

Il ruolo della simulazione dinamica

Potenzialità e principali caratteristiche degli ambienti software per la simulazione dinamica d'impianti termoelettrici. Un'applicazione di tali software per studiare l'influenza dei principali parametri costruttivi sul comportamento dinamico dell'impianto e la sua interazione con la rete elettrica esterna

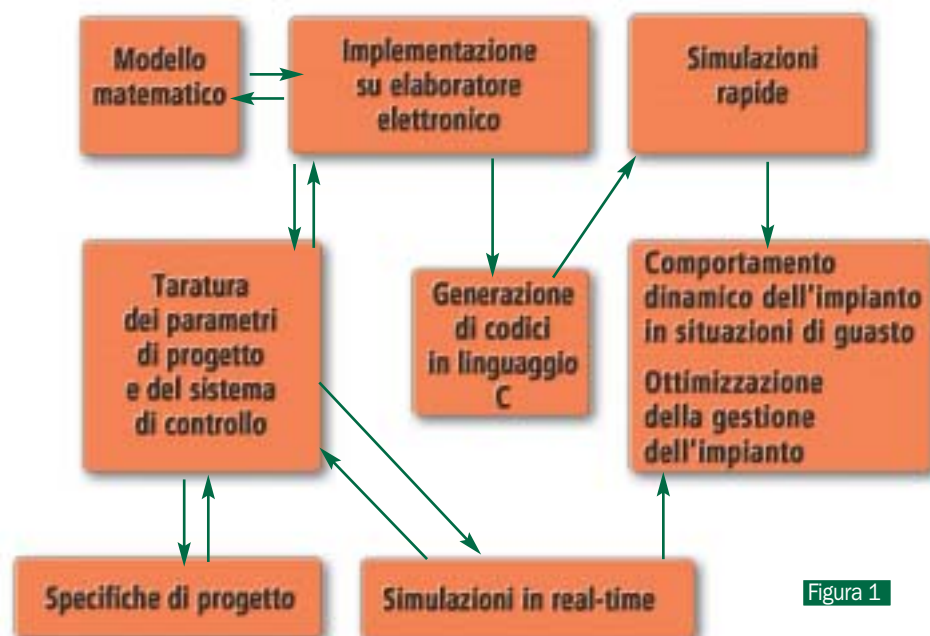


Figura 1

Architettura di un ambiente "integrato" di simulazione

L. Bozzi, G. Crosa, A. Gallo, D. Laneri

La necessità di realizzare impianti capaci d'elevate prestazioni con bassi costi d'esercizio ha determinato un crescente bisogno di miglioramenti dal punto di vista dell'affidabilità, flessibilità e sicurezza degli impianti stessi [1]. Queste esigenze hanno reso particolarmente significativo l'affiancamento, al normale iter progettuale, della simulazione computerizzata del comportamento dell'impianto ai carichi parziali ed in condizioni dinamiche, al fine di verificare la bontà delle scelte operate ed ottimizzare, ad esempio, i diversi parametri dei sistemi di controllo. Il processo di simulazione, inoltre, consente agevolmente la produzione cronologica di una storia di stati del modello computerizzato, e quindi del sistema reale, senza intervenire in alcun modo su di esso.

È importante sottolineare, però, come nell'utilizzo dei simulatori quale supporto all'ingegneria, il punto di partenza rimane sempre la creazione

di un modello matematico rigoroso ed attendibile del sistema in esame. Solo una volta completata questa prima fase è possibile portare a termine la realizzazione e la messa a punto del simulatore impiantistico, implementando tali modelli, matematici e/o logici, in ambienti software realizzati appositamente per questo scopo.

Relativamente a tali problematiche occorre considerare, infine, che un sistema, di per sé, può essere rappresentato da diverse tipologie di modelli; per questa ragione risulta estremamente importante verificare preliminarmente la loro "adeguatezza" al tipo di problema che si vuole affrontare, vale a dire la capacità del modello stesso di descrivere opportunamente quegli aspetti che sono rilevanti per lo studio in corso. Un modello, ad esempio, che riproduca sia il comportamento a regime, sia quello dinamico di un impianto termoelettrico, costituisce sicuramente un prezioso strumento per lo studio preventivo dei problemi inerenti il normale esercizio. Il suo utilizzo, infatti, consente d'intervenire, per verificare ed even-

tualmente migliorare il comportamento dinamico del sistema, già nella fase di progetto dei singoli componenti, evitando la necessità di costosi interventi postumi in fase di commissioning.

Alla luce delle considerazioni fatte si possono quindi riassumere le principali problematiche impiantistiche che possono essere affrontate mediante l'utilizzo di simulatori computerizzati, secondo quanto esposto in [1] e [2]:

- il corretto "matching" tra i componenti ai carichi parziali;
- lo studio del comportamento dinamico in situazione di guasto;
- la regolazione e l'ottimizzazione della sua gestione;
- la diagnostica e la valutazione del degrado delle prestazioni.

Inoltre, i simulatori consentono di valutare immediatamente gli effetti di modifiche del dimensionamento dei vari componenti sul comportamento dinamico dell'intero impianto. Quest'ultima procedura, spesso

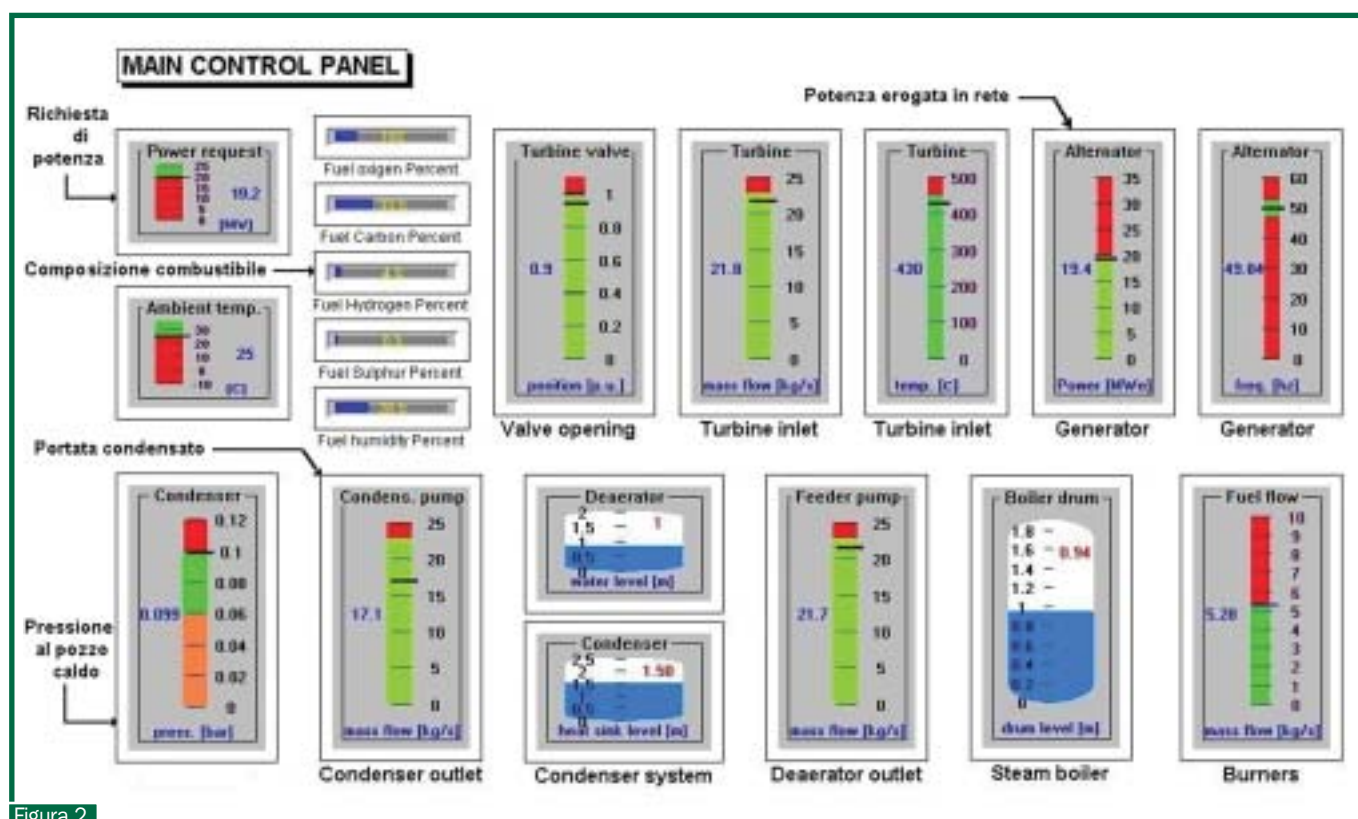


Figura 2

Sinottico del sistema di gestione del simulatore real-time di un impianto termoelettrico

estendibile ai principali parametri costruttivi dell'impianto, viene definita analisi di sensitività. Nella realizzazione del sistema di controllo il progettista a sua volta necessita, in vari momenti della sua attività ed in misura addirittura maggiore rispetto al caso precedente, di un modello dinamico del sistema. Infatti, dopo aver effettuato la sintesi dei regolatori, il progettista deve avvalersi nuovamente del modello, in cui avrà implementato questa volta anche il sistema di regolazione, per verificare il comportamento dell'impianto in transitori particolarmente significativi, quali quelli inerenti, ad esempio, a situazioni di guasto.

► Simulazione in "real time"

Uno sviluppo importante della modellizzazione dinamica dei sistemi è stato rappresentato, in anni relativamente recenti, dalla possibilità d'effettuare simulazioni in "tempo reale". Il punto di partenza, anche in questo caso, rimane la creazione di un modello matematico rigoroso del sistema in esame e dei relativi regolatori e

la sua implementazione in un opportuno ambiente di simulazione. Una volta completata questa prima fase, diversi tool di calcolo sono in grado di convertire automaticamente i modelli matematici implementati, generando programmi in linguaggi procedurali avanzati (ad esempio C). Tali programmi possono essere utilizzati per le seguenti operazioni:

- effettuare simulazioni "in tempo reale", durante le quali è possibile sia visualizzare l'andamento temporale delle grandezze d'interesse mediante opportuni indicatori, sia interagire attivamente col simulatore modificando le principali variabili di controllo attraverso "sliders" presenti nel pannello di gestione del simulatore stesso;
- effettuare simulazioni "rapide" processando i programmi generati, ad esempio, in linguaggio C, e risparmiando, in tal modo, tempo macchina; le simulazioni effettuate utilizzando tali programmi sono, infatti, anche 5÷20 volte più rapide rispetto alle normali.

La simulazione real-time costituisce, quindi, un utile strumento anche nella verifica e messa a punto degli strumenti di regolazione degli impianti termoelettrici, in quanto il simulatore real-time può sostituirsi al sistema reale, consentendo di verificare la validità delle scelte fatte sui diversi parametri dei sistemi di controllo. Gli ambienti di simulazione che consentono non solo l'implementazione di modelli matematici complessi, ma presentano le caratteristiche illustrate nei precedenti punti, permettono di realizzare un sistema "integrato" di simulazione (schematizzabile come in figura 1, secondo quanto esposto in [3] e [4]) utilizzando il quale si possono affrontare tutte le principali problematiche impiantistiche descritte.

In questa sede viene presentato, come esempio applicativo, un simulatore real-time sviluppato, in ambiente Matlab-Simulink, presso il centro di calcolo del DIMSET dell'Università di Genova. Tale simulatore è in grado di riprodurre gli andamenti temporali, nelle stazioni più significative di un impianto per la produzione d'energia ➤

utilizzante un generatore di vapore a letto fluido ricircolante (CFB), delle grandezze termodinamiche e, nei nodi della rete di potenza, delle grandezze elettriche. Il modello dinamico è stato tipizzato sulle caratteristiche di un impianto esistente di piccola taglia, localizzato nel comune di Parona (PV) (per maggiori dettagli si rimanda a [5]). Particolare attenzione è stata posta, in questa recente versione del simulatore, alla modellizzazione dei più importanti componenti elettrici (generatore sincrono completo di regolatori, trasformatore elevatore, circuito equivalente della rete elettrica afferente all'impianto), per rendere possibile l'analisi dell'interazione tra la parte termica ed elettrica dell'impianto a seguito di ben definiti episodi di guasto, sia sui componenti elettrici, sia su quelli della parte termica.

Il pannello principale di gestione della parte termica del simulatore è riprodotto in figura 2, in cui sono evidenziati gli elementi attraverso i quali è possibile interagire attivamente col simulatore; gli altri indicatori sono relativi alle grandezze termodinamiche nelle stazioni più significative del circuito acqua-vapore e del circuito fumi e alle grandezze elettriche di generatore. Alcuni esempi, ritenuti significativi dei risultati ottenibili mediante tale tipologia di simulatori, sono presentati e discussi nei paragrafi successivi.

Generalità e criteri di scelta dei software di simulazione

La scelta del programma di simulazione più adatto ai propri scopi, alla luce anche della continua evoluzione di tale tipologia d'ambienti software, non è sicuramente agevole e, per tale ragione, risulta di fondamentale importanza valutare le alternative offerte dal mercato, al fine di individuare lo strumento più vicino alle proprie esigenze. Relativamente a quest'aspetto, un'utile sorgente d'informazioni su quanto offre il mercato può essere reperita ricorrendo al Working Group on Software (WGS) (per maggiori informazioni si rimanda a [2]) che possiede un vasto database sui vari programmi esistenti. Tali ambienti di simulazione presentano naturalmente diverse caratteristiche in comune: nell'elenco se-

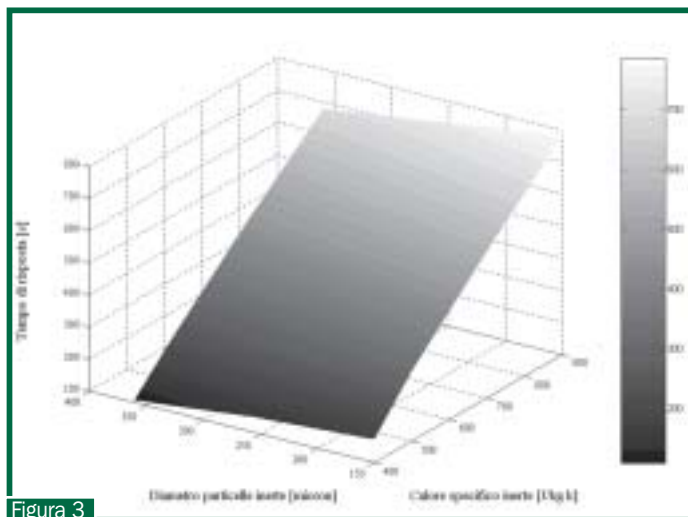


Figura 3

Effetti delle caratteristiche dell'inerte sulla velocità d'adeguamento al riferimento della potenza prodotta di un impianto termoelettrico utilizzando un generatore di vapore CFB¹

guente si è cercato di evidenziare le principali:

- possibilità di scelta della routine d'integrazione numerica mediante la quale calcolare la risposta dinamica del sistema;
- capacità grafiche: i risultati delle simulazioni possono essere elaborati immediatamente attraverso programmi grafici in grado d'offrire un'efficace visualizzazione;
- rivelazione degli errori e procedure di debug: gli errori commessi nella definizione del modello o durante la simulazione vengono evidenziati da appositi messaggi d'errore che, in genere, compaiono nella finestra di comando del programma e ne spiegano sinteticamente la causa;
- possibilità di rappresentare il modello mediante schemi a blocchi nei quale ogni componente del sistema descritto appare sotto forma d'icona attraverso immagini o disegni opportunamente importati dall'utilizzatore.

All'atto della scelta assume, inoltre, grande importanza tenere in considerazione le caratteristiche "desiderabili" da software di questo tipo, le più importanti delle quali (alla luce delle considerazioni fatte sulle problematiche impiantistiche) risultano:

- capacità di simulare sistemi complessi: sistemi di larga scala, sistemi multivariabile, sistemi non lineari, sistemi misti (ossia sistemi continui contenenti alcuni elementi discreti) e sistemi sviluppati in

tempo discreto;

- buona interazione con l'utilizzatore: il colloquio con l'utente è realizzato mediante istruzioni da linea di comando ed operazioni con il mouse. Esistono poi programmi dotati di alcune "facility" che permettono di fermare momentaneamente la simulazione o di variare i parametri del modello durante la stessa;
- rapidità di simulazione: la velocità è una caratteristica essenziale per garantire la convenienza economica del simulatore, valutata sia in termini di ore-lavoro necessarie alla creazione del modello, sia come velocità di scorrimento del tempo simulato e di elaborazione dati;
- possibilità d'inserire parti di codice proveniente da altre sorgenti: tale caratteristica aumenta la flessibilità del software e garantisce una più ampia possibilità di utilizzo;
- capacità di simulare in maniera interattiva: ciò significa la possibilità di generare grafici e di intervenire sulle variabili anche nel corso della simulazione;
- rappresentazione "gerarchica" del sistema: consiste nella possibilità di definire facilmente sottosistemi o sotto-unità.

Esempio applicativo sull'utilizzo dell'analisi di sensitività nel progetto impiantistico

Assume particolare rilevanza, nella fase di progettazione impiantistica, la possibilità d'analizzare l'influenza, sulla risposta transitoria del sistema,

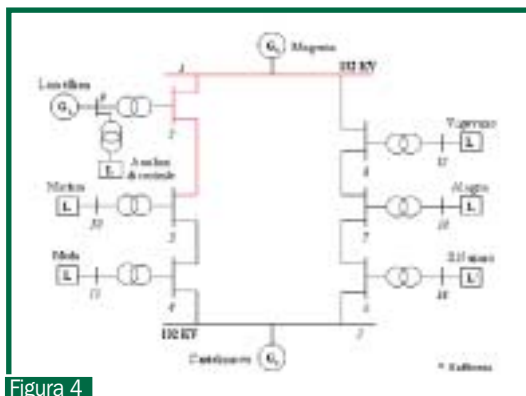


Figura 4

Schema generale di rete utilizzato nell'esempio di modellizzazione dinamica

della variazione di talune variabili particolarmente significative (all'interno di un determinato range di valori ammissibili). In particolare, nel campo della produzione dell'energia elettrica, una caratteristica importante della risposta transitoria d'ogni moderna unità di generazione è rappresentata dalla capacità di reagire, con adeguata prontezza, alle richieste di potenza.

Alla luce di queste considerazioni, può essere significativo riportare alcuni risultati relativi al funzionamento transitorio di un impianto termoelettrico, utilizzante un generatore di vapore CFB, ottenuti mediante il simulatore real-time descritto in precedenza. Nel caso in esame la combustione realizzata in un letto d'inerte (tipicamente sabbia) ed i fenomeni termofluidodinamici che la governano sono influenzati sia dalla tipologia del materiale costituente il letto, sia dalla geometria della camera di combustione e dalle modalità d'alimentazione dell'aria comburente e del combustibile. Sulla base di queste considerazioni si è scelto di riportare, quale esempio d'analisi di sensitività realizzabile mediante simulatore elettronico, una valutazione dell'influenza, sul comportamento dinamico dell'impianto, del calore specifico e del diametro delle particelle dell'inerte utilizzato. È importante ricordare brevemente che il modello matematico su cui "appoggia" il simulatore real-time utilizza tale diametro per calcolare, attraverso opportune correlazioni, la distribuzione del grado di vuoto in camera di combustione relativo alla miscela fase gassosa-fase solida (iner-

te, combustibile e ceneri). Il grado di vuoto, a sua volta, influisce sui coefficienti di scambio termico e, quindi, sui tempi di risposta dell'intero sistema.

È stato riportato, in particolare, l'andamento del tempo di risposta del sistema, in modalità "turbina segue", a fronte dell'aumento del riferimento di potenza del 5% in 60 s, al variare di ambedue i parametri descritti. Il tempo di risposta dell'impianto è stato valutato come il tempo impiegato dalla variabile controllata, la potenza elettrica erogata, per raggiungere un valore pari al 90% del riferimento. I risultati, riportati in figura 3, evidenziano la dipendenza quasi-lineare del tempo di risposta dell'impianto dal calore specifico dell'inerte e la minore influenza del diametro delle particelle sulla risposta del sistema; tale situazione è motivabile con il fatto che un minor calore specifico, a parità di quantitativo d'inerte, consente un innalzamento più rapido della temperatura del materiale, a causa della minore inerzia termica.

Un'analisi di questo tipo può essere naturalmente estesa ad altre variabili significative quali, ad esempio, quelle relative alla geometria della camera di combustione, qualora si vogliano ottimizzare le scelte progettuali in funzione di un miglioramento delle caratteristiche dell'impianto dal punto di vista delle velocità di risposta alle richieste di potenza.

L'impiego dei simulatori dinamici negli studi di rete

La possibilità di modellizzare la rete di potenza afferente a una centrale termoelettrica nello stesso ambiente



Figura 5

Finestra d'inserimento dei parametri nominali della macchina sincrona

software in cui viene implementata la parte termica dell'impianto presenta, come accennato in precedenza, interessanti vantaggi, non ultimo quello di poter agevolmente studiare l'interazione tra i due sottosistemi (termico ed elettrico) in alcune situazioni considerate "critiche", come quella, ad esempio, relativa al passaggio in isola dell'impianto. Al contrario, altri eventi riguardanti, in particolare, guasti autoestinguenti sulle linee elettriche in prossimità della centrale, hanno normalmente una durata troppo breve per poter influire sulla parte termica dell'impianto, che può quindi essere considerata a regime durante il guasto. Perciò i transitori conseguenti a tale tipologia di guasto potrebbero essere analizzati agevolmente in ambienti software studiati specificatamente per le problematiche elettriche. Tuttavia, anche in questo secondo caso, la possibilità di poter gestire entrambe le problematiche in un unico ambiente informatico risulterebbe vantaggiosa sia in termini di tempo (accelerazione del ciclo di sviluppo del progetto), sia in termini di costi d'investimento in materiale software.

In quest'ottica, viene qui presentato un esempio di procedura di modellizzazione, in ambiente Matlab-Simulink, della rete di potenza afferente ad un impianto per la produzione d'energia elettrica. L'impianto in questione è quello brevemente descritto nei precedenti paragrafi, sulla cui parte termica maggiori dettagli sono riportati in [6] e [7].

Lo schema generale della rete di potenza, a cui si è fatto riferimento, è illustrato in figura 4: il generatore dell'impianto termoelettrico oggetto dello studio è indicato, a sinistra nella parte alta della figura, con il termine G_L , mentre G_1 e G_2 rappresentano rispettivamente le reti prevalenti a monte delle sbarre di stazione delle località di Magenta e Castelnuovo; vengono, inoltre, indicati i nomi delle altre principali località in prossimità dell'impianto.

Considerando che gli obiettivi della modellizzazione riguardavano lo studio dei transitori relativi ad eventi di guasto in punti vicini all'impianto (tratti di circuito evidenziati in rosso in figura 4), è stato ritenuto sufficiente ➔

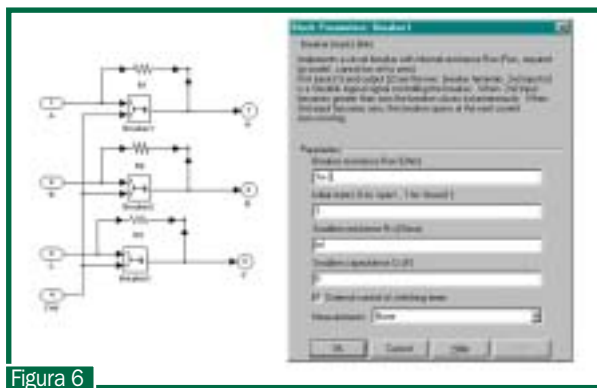


Figura 6

Modello dell'interruttore di macchina e relativa finestra d'inserimento dei parametri nominali

modellizzare nel dettaglio solo la porzione di rete riportata in figura 4, alla luce anche della particolare configurazione della rete Enel nell'area dell'impianto in esame. Non va trascurato, infatti, che, riducendo la complessità della parte di rete modellizzata, il tempo di calcolo necessario per le simulazioni diminuisce sensibilmente. Per effettuare lo studio si è reso naturalmente necessario conoscere con esattezza i valori dei parametri di tutto il sistema elettrico in figura; in particolare, quindi, i dati relativi ai trasformatori, ai generatori, ai carichi ed alle linee di collegamento.

Entrando nel dettaglio dell'implementazione, è opportuno descrivere brevemente i modelli scelti per rappresentare i principali componenti elettrici. Il generatore sincrono, innanzi tutto, è rappresentato mediante un modello matematico del quinto ordine, che tiene conto della dinamica dello statore, di campo e degli avvolgimenti smorzatori. La finestra d'input, che consente l'inserimento dei parametri di macchina, reperibili sui data-sheet della stessa, è rappresentata in figura 5. Vengono richiesti, innanzi tutto, i valori nominali di potenza apparente, tensione concatenata e frequenza, la reattanza sincrona, transitoria e subtransitoria (sia di asse diretto, sia di asse in quadratura), e la resistenza di statore, R_s . Gli ultimi tre campi d'inserimento sono relativi ad alcuni parametri meccanici, ai valori iniziali di tensione di campo, correnti (in modulo e fase) ed angolo di carico ed alla caratteristica a vuoto del generatore. Il valore del coefficiente d'inerzia inserito nella finestra d'input, H , deve tenere conto dell'inerzia del rotore del generatore, della turbina a vapore e, come nel caso esaminato, dell'even-

tuale riduttore presente. Un'analoga finestra di dialogo consente l'inserimento dei dati relativi alle macchine asincrone, rappresentanti gli eventuali carichi rotanti (ad esempio alcune tipologie d'ausiliari dell'impianto).

L'interruttore di macchina è stato simulato tramite il blocco funzionale denominato "Breaker". Tale elemento viene controllato attraverso un segnale logico; per questo tipo d'interruttore è prevista anche la modellizzazione dell'arco elettrico, durante l'apertura, tramite opportuni valori di resistenza ed induttanza. La struttura dell'elemento, nella sua configurazione trifase, è illustrata in figura 6. Infine, il regolatore di tensione del generatore dell'impianto è stato modellizzato assemblando opportunamente le varie funzioni di trasferimento che lo compongono, sulla base della configurazione del regolatore ottenuta dal fornitore. La realizzazione del modello dinamico della rete elettrica si è articolata, quindi, in quattro fasi distinte:

- studio preliminare di load-flow per ottenere i dati necessari all'inizializzazione del modello dinamico;
- modifica della struttura della rete elettrica illustrata in figura 4, mediante opportune trasformazioni stella-triangolo, al fine di ottenere una configurazione semplificata equivalente che permettesse di ridurre sensibilmente i tempi di simulazione;
- implementazione a calcolatore della configurazione di rete ottenuta al punto precedente, realizzata assemblando i blocchi funzionali appena descritti;
- inserimento, in opportuni punti del tratto di circuito evidenziato in rosso nelle figure 4, 7 e 8, degli

interruttori necessari a simulare correttamente gli eventi di guasto oggetto di studio.

L'analisi statica della rete in esame è stata realizzata mediante una routine, disponibile in ambiente Matlab-Simulink, che risolve il sistema d'equazioni di load-flow. La procedura di semplificazione della rete ha permesso di passare, dopo una serie di manipolazioni, dalla configurazione di figura 7/a (ottenuta sostituendo ogni componente del sistema elettrico con la sua rappresentazione circuitale), a quella equivalente semplificata illustrata in figura 7/b, dimostratasi ottimale per l'implementazione a calcolatore. Il simulatore di rete completo, relativo alla configurazione di figura 7/b, è illustrato in figura 8. Si è passati, quindi, a studiare il comportamento dinamico del sistema in alcune situazioni di guasto, che vengono qui elencate in funzione della crescente criticità, ovvero:

- cortocircuito trifase simmetrico a metà della linea congiungente le sbarre d'impianto alla stazione di Mortara (tratto 2-3 evidenziato in rosso nelle figure 4, 7 e 8);
- guasto trifase simmetrico a metà della linea congiungente le sbarre d'impianto alla stazione di Magenta (tratto 1-2 evidenziato in rosso nelle figure 4, 7 e 8);
- guasto trifase simmetrico alle sbarre dell'impianto (sbarra n° 2 nelle figure 4, 7 e 8).

Resultati ottenuti dalla simulazione dinamica

Passando ad analizzare i risultati relativi alle simulazioni di guasto operate sul modello della rete elettrica, occorre precisare che tutti i guasti trifase sono stati riprodotti cortocircuitando i conduttori di linea tramite interruttori ideali controllati da un segnale logico (modulo denominato "Ideal Switch"), posti in serie ad un circuito resistivo-induttivo.

I diagrammi delle figure 9/a-f mostrano la sovrapposizione degli andamenti temporali delle principali grandezze elettriche di generatore a seguito dei seguenti eventi di guasto:

- cortocircuito trifase simmetrico a

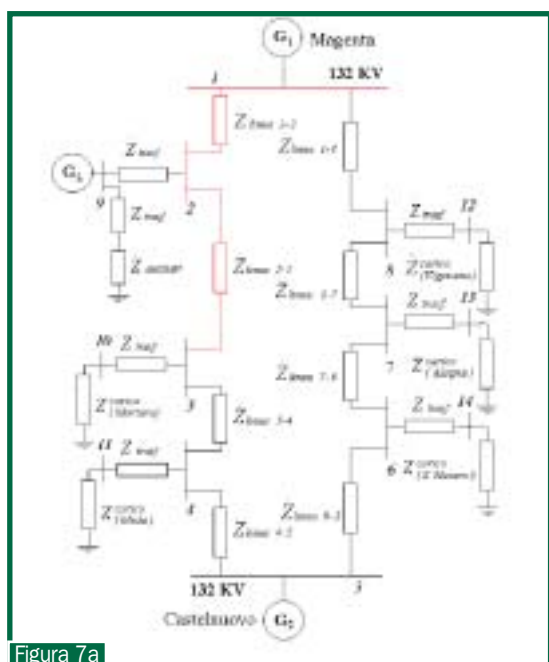


Figura 7a

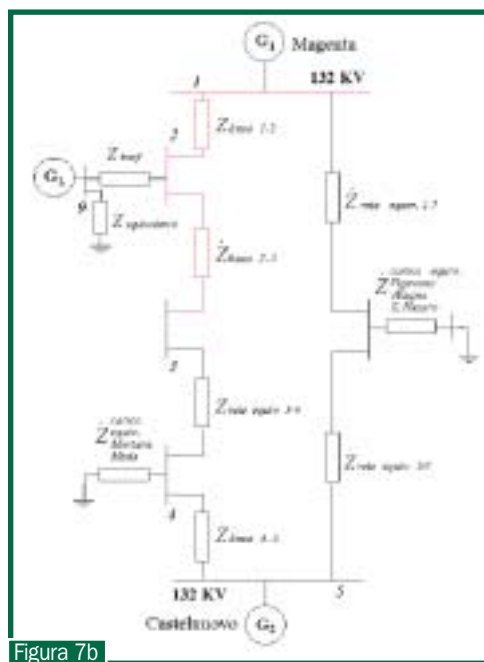


Figura 7b

Figura 7
a: Rappresentazione circuitale della rete nella configurazione di figura 4

b: Configurazione equivalente di rete implementata a calcolatore

Figura 8
Finestra principale del simulatore della rete elettrica afferente all'impianto

metà della linea congiungente le sbarre d'impianto alla stazione di Mortara;

- guasto trifase simmetrico a metà della linea congiungente le sbarre d'impianto alla stazione di Magenta;
- guasto trifase simmetrico alle sbarre dell'impianto.

Nei primi due casi (marcati rispettivamente in blu ed in verde) si è supposto che gli interruttori di protezione ai capi della linea interessata dal guasto all'istante $t=8,1$ s intervengano aprendosi dopo 400 ms (cioè all'istante di simulazione $t=8,5$ s) e successivamente, dopo 300 ms, gli interruttori stessi tentino una richiusura automatica rapida (all'istante $t=8,8$ s), che si considera avvenuta con successo. Infine, nel terzo caso, evidenziato in rosso in figura, è stato considerato che il cortocircuito si verifichi all'istante $t=8,1$ s e si autoestingua dopo 120 ms, all'istante 8,22 s, ragion per cui non è stato simulato alcun intervento delle protezioni.

Il primo diagramma (figura 9/a) è relativo alla velocità di rotazione del generatore sincrono; si può osservare, in tutti e tre i casi, una decelerazione iniziale del rotore (fenomeno di "back-swing", normalmente di modesta entità [8]), seguita immediatamente da una fase d'accelerazione provocata dalla brusca diminuzione della coppia resistente (la potenza elettrica erogata, infatti, tende a zero nel cortocircui-

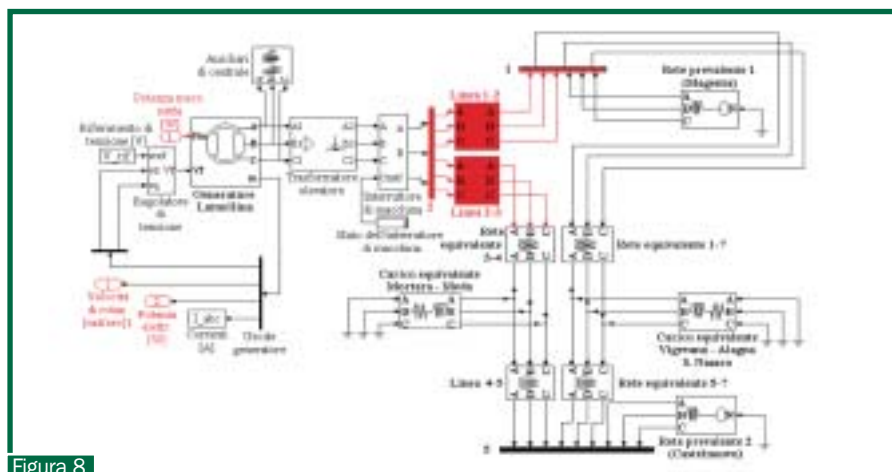


Figura 8

to franco) rispetto alla coppia motrice, che si mantiene costante.

Come risulta dalla figura 9/b, all'aumentare della velocità del rotore cresce anche l'angolo di carico della macchina sincrona; di conseguenza, l'aumento dello sfasamento tra la forza elettromotrice e la tensione ai morsetti del generatore fa sì che le correnti (figure 9/c-e) assumano valori di gran lunga maggiori dei nominali, con la tipica sovrapposizione di componenti di guasto sinusoidali (a pulsazione nominale ed ampiezza variabile nel tempo, ma uguale per le tre fasi) e continue (dette componenti unidirezionali, diverse da fase a fase, con valori massimi iniziali differenti, ma tendenti esponenzialmente a zero con la medesima costante di tempo). L'andamento della tensione ai morsetti del generatore, riportato in figu-

ra 9/f, presenta una brusca diminuzione a seguito del guasto, ma non un completo azzeramento, in quanto tra il punto di guasto ed il generatore stesso è presente, nel terzo caso, il trasformatore elevatore con la sua reattanza, mentre, nel primo e secondo caso, l'effetto di "schermatura" della reattanza del trasformatore si va a sommare a quello dell'impedenza del tratto di linea tra le sbarre dell'impianto e il punto di guasto.

La tensione alle sbarre della stazione di Magenta (figura 10/a) rimane praticamente costante e pari a 1 in p.u. in tutte e tre le simulazioni, in quanto si è supposto che la rete a monte abbia una potenza di cortocircuito praticamente infinita. Nel caso riportato nelle figure 10/b-d, invece, relativo alla tensione alla sbarra n° 2 che connette l'impianto alla rete Enel, il valore si annulla ➔

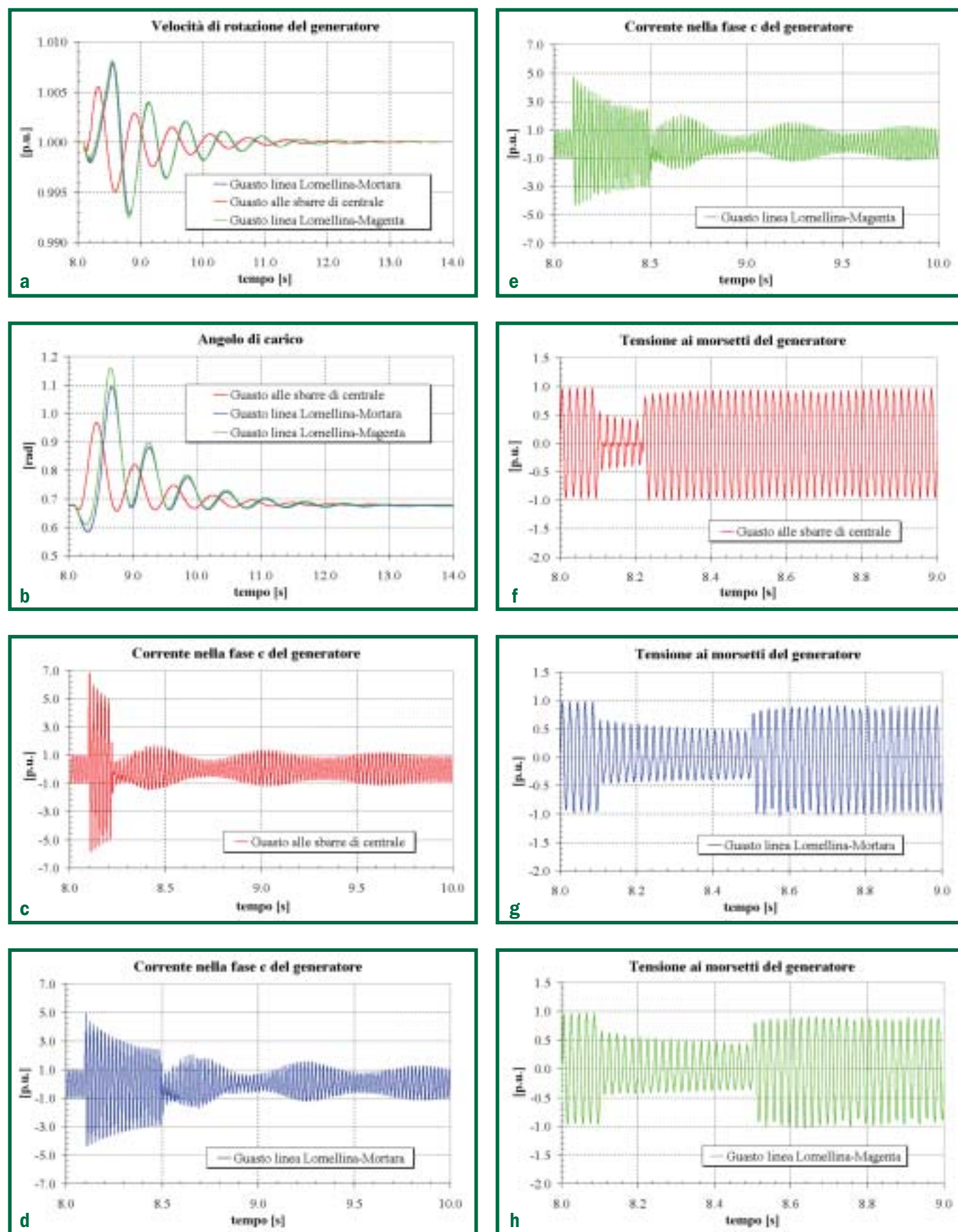


Figura 9

Effetti sulle grandezze di generatore di un cortocircuito trifase simmetrico nei seguenti punti del sistema elettrico:

- 1) sbarre di connessione dell'impianto con la rete ;
- 2) a metà della linea congiungente le sbarre d'impianto alla stazione di Mortara;
- 3) a metà della linea congiungente le sbarre d'impianto alla stazione di Magenta

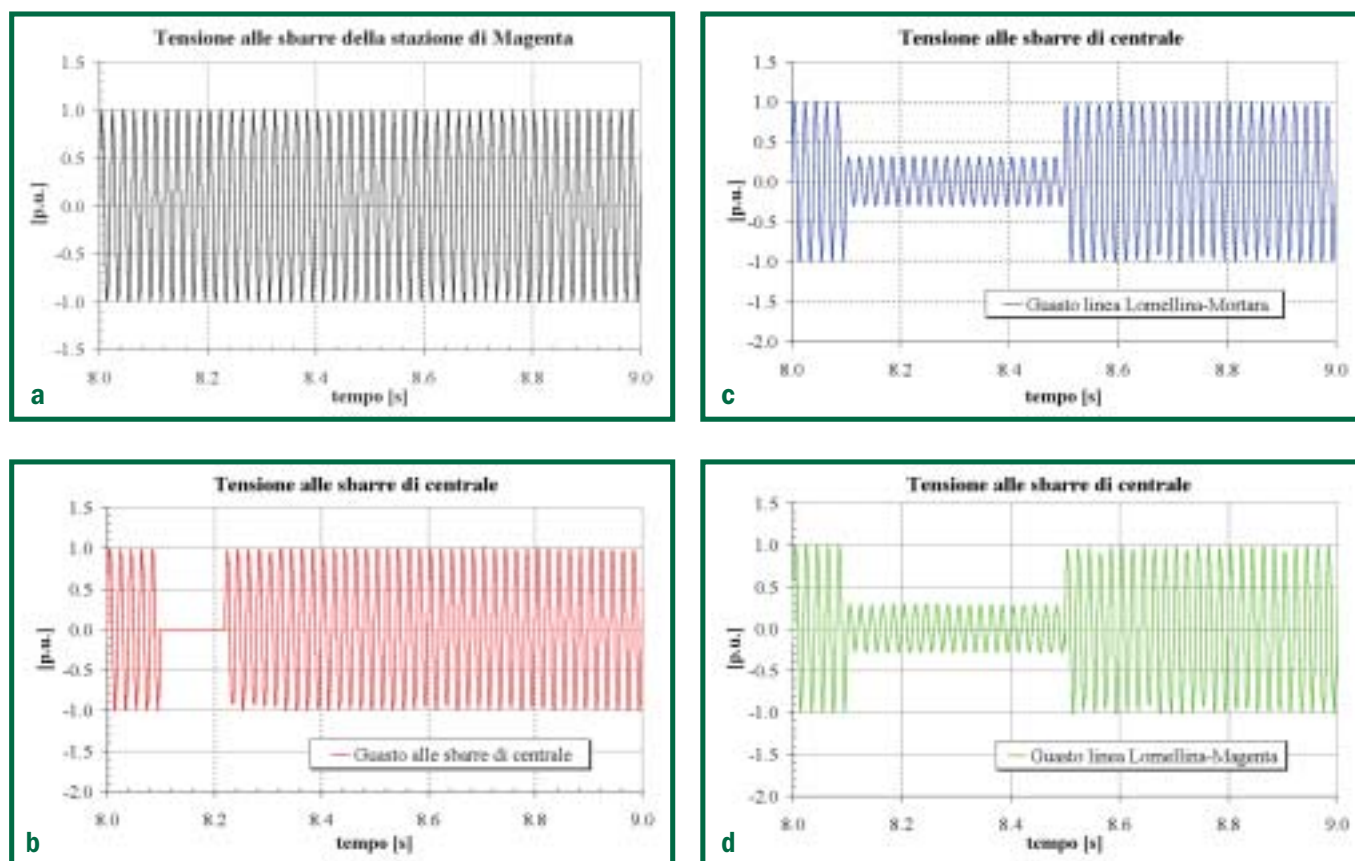


Figure 10 Andamenti della tensione alle sbarre della stazione di Magenta e alle sbarre dell'impianto nelle tre situazioni di guasto

la, per tutto il periodo in cui permane il guasto, solo nel primo caso, mentre nelle altre due situazioni considerate valgono le considerazioni fatte per gli andamenti della tensione ai morsetti del generatore.

Conclusioni

Un ambiente "integrato" di simulazione, realizzato appositamente per studiare in maniera rigorosa ed efficace le principali problematiche legate alla progettazione, messa in servizio e gestione degli impianti termoelettrici, dovrebbe poter consentire la modellizzazione dei due sottosistemi, la parte termica e quella elettrica, che compongono questa tipologia d'impianti nello stesso ambiente software, o quantomeno in due ambienti tra i quali risulti agevole l'interconnessione e lo scambio di dati.

A dispetto di queste esigenze, i codici commerciali realizzati specificatamente per l'analisi di transitori elettrici, attualmente disponibili, spesso non presentano tali caratteristiche, o comunque consentono solo una modellizzazione molto parziale della parte termica degli impianti,

quindi inadatta allo studio di alcune situazioni "critiche", come quella, ad esempio, relativa al passaggio in isola dell'impianto, in cui la dinamica delle grandezze elettriche procede di pari passo con quella delle grandezze termodinamiche, che quindi non possono essere considerate a regime.

D'altro canto appare evidente dalla trattazione sviluppata in questo articolo che anche l'utilizzo d'ambienti di simulazione finalizzati genericamente alla modellizzazione di sistemi dinamici e non specificatamente allo studio di sistemi elettrici, non è esente da inconvenienti. Tali ambienti software, infatti, consentono di realizzare una modellizzazione rigorosa della parte elettrica d'impianti per la produzione d'energia solo a condizione che si presti particolare cura sia nell'assemblaggio dei blocchi funzionali rappresentanti i componenti elettrici della rete afferente all'impianto, sia nella corretta inizializzazione delle variabili di stato del sistema (operazioni spesso non di facile e rapida attuazione).

In quest'ottica è stato descritto nel dettaglio un esempio di procedura per

la realizzazione di un modello dinamico della rete afferente ad un impianto per la produzione d'energia elettrica. È stato utilizzato, in tale esempio, un software per la simulazione di sistemi dinamici mediante il quale, in precedenza, era stata implementata la rappresentazione matematica della parte termica dell'impianto. Sono stati, inoltre, presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni di alcuni eventi di guasto sulla parte elettrica dell'impianto ritenuti particolarmente significativi. Lo schema generale di rete a cui si è fatto riferimento per la tipizzazione del modello dinamico è relativo alla configurazione di un impianto esistente, localizzato nel comune di Parona (PV), che utilizza un generatore di vapore CFB.

Nella procedura descritta è stata messa in evidenza l'importanza di operare un'accurata scelta della configurazione di rete da implementare a calcolatore. La configurazione adottata, infatti, deve tenere conto sia dell'esigenza di rappresentare in maniera corretta la porzione di rete elettrica nell'area dell'impianto in esame (ed in particolare i flussi di potenza), sia ➔

delle problematiche relative all'assemblaggio dei blocchi funzionali prelevati dalla libreria dell'ambiente di simulazione che viene utilizzato. Alcuni moduli, infatti, possono presentare delle incompatibilità reciproche se assemblati in maniera errata, oppure rallentare in modo intollerabile la simulazione delle situazioni di guasto che si desiderano studiare.

Nell'esempio proposto la configurazione di rete scelta si è dimostrata adatta alla simulazione dinamica in ambiente Matlab-Simulink, ed ha consentito di valutare, con risultati positivi, la risposta dinamica dell'impianto nelle condizioni critiche considerate. Il simulatore realizzato, infine, dimostra la possibilità di integrare con successo, in un unico ambiente di simulazione, il modello della parte termica dell'impianto, quello della parte elettrica ed il sistema di controllo e gestione dell'impianto stesso.

NOTE

¹Dati ottenuti mediante simulatore nell'ipotesi di regolazione "turbina segue".



AUTORI

INGG. L. BOZZI, G. CROSA, A. GALLO, D. LANERI

DIMSET - Dipartimento di Macchine, Sistemi Energetici e Trasporti
Università degli Studi di Genova

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Garbossa, F. Pretolani, S. Spelta (1995): "Gli impianti termoelettrici: il ruolo della simulazione nella verifica dei progetti" – Automazione e Strumentazione, Novembre 1995.
- [2] L. Fresco, N. Irrera, G. Galliano, F. Rizzo: "Regolazione e comando di una sezione termoelettrica, prove di accettazione" – Automazione e strumentazione, Novembre 1995
- [3] Ordys, A.W., Pike, A.W. (1994): "Modelling and simulation of power generation plants" – Springer, Verlag
- [4] Lu, S. (1999): "Dynamic modelling and simulation of power plant systems" – Mechanical Engineering 1999.
- [5] L. Bressan, I. Vitali, A. Fava (2001): "La termovalorizzazione dei RSU nell'impianto di Lomellina energia" – Atti del 10° Congresso Tecnologie e Sistemi Energetici Complessi – Genova, 21-22 Giugno 2001.
- [6] L. Bozzi, G. Crosa, A. Trucco (2001): "Modellizzazione Dinamico-Modulare di un Impianto per la Produzione di Energia Elettrica con Generatore di Vapore a Letto Fluido Ricircolante" – Atti del 56° Congresso Nazionale ATI – Napoli, 10-14 Settembre 2001.
- [7] L. Bozzi, G. Crosa, A. Trucco (2001): "Simulazione Statica e Dinamica di un Impianto per la Termovalorizzazione degli RSU" – Atti del Terzo convegno: Utilizzazione Termica dei Rifiuti – Abano Terme (PD), 31 Maggio - 1 Giugno 2001.
- [8] F. Saccomanno: "Comportamento dinamico della macchina sincrona" – In: Sistemi elettrici per l'energia analisi e controllo. Cap. 4, 296-360. Torino: Ed. Utet, 1992.

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo lavoro, teniamo ad esprimere un particolare riconoscimento di gratitudine alla professoressa Angela Trucco per la cortese collaborazione con la quale si è resa sempre disponibile. Infine, un sentito ringraziamento alla Foster Wheeler Italiana, che ha reso possibile lo svolgimento di questo studio sia con la documentazione fornita, sia con l'assistenza degli ingegneri Lionetto e Sartorelli.