,
anti-pompaggio,
lessons learned*

GLI AUTORI

A.M. Fantolini, F. Croci, M. Sbarsi, L. Pedone, Saipem SpA

L'esecuzione di studi di simulazione dinamica sta diventando fondamentale per la progettazione di nuovi impianti di Gas Naturale Liquefatto (GNL). Le applicazioni tipiche di questi studi riguardano l'analisi di componenti critici dell'impianto come compressori, turbine a gas e sistemi di torcia.

Attraverso gli studi di simulazione dinamica è possibile identificare modifiche al design che permettono di migliorare in maniera significativa le prestazioni, la sicurezza ed affidabilità di gestione dell'impianto rispetto ad un approccio progettuale tradizionale.

Inoltre, se le modifiche al design vengono identificate con sufficiente anticipo, esse possono essere implementate con un minore impatto economico, portando un significativo risparmio durante le attività di Ingegneria, Approvvigionamento e Costruzione.

Il design di un impianto GNL è tipicamente basato su una simulazione in condizioni stazionarie. Questo approccio, però, non permette di prendere in considerazione le caratteristiche delle macchine rotanti, responsabili direttamente della capacità di tali impianti, e di studiare i sistemi di controllo. Una simulazione dinamica risulta essenziale per comprendere i transitori e le dinamiche di impianto, per analizzare e verificare gli schemi di controllo e le procedure operative.

Il modello dinamico permette di calcolare le variabili di processo come funzione del tempo. Inoltre è possibile valutare le deviazioni di processo dai casi di marcia normali operativi, incluse le procedure di avviamento e di fermata.

Questo articolo presenta l'esperienza maturata attraverso uno studio di simulazione dinamica applicato ad un impianto di produzione GNL (GNL-3Z Project) costruito da Saipem S.p.A. per Sonatrach in Algeria.

Nell'articolo si forniscono, oltre ad una breve descrizione del processo di produzione del GNL, il numero di casi studiati, evidenziando i problemi affrontati e le soluzioni implementate. Inoltre sono descritte le "lessons learned" emerse nello svolgimento del progetto, insieme ai benefici ottenuti attraverso gli studi di simulazione.

L'approccio dello studio dinamico

Uno studio di simulazione dinamica richiede l'implementazione di una serie di attività prima di ottenere il risultato desiderato; è prima di tutto necessario definire esattamente lo scopo del lavoro, che include i limiti del modello ed i casi da analizzare. Dal punto di vista esecutivo, il primo passo consiste nella raccolta dei dati (incluso l'analisi degli schemi isometrici, se necessario), in un formato utilizzabile dal software di simulazione, ed assicurando che siano facilmente accessibili, riutilizzabili e verificabili.

Si passa poi alla costruzione del modello vero e proprio o delle sue parti (sotto-modelli) sulla base dei P&ID, delle matrici Causa ed Effetto e dei dati disponibili delle apparecchiature. Gli elementi modellati per i sistemi di compressione sono le apparecchiature (turbine a gas, motori elettrici, scambiatori di calore, serbatoi, ecc.), le tubazioni principali, il controllo, le valvole di protezione (anti-pompaggio, hotgas bypass e bleed valves), le logiche dei sistemi di emergenza con le relative valvole e le procedure di normale avviamento e spegnimento.

Una volta integrati gli eventuali sotto-modelli, si procede con la preparazione del modello finale allineato in stazionario con il bilancio di materia ed energia concordato.

A questo punto è possibile preparare ed analizzare un primo report, nel quale si evidenziano i

dati e l'approccio utilizzati, ed il risultato della verifica del modello con il bilancio concordato.

In seguito all'aggiornamento del modello con i commenti del cliente ed eventuali nuovi dati, si procede con la preparazione degli scenari da eseguire, definendone la durata e le modalità di svolgimento. L'esecuzione degli scenari e la preparazione dei dati in forma grafica permettono di facilitare l'analisi degli stessi e sono alla base dei singoli report che, inoltre, includono le osservazioni, le conclusioni e possibili raccomandazioni.

Il documento definitivo è costituito dal report finale comprensivo di tutti gli scenari eseguiti e dei suggerimenti finali.

Descrizione del processo di produzione del GNL

Il gas naturale alimentato all'impianto viene compresso nel "Feed Gas Compressor" ed inviato all'unità di rimozione del mercurio. Il gas è poi trattato in un assorbitore di gas acidi per rimuovere CO_2 ed H_2S , se presenti. Il gas viene quindi disidratato attraverso letti a setacci molecolari e poi inviato all'unità di recupero dei liquidi associati al gas naturale per rimuovere i componenti idrocarburi più pesanti del butano, che solidificherebbero nelle successive apparecchiature criogeniche. Il raffreddamento richiesto dal trattamento è fornito da un ciclo di refrigerazione a propano.

Il gas naturale trattato è compresso nel "Residue Gas Compressor" e raffreddato con propano in scambiatori di tipo Kettle. Successivamente, viene inviato al "Main Cryogenic Heat Exchanger (MCHE)", dove è liquefatto attraverso lo scambio termico con un "Mixed Refrigerant (MR)".

Il GNL così prodotto è prima inviato alle sezioni di recupero dell'elio e di stripping dell'azoto e poi ai serbatoi di stoccaggio.

Il "Boil Off Gas (BOG)" che arriva dallo stoccaggio è ricompresso ed inviato al sistema di gas combustibile. Il gas proveniente dalle sezioni di recupero dell'elio e di stripping dell'azoto è compresso nell'"End Flash Gas Compressor (EFGC)" ed

inviato anch'esso al sistema di gas combustibile.

I seguenti compressori sono stati considerati nello scopo della simulazione dinamica: "Feed Gas Compressor", "Residue Gas Compressor", "Turbo-Expander", "Auxiliary Propane Compressor", "Refrigerant (C3/MR) Compressors", "End-Flash Gas Compressors" e "Boil-Off Gas Compressors".

I risultati dello studio in alcuni casi significativi

Partenza del feed gas compressor

Il gas naturale è inviato al recipiente in aspirazione al "Feed Gas Compressor" per rimuovere eventuali liquidi. Il vapore è poi diretto al compressore; il gas compresso è poi inviato ad altre unità di trattamento. Uno schema semplificato è mostrato nella ► **figura 1**.

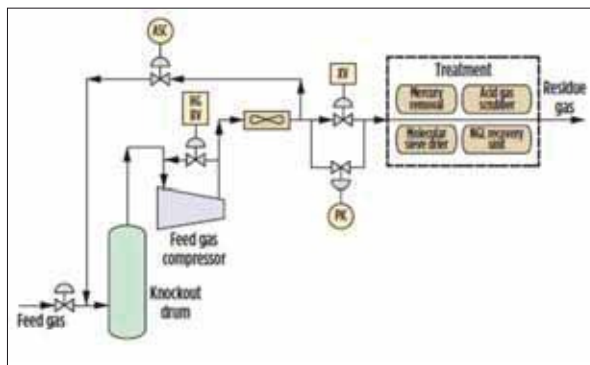


Figura 1 - Schema semplificato del Feed Gas Compressor

Durante l'avviamento dell'impianto, il compressore pressurizza tutte le unità a valle, sino al "residue gas compressor". Il volume delle unità a valle è molto grande (circa 3.000 m^3). La simulazione ha dimostrato che, durante l'avviamento, quando la pressione delle unità a valle è bassa, il compressore lavorerebbe in una regione di "stone-wall" sino a quando i sistemi downstream non sono pressurizzati, come mostrato nella ► **figura 2** (linea rossa).

Per evitare di operare il compressore con alte portate, si è deciso di isolarlo dalle unità a valle durante l'avviamento. È stato deciso di utilizzare un bypass della

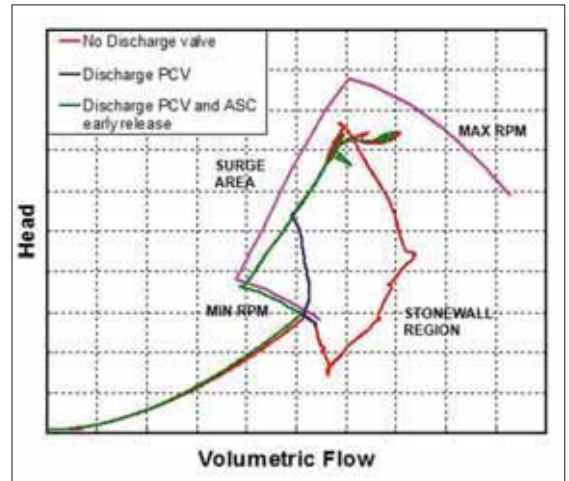


Figura 2 - Comportamento del Feed Gas Compressor durante l'avviamento

valvola di blocco sulla mandata del compressore, in modo da regolare la pressurizzazione dei sistemi a valle. I risultati sono mostrati nella ► **figura 2** (linea blu). In questo caso è stato permesso al controllore anti-pompaggio di operare durante l'incremento della velocità del compressore da quella minima a quella operativa.

End flash gas compressor: trip del motore

Quasi l'85% del gas combustibile di GNL-3Z è composto dall'end-flash gas che arriva dalla testa delle colonne di recupero dell'elio e di stripping dell'azoto. La miscela dei due gas viene compressa a circa 32 bara in due treni di compressione, ognuno dei quali è composto da tre stadi. Uno schema semplificato è mostrato nella ► **figura 3**.

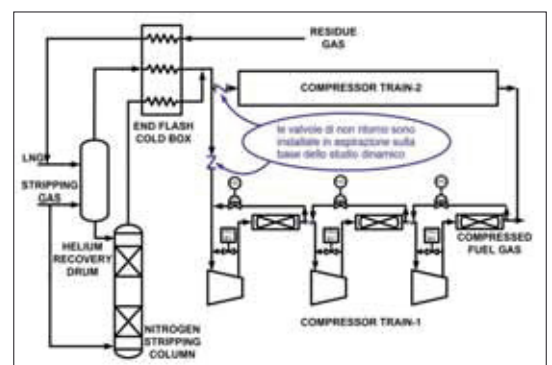


Figura 3 - Schema semplificato dell'End Flash Gas Compressor

Sono state approfonditamente studiate le performance del sistema di anti-pompaggio durante l'arresto (trip del motore). Il punto operativo del primo stadio di compressione entrava nella zona di pompaggio dopo il trip (► **figura 4**, linea blu). Per

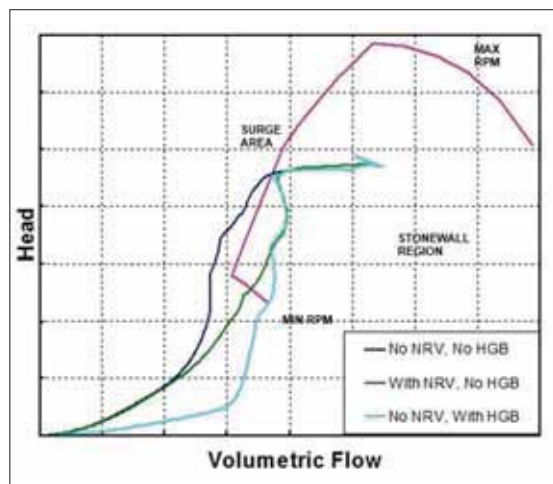


Figura 4 - Comportamento dell'End Flash Gas Compressor durante l'avviamento

risolvere il problema, sono state esaminate due opzioni: la prima, di utilizzare una valvola di non ritorno in aspirazione (► figura 4, linea verde), la seconda, di utilizzare una valvola di Hot-Gas By-pass (HGB, ► figura 4, linea turchese).

Entrambe le soluzioni appaiono valide. Analizzando il grafico che mostra la temperatura dei gas in mandata al compressore, si è potuto verificare che nel caso di utilizzo di una valvola HGB, la temperatura dei gas in mandata al compressore raggiunge valori elevati. Questo può essere dannoso per le tenute del compressore. Per questo motivo, la scelta finale è stata quella di prevedere una valvola di non ritorno in aspirazione al compressore.

Sezione di liquefazione: compressori di refrigerazione

I due fluidi refrigeranti, propano e MR, sono compressi in due treni, ognuno mosso da una turbina a gas General Electric Frame 7: il primo ha sullo stesso albero il compressore a quattro stadi del propano e lo stadio a più alta pressione del compressore MR; il secondo muove i due stadi a bassa e media pressione del compressore MR. Di seguito sono descritti tre casi legati alla simulazione dei compressori di refrigerazione.

Caso 1: verifica delle dimensioni della valvola di anti-pompaggio del compressore propano

Uno degli obiettivi delle simulazioni eseguite era quello di verificare le dimensioni (CV) delle valvole di anti-pompaggio. Di

seguito si descrive il caso della valvola dello stadio di bassa pressione del compressore propano.

Nella maggior parte dei casi eseguiti, si è notato che un CV minimo di 1.600 era adeguato per proteggere il sistema dal rischio di pompaggio.

Tuttavia, nel simulare l'avviamento del compressore, le dimensioni della valvola non si sono dimostrate adeguate. I risultati esaminati sono presentati nelle figure che seguono.

La ► figura 5 mostra una mappa del primo stadio del compressore del propano con il CV della valvola di anti-pompaggio di 1.600 (linea rossa) e 2.600 (linea blu), durante l'avviamento del sistema con propano. Utilizzando un CV di 1.600, il punto operativo risulta essere nella regione di pompaggio per una parte significativa del percorso. Appare quindi necessario utilizzare il CV più alto per poter far partire il sistema in sicurezza ad una pressione di 1,5 barA.

Facendo partire il compressore con "defrost gas" o azoto, come previsto nella fase di commissioning della macchina, è necessario un CV ancora più alto per evitare la regione di pompaggio. È necessario utilizzare un CV di 3000, insieme ad un incremento della pressione di partenza da 1,5 a 2,5 barA. Il caso del "defrost gas" è mostrato nella ► figura 6.

Per permettere la partenza del sistema con le varie composizioni (propano, azoto e "defrost gas") è stato implementato un sistema semi-automatizzato,

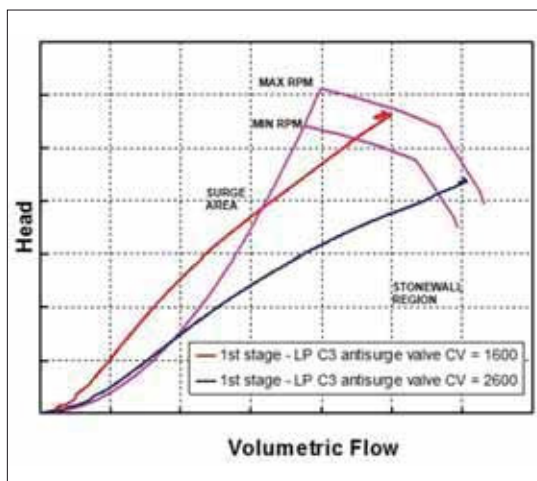


Figura 5 - Comportamento del primo stadio del compressore del propano durante l'avviamento con propano

basato sui risultati sopra esposti. L'operatore dell'impianto, in funzione del tipo di gas utilizzato, selezionerà l'apposito selettore sul DCS. L'informazione viene inviata al controllo del compressore che gestisce il valore massimo di apertura della valvola attraverso un "software clamp" ed i relativi permessivi alla partenza del compressore.

I differenti approcci utilizzati per il design delle valvole, partendo dalle simulazioni stazionarie e dinamiche, hanno portato a risultati diversi.

Con le simulazioni stazionarie, il design è basato su un certo numero di casi operativi in condizione di steady state, con diverse condizioni del gas all'ingresso e all'uscita della valvola (temperatura, pressione, densità, ecc.).

La simulazione dinamica è utilizzata per esplorare un set continuo di stati dell'impianto; ad esempio, durante la simulazione dell'avviamento del compressore, sono

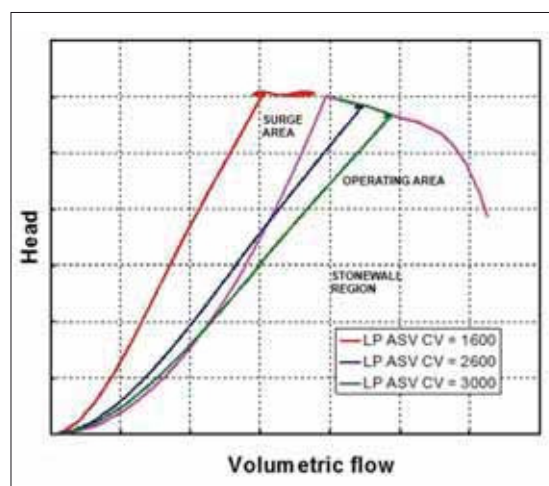


Figura 6 - Comportamento dello stadio a bassa pressione del compressore del propano durante l'avviamento con "defrost gas"

investigate tutte le condizioni, da quelle di “settle-out” alle condizioni stazionarie finali. Queste includono condizioni intermedie con incrementi della velocità del compressore, variazioni delle condizioni all’ingresso/uscita del compressore, differenze di pressione a cavallo della valvola di anti-pompaggio, ecc.

In breve, utilizzando la simulazione dinamica è stato possibile verificare casi come l’avviamento, nei quali il design originale (basato su simulazioni stazionarie) non era ottimale, ed intervenire con adeguate modifiche.

Caso 2: Design della valvola di “Hot Gas By-pass” (HGB) del compressore MR

Un altro obiettivo di questo studio era la verifica della necessità (e l’eventuale tempo di chiusura richiesto) di una valvola di HGB per lo stadio a bassa pressione del compressore MR.

Il compressore in questione è dotato di una “bleed valve”, che controlla in riciclo del gas, e di una valvola di scarico in torcia sulla mandata per il controllo di pressione.

Attraverso diversi test dinamici, si è stabilito che il tempo di apertura della “bleed valve” poteva essere diminuito sino ad 1 secondo. Inoltre, si è verificato come un’apertura sufficientemente veloce della bleed, insieme ad un’apertura più lenta della valvola di controllo a torcia, permettevano di ridurre le dimensioni, fino addirittura ad eliminare, la valvola di HGB.

I risultati sono mostrati nella ► **figura 7**.

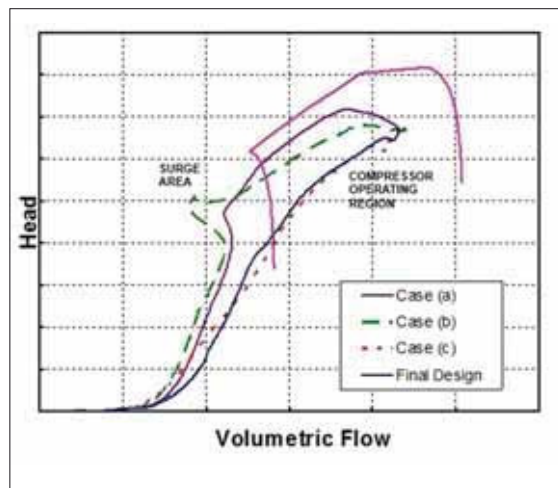


Figura 7 - Comportamento dello stadio a bassa pressione del compressore MR durante la fermata non programmata (trip)

Caso 3: Apertura della valvola di anti-pompaggio del compressore MR in seguito al trip del compressore del propano

L’esecuzione della simulazione del caso di trip del compressore del propano ha mostrato come questo evento ha un impatto importante anche sui compressori MR; il primo stadio del compressore MR entra infatti nella zona di pompaggio subito dopo il trip del compressore del propano.

Una serie di simulazioni hanno dimostrato come, per evitare questo fenomeno, sia necessario che entrambe le valvole di anti-pompaggio degli stadi a bassa e media pressione del compressore MR, aprano immediatamente dopo il trip del compressore del propano, con un’azione di “feed-forward”.

Le valvole di anti-pompaggio sono rappresentate nella ► **figura 8**.

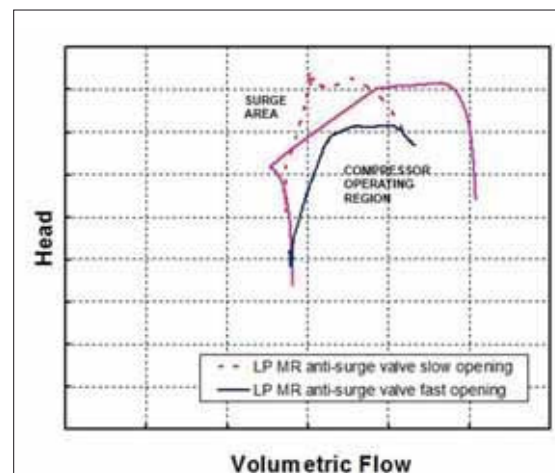


Figura 8 - Comportamento dello stadio a bassa pressione del compressore MR in seguito al trip del compressore del propano

Metodologia esecutiva ed esperienze acquisite

Dall’esperienza del progetto GNL-3Z sono emersi alcuni principi e linee guida certamente estendibili ad altri progetti.

È fondamentale comprendere che uno studio di simulazione dinamica è un processo complesso, che richiede un’interazione continua tra il contratto, il fornitore della simulazione, i fornitori delle principali apparecchiature coinvolte ed il cliente finale, sia a livello manageriale che tecnico.

Per portare a termine con successo il progetto, è quindi importante includere nel team ingegneri con padronanza del processo e, soprattutto, capacità di cooperare, tentando di mantenere lo stesso gruppo per tutta la durata degli studi.

I dati di processo alla base dello studio (comprese le procedure, dettagliate ed ufficiali) devono essere accurati e consistenti per permettere di raggiungere un elevato grado di fedeltà della simulazione. A tal fine, occorre rivolgere un’attenzione speciale ai parametri critici che possono invalidare i risultati ottenuti (disegni isometrici, caratteristiche delle valvole, dati inerziali dei compressori e loro driver, curve caratteristiche dei compressori, ecc.).

Oltre un certo grado di sviluppo del modello, le modifiche ai dati dovrebbero essere minimizzate, al fine di ottenere risultati coerenti e mantenere una tempistica efficace. Le modifiche su impianti in fase di costruzione diventano, infatti, più onerose con il progredire del progetto, ed inoltre, comportano costose ri-esecuzioni di simulazioni aggiuntive.

Una volta configurati, occorre che i modelli siano approvati, prima di procedere con le simulazioni. In particolare, i seguenti punti dovrebbero essere verificati ed accettati dalle parti coinvolte: topologia del modello e corrispondenza con i P&ID, dati principali utilizzati, corrispondenza con il bilancio di materia ed energia, corretta implementazione degli isometrici, valori di inerzia e curve caratteristiche dei compressori.

Infine, dopo il completamento del modello, è importante svolgere un’azione di “debugging” attraverso l’esecuzione di test, per rilevare eventuali debolezze.

Da un punto di vista gestionale, uno studio di simulazione dinamica segue una schedula relativamente standard che può essere adattata in funzione di esigenze specifiche di progetto. I punti principali sono: il Kick off meeting, nel quale vengono definiti gli scopi dello studio e forniti i dati per la preparazione del modello; la preparazione dell’interim report che, una volta completato il modello, descriva

la corrispondenza del modello nei confronti del bilancio materiale e di energia; la validazione del modello, con un incontro dedicato tra le parti coinvolte al fine di definire eventuali problemi e relative soluzioni; la revisione del modello; l'esecuzione dei singoli casi di studio e la preparazione dei relativi report, i cui risultati preliminari vengono anticipati al fine di correggere eventuali errori ed allineare la simulazione.

Occorre organizzare un certo numero di meeting intermedi per monitorare l'avanzamento delle attività ed assicurare pronte azioni correttive, al fine di evitare rischi e/o ritardi per il progetto. Lo studio è completato con la preparazione di un report dettagliato che include un indice delle attività svolte, gli obiettivi dello studio, la descrizione dello scopo del modello, la comparazione tra "stream" del modello e del bilancio, i singoli studi ed i relativi risultati, inclusi di eventuali azioni correttive.

Benefici

L'attività svolta sul progetto di GNL-3Z

ha dimostrato come la simulazione dinamica sia un eccellente strumento per supportare e verificare il design dell'impianto durante le fasi di Ingegneria, Approvvigionamento e Costruzione.

L'esperienza effettuata ha rivelato che la simulazione dinamica è uno strumento utile per la verifica ed ottimizzazione delle procedure operative e dei sistemi di controllo e protezione, e che attraverso l'analisi critica dei risultati, è possibile incrementare la qualità del design.

Inoltre, l'implementazione di soluzioni più efficaci, in fasi iniziali del progetto, riduce il costo totale del progetto stesso.

La simulazione dinamica può riprodurre il comportamento di un impianto reale e offre un punto di vista che non è ottenibile con simulazioni in stazionario. Inoltre, l'utilizzo di modelli dinamici attraverso le diverse fasi dell'ingegneria incrementa la conoscenza delle dinamiche di processo. Questa comprensione, insieme alla valutazione di sequenze e procedure di package complessi, è fondamentale durante l'avviamento dell'impianto e per identificare eventuali colli di bottiglia e

migliorare la controllabilità e l'affidabilità del processo.

Aggiornando in seguito i modelli dinamici (ad esempio includendo le modifiche fatte in cantiere durante l'avviamento), è possibile incrementare la vita ed il valore dei modelli ben oltre la fase di ingegneria. Ogni modifica / miglioramento degli schemi di controllo, la creazione di scenari what-if, ecc., possono essere facilmente implementate e verificate attraverso il modello dinamico.

I ritorni economici in termini di attività di commissioning dell'impianto, di minimizzazione del rifacimento dei lavori e di maggiore affidabilità dell'impianto, sono certamente significativi.

Per poter massimizzare i ritorni legati alla simulazione è necessario applicare una strategia esecutiva che includa uno strumento di modellazione riconosciuto e validato, un team di progetto con esperienza ed attitudine a collaborare, uno scopo del lavoro ben definito, un piano di attività flessibile ed una sufficiente "maturità" del design e la disponibilità di dati delle apparecchiature attendibili. ■

Per la misurazione di pressione differenziale e temperatura.



Trasmittore PF4

- Elevata precisione di misurazione e stabilità a lungo termine
- Risposta rapida e isteresi minima
- Segnali analogici liberamente configurabili
- Contatto relé ON/OFF integrato
- Elevato limite di sovrappressione
- Unità di misura selezionabili
- Idoneo per applicazioni con presenza di polveri e umidità elevate

Ulteriori informazioni per la misura di umidità e temperatura all'indirizzo www.rotronic.it o al numero di telefono 02 39 00 71 90.

ROTRONIC Italia srl, Via Repubblica di San Marino,1, I-20157 Milano, info@rotronic.it

rotronic
MEASUREMENT SOLUTIONS