



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO
DIREZIONE GENERALE PER LA LOTTA ALLA CONTRAFFAZIONE
UFFICIO ITALIANO BREVETTI E MARCHI

DOMANDA DI INVENZIONE NUMERO	102009901712170
Data Deposito	11/03/2009
Data Pubblicazione	11/09/2010

Classifiche IPC

Titolo

PROCEDIMENTO PER LA GENERAZIONE DI RELAZIONI DI RIDONDANZA ANALITICA PER LA DIAGNOSI DI SISTEMI
--

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"Procedimento per la generazione di relazioni di ridondanza analitica per la diagnosi di sistemi"

di: FONDAZIONE ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA,
nazionalità italiana, Via Morego 30 - 16163 GENOVA

Inventori designati: Amir Fijany, Farrokh Vatan

Depositata il: 11 marzo 2009

* * *

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda in generale la diagnostica dei sistemi e l'analisi strutturale dei sistemi di controllo.

Più specificamente, essa riguarda la generazione di relazioni di ridondanza analitica impiegate nella diagnosi di sistemi basata su modelli e nella ottimizzazione, analisi e validazione di sistemi di sensori per il controllo di sistemi complessi.

In particolare, l'invenzione ha per oggetto un procedimento per la generazione di relazioni di ridondanza analitica del tipo definito nel preambolo della rivendicazione 1.

Il funzionamento di un impianto - termine col quale si indicheranno in questa descrizione e nelle rivendicazioni allegate impianti industriali, apparecchiature di produzione o di ricerca, macchine di

diversi generi (ad esempio, velivoli) - è controllato tipicamente mediante sofisticati sistemi diagnostici in grado di rilevare ed isolare condizioni anomale di funzionamento appena esse si manifestano.

Negli ultimi decenni la ricerca nel campo della diagnosi di sistemi basata su modelli è stata condotta essenzialmente secondo due differenti discipline: una, l'approccio di rivelazione e di isolamento dei guasti (Fault Detection and Isolation, FDI), è basata sulle teorie dei controlli automatici e decisioni statistiche, l'altra, nota come DX, è basata su tecniche di intelligenza artificiale. Il principio fondamentale della diagnosi basata su modelli è quello di confrontare il comportamento atteso o nominale di un sistema, fornito da un modello del sistema, con il comportamento reale desunto da misure sul sistema. Una *relazione di ridondanza analitica* (Analytical Redundancy Relation, ARR), nota anche come residuo o equazione di parità, impiegata nell'approccio FDI, è una relazione tra i parametri misurati del sistema. Ogni ARR non soddisfatta rappresenta una discrepanza tra il comportamento atteso del sistema e quello reale. L'approccio DX si fonda invece

sul concetto di *conflitto*, che è un insieme di assunzioni sui modi di alcuni componenti del sistema non consistente con il modello del sistema e le misure su di esso. Recentemente, un quadro unificato delle due teorie citate ne ha ricostruito la sostanziale equivalenza. Il rapporto tra i concetti di relazione di ridondanza analitica e di conflitto è dato dal fatto che il supporto di una ARR, ovvero l'insieme di componenti coinvolte in tale ARR è un *possibile conflitto*, ovvero esiste un possibile scenario di misure sul sistema che produce tale insieme come un conflitto.

Le relazioni di ridondanza analitica rivestono un ruolo importante non solo nella diagnostica dei sistemi, ma anche nella ottimizzazione ed analisi dei sistemi di sensori impiegati nel quadro delle attività di diagnostica.

La qualità e l'efficienza di un sistema di diagnosi dipende dalla disponibilità e dalla rilevanza delle informazioni che esso può ottenere dall'impianto diagnosticato. La qualità delle misure è espressa dal *grado di diagnosticabilità*, ovvero, dato un insieme di sensori, da quali guasti possono essere discriminati. Non vi è alcuna relazione diretta tra il numero di sensori ed il grado

di diagnosticabilità di un sistema. Il semplice aumento del numero di sensori non garantisce necessariamente un maggior livello di diagnosticabilità, ed è naturalmente preferibile realizzare un sistema di sensori per il controllo di un impianto che permetta di raggiungere un desiderato grado di diagnosticabilità al minor costo possibile.

Le proprietà strutturali dell'impianto controllato e le informazioni potenziali veicolate da ciascun sensore sono presentate nell'insieme di relazioni di ridondanza analitica che descrive il sistema. Le informazioni di tutte le ARR possono essere sintetizzate in una *matrice di firma*.

Il problema della ottimizzazione dei sensori può quindi essere formulato come un problema combinatorio applicato alla matrice di firma, o come un problema di programmazione intera che coinvolge tale matrice.

Relazioni di ridondanza analitica e matrice di firma dei guasti

Nel seguito si introducono e si discutono brevemente i concetti di relazioni di ridondanza analitica (ARR) e matrice di firma dei guasti (Fault Signature Matrix, FSM), per chiarezza e semplicità assumendo il caso di un singolo guasto di un siste-

ma.

Il modello del sistema (System Model, SM) consiste di un modello comportamentale (Behavioral Model, BM) e di un modello di osservazioni (Observation Model, OM). Il modello comportamentale BM è una descrizione del sistema basata sui suoi componenti e consiste di un insieme di *relazioni primarie* (Primary Relations, PR). Ciascun componente è descritto dalla funzione che esso realizza, ovvero da una o più relazioni primarie PR e dai suoi ingressi ed uscite, per cui la descrizione basata sui componenti include anche la topologia del sistema. Il modello di osservazioni OM è l'insieme di relazioni che definiscono le osservazioni che sono effettuate sul sistema attraverso i sensori.

In figura 1 è mostrato l'esempio di un sistema a più porte, consistente di tre moltiplicatori (M_1 , M_2 , M_3) e due sommatore (A_1 , A_2).

Il modello comportamentale per questo sistema, che ne fornisce una descrizione di componenti e topologia, è dato da un insieme di Relazione Primarie PR e dai componenti loro associati, come definito nel seguito:

$$PR_1: x = a \ c; M_1$$

$$PR_2: y = b \ d; M_2$$

PR₃: $z = c \text{ e}; M_3$

PR₄: $f = x + y; A_1$

PR₅: $g = y + z; A_2$

L'insieme di variabili (V) del sistema comprende l'insieme di variabili incognite (X) e l'insieme di variabili osservate (O), ovvero vale la relazione $V = X \cup O$.

Una *relazione di ridondanza analitica* (ARR) è un vincolo dedotto dal modello del sistema (SM). Le ARR possono essere derivate dal modello SM eliminando le variabili incognite dalle Relazioni Primarie. Pertanto una ARR contiene soltanto variabili osservate, e quindi può essere calcolata a partire da esse.

Un concetto associato è quello di *supporto di una ARR*, ovvero il sottoinsieme di componenti coinvolti nella derivazioni della ARR.

Per il sistema di figura 1, se i sensori sono disposti alle uscite f e g , e sono noti gli ingressi a - e , allora $O = \{a, b, c, d, e, f, g\}$ e $X = \{x, y, z\}$.

Le ARR risultanti sono date nella tabella 1 seguente:

Tabella 1 - ARR, componenti di supporto e sensori riferiti all'esempio di figura 1

ARR	Componenti di supporto	Sensori
$ARR_1: f = ac + bd$	M_1, M_2, A_1	f
$ARR_2: g = bd + ce$	M_2, M_3, A_2	g
$ARR_3: f - g = ac - ce$	M_1, M_3, A_2, A_1	f, g

Le ARR sono utilizzate per verificare la consistenza delle osservazioni rispetto al modello SM. In altre parole, le ARR sono soddisfatte se il comportamento del sistema osservato soddisfa i vincoli del modello. Nell'assunzione di un singolo guasto, se una componente del supporto di una ARR è guasta, allora tale ARR non è soddisfatta. Di fatto, con il concetto di insieme di supporto, questa affermazione costituisce il fondamento dell'approccio di diagnosi basata su modelli nell'ambito della metodologia FDI.

Si consideri una *matrice di firma dei guasti* (FSM) che risulta dalla derivazione della ARR di cui sopra.

La FSM è definita come una matrice binaria (0-1) le cui righe sono ARR e le cui colonne sono i guasti (componenti). Un elemento FS_{ij} di questa matrice ha valore 1 se la componente C_i è parte del supporto della relazione ARR_j , altrimenti $FS_{ij} = 0$.

La i -esima colonna corrispondente alla componente C_i è definita come *vettore di firma del guasto* di C_i ed è denominata $FS_i = [FS_{i1}, \dots, FS_{in}]^t$.

Con riferimento al sistema di figura 1, la FSM può essere derivata dalla tabella 1 ed è data nella seguente tabella 2.

Tabella 2 - Matrice di firma dei guasti per l'esempio di figura 1

	A ₁	A ₂	M ₁	M ₂	M ₃
ARR ₁	1	0	1	1	0
ARR ₂	0	1	0	1	1
ARR ₃	1	1	1	0	1

La diagnosi del sistema nell'ambito FDI è quindi basata sulla valutazione delle ARR, a partire da un insieme di osservazioni del sistema.

Se una ARR_i è soddisfatta sulla base delle osservazioni, allora $ARR_i = 0$, altrimenti $ARR_i = 1$. Le ARR sono istanziate con i valori osservati fornendo una *firma osservata*. La firma della i -esima osservazione è definita come un vettore binario $OS_i = [OS_{i1}, \dots, OS_{in}]^t$, in cui $OS_{ij} = 0$ se ARR_j è soddisfatta dalle osservazioni, e $OS_{ij} = 1$ altrimenti.

La tabella 3 mostra la diagnosi del sistema dell'esempio di figura 1 sulla base di differenti

firme di osservazione.

Tabella 3 - Diagnosi del sistema di figura 1 utilizzando ARR per differenti firme di osservazione.

	Obs				
ARR ₁	0	0	1	1	1
ARR ₂	0	1	0	1	1
ARR ₃	0	1	1	0	1
Diagnosi di guasto	nessuno	A ₂ ; M ₃	A ₁ ; M ₁	M ₂	nessuno

La diagnosi è quindi basata sui guasti tenuti in conto nella matrice di firma dei guasti. Ovvero, una firma osservata $OS_i = [OS_{i1}, \dots, OS_{in}]^t$ è consistente con una firma di guasto $FS_i = [FS_{i1}, \dots, FS_{in}]^t$ se $FS_{ij} = OS_{ij}$ per ogni j .

Ad esempio, per il sistema di figura 1 la firma di osservazione $[0,1,1]^t$ è equivalente alla firma di guasto dei componenti A₂ ed M₃. Si noti che ciò indica che, dipendentemente dai sensori del sistema, i guasti delle componenti A₂ ed M₃ non possono essere discriminati, così come nel caso di A₁ ed M₁.

Il criterio di rivelazione ed isolamento (discriminazione dei guasti) può essere descritto in termini di FSM.

Tutti i guasti possono essere rivelati (rivelazione completa) se non vi è alcuna colonna interamente nulla (ossia, nessun vettore di firma dei guasti nullo) nella FSM. Ovvero, per una data componente guasta C_i , almeno una ARR viene influenzata. L'isolamento di guasti è invece assicurato richiedendo che non esistano due colonne della FSM identiche, dal momento che ciò implicherebbe che i due vettori di firma dei guasti fossero identici e che quindi i relativi guasti non possano essere distinti.

Le considerazioni precedenti consentono una descrizione dell'approccio all'analisi di sensori. Dato un modello SM ed un insieme di sensori impiegati, è possibile derivare il corrispondente insieme di ARR e formare la corrispondente matrice FSM. L'analisi della FSM risultante può indicare il *grado di rivelazione*, ovvero il numero di colonne interamente nulle, che implica componenti guaste con vettore di firma dei guasti nullo, e gli *insiemi di ambiguità*, ovvero il numero e gruppo di componenti guaste con vettori di firma identici, che rappresenta gli insiemi di componenti i cui guasti non possono essere distinti.

Sulla base di quanto precede, una rappresenta-

zione nota del problema di ottimizzazione dei sensori è la seguente. A partire da un modello di sistema SM, si assegna un ipotetico sensore a ciascun punto del sistema che può essere, fisicamente e praticamente, misurato (ovvero, un sensore può essere disposto in quel punto). Si assegna una funzione di costo a ciascun ipotetico sensore. Quindi, si derivi l'insieme delle ARR per tale insieme di ipotetici sensori e si formi la corrispondente matrice FSM, indicata come matrice di firma dei guasti ipotetica (Hypothetical Fault Signature Matrix, HFSM).

Il processo di ottimizzazione può essere ora descritto come segue. Si elimini il sottoinsieme di sensori con costo massimo (ovvero, si mantenga il sottoinsieme di sensori con costo minimo), ottenendo il massimo grado di rivelazione e di isolamento dei guasti. Matematicamente, questo processo è eseguito come segue: per un sottoinsieme di sensori da cancellare si eliminano le ARR influenzate da tali sensori, quindi si verifica la FSM risultante in vista della rivelazione e dell'isolamento dei guasti, ovvero per verificare che non siano presenti colonne interamente nulle e coppie di colonne identiche.

Si può agevolmente notare come questo processo non rappresenti una formulazione rigorosa del problema di ottimizzazione.

Infatti, gli attuali approcci alla ottimizzazione dei sensori, basati sul concetto di FSM, sono basati su ricerche esaustive che possono essere applicate solo a piccoli sistemi.

Si può quindi concludere che un ruolo chiave nei processi di ottimizzazione dei sensori (ovvero della scelta del numero dei sensori e della loro collocazione sul sistema) e della loro analisi è rivestito dalla derivazione delle relazioni di ridondanza analitica atte a formare la matrice di firma dei guasti.

Complessità della derivazione delle relazioni di ridondanza analitica

Un problema nell'applicazione delle ARR è relativo alla derivazione efficiente dell'insieme completo di ARR. Nel seguito si discutono alcune questioni chiave relativamente alla complessità della derivazione di ARR.

Possibile numerosità delle ARR

La prima questione è relativa al possibile numero di relazioni di ridondanza analitica. Si consideri un sistema descritto da n relazioni primarie

PR (tipicamente ciò significa che il sistema ha n componenti, ma in generale questo potrebbe implicare che il sistema ha al massimo n componenti) ed m sensori (osservazioni) in cui, nella maggior parte dei casi pratici, $n > m$.

Se si considerano le ARR come funzioni di tutte le possibili combinazioni di osservazioni, allora il numero totale di ARR sarebbe dell'ordine di $O(2^m)$. D'altro canto, se si considera che le ARR sono ottenute dalla combinazione di relazioni primarie attraverso l'eliminazione delle variabili incognite, ciò implica un limite superiore al numero di relazioni ARR dell'ordine di $O(2^n)$.

Il punto chiave, che gli inventori ritengono non abbia ricevuto sufficiente attenzione nella tecnica nota, è dato dal fatto che le relazioni ARR possono coinvolgere tutte le possibili combinazioni di relazioni primarie PR e di osservazioni.

Di fatto, un medesimo insieme di relazioni primarie può portare a differenti relazioni ARR, ovvero a differenti ARR con il medesimo insieme di componenti di supporto, ma differenti insiemi di osservazioni.

Si possono anche considerare casi in cui un medesimo insieme di osservazioni può portare a dif-

ferenti relazioni ARR che differiscono nelle proprie componenti di supporto.

Adottando questo punto di vista si può dunque concludere che il limite superiore al numero totale di relazioni ARR è di fatto dell'ordine di $O(2^{n+m})$. Naturalmente, per ogni sistema di interesse pratico il numero di relazioni ARR è sempre finito a causa dei vincoli strutturali del sistema (poiché in caso contrario è implicito concludere che il sistema non è diagnosticabile!).

Completezza dell'insieme di ARR ed ARR ridondanti

Una questione fondamentale nell'applicazione delle relazioni ARR sia per la diagnosi di sistemi che per la risoluzione del problema di disposizione dei sensori, è relativa alla *completezza* dell'insieme di ARR.

Più precisamente, gli inventori sono consapevoli che la questione del *minimo insieme completo* di ARR non ha finora ricevuto sufficiente attenzione.

In letteratura sono stati discussi i concetti di *completezza-d* (completezza per la rivelazione dei guasti) e *completezza-i* (completezza per l'isolamento dei guasti). Tuttavia, questi due concetti possono essere applicati per l'analisi dell'appli-

cabilità di un dato insieme di ARR per la diagnosi, mentre non è affrontato direttamente il problema della derivazione di un insieme completo di relazioni ARR, ma è altrettanto ovvio che la completezza è un aspetto fondamentale sia nella diagnosi che nella disposizione dei sensori, dal momento che in entrambi i problemi è richiesta la maggiore informazione possibile proveniente dalle relazioni ARR.

E' inoltre ovvio che qualsiasi applicazione di un insieme incompleto di relazioni ARR, sia per la diagnosi di un sistema che per la disposizione dei sensori ad esso associati potrebbe portare a risultati errati e/o subottimali.

Si consideri la definizione di relazione di ridondanza analitica: *"una relazione di ridondanza analitica e un vincolo dedotto dal modello del sistema che contiene solo variabili osservate e che pertanto può essere calcolato da ogni osservatore"*. Secondo questa definizione, ogni combinazione banale di qualsiasi coppia di ARR esistente può essere considerata come una nuova ARR. Pertanto, tale definizione può portare alla derivazione di ARR ridondanti.

Al fine di assicurare la completezza, si dovrebbero considerare tutte le possibili combinazio-

ni di relazioni primarie in modo completo ed esauritivo. Di fatto, se un procedimento per la generazione di relazioni ARR è focalizzato esclusivamente sulla ricerca delle variabili comuni e sulla loro eliminazione, come è per gli algoritmi di tecnica nota, allora ciò porta necessariamente alla generazione di un insieme incompleto di relazioni ARR e, in dipendenza dall'ordine in cui avviene l'eliminazione delle variabili, ad insiemi di relazioni ARR di dimensione variabile.

Si consideri allora un insieme di ARR come insieme completo se è possibile dimostrare che ogni nuova ARR sia soltanto una combinazione banale di ARR esistenti.

Si definisce allora una ARR ridondante come una ARR che può essere ottenuta da combinazioni banali di ARR esistenti, ad esempio addizione di due ARR esistenti senza eliminazione di alcuna variabile incognita.

Un esempio interessante è dato dal sistema di figura 1.

Mentre la relazione ARR_3 della tabella 1 sembra essere una semplice sottrazione tra la relazione ARR_1 e la relazione ARR_2 , di fatto essa è stata ottenuta attraverso l'eliminazione di variabili in-

cognite in diversi passi del procedimento. Tuttavia, al contrario, una semplice addizione delle relazioni ARR_1 ed ARR_2 porterebbe ad una relazione ARR ridondante che non fornisce alcuna informazione aggiunta per la diagnosi del sistema.

Il problema delle relazioni ARR ridondanti è che esse possono aumentare in modo significativo la complessità della derivazione delle ARR , portando anche ad una complessità di calcolo esponenziale.

Per considerare ciò, si consideri un sistema con L ARR . Se ogni combinazione banale di ogni ARR esistente è considerata una nuova ARR , allora ciò porterebbe eventualmente ad un numero totale di $O(2^L)$ ARR , da cui la complessità esponenziale nella derivazione delle ARR .

L'aspetto chiave è che gli algoritmi di tecnica nota derivano ARR ridondanti anche evitando combinazioni banali di ARR esistenti, sempre conducendo ad una complessità esponenziale del problema della derivazione.

Si consideri, infatti, una definizione di base per la derivazione delle ARR , quale: "le ARR possono essere ottenute dal modello del sistema eliminando le variabili incognite". Tuttavia, eliminare una variabile incognita comune tra due ARR potreb-

be, almeno in ipotesi, condurre ad una ARR ridondante. Per comprendere ciò, si noti che una ARR è definita anche sulla base dell'insieme di relazioni primarie utilizzate per la sua derivazione. Se due ARR hanno una variabile incognita comune, ma anche una relazione primaria comune della loro derivazione, allora l'eliminazione della variabile comune potrebbe portare ad una ARR che consiste di una combinazione banale di ARR precedenti, ossia una ARR ridondante.

Complessità della derivazione di ARR

Come detto, una ARR è ottenuta dalla combinazione di un insieme di relazioni primarie attraverso l'eliminazione delle variabili incognite. Tale processo è associativo e quindi può essere eseguito in qualsiasi ordine. Si consideri una ARR_i risultante dalla combinazione di k relazioni primarie. Si trascuri la prima combinazione di due relazioni primarie nella sua derivazione, e si considerino tutti i possibili ordinamenti nella derivazione, ne consegue allora che la medesima ARR_i potrebbe essere ottenuta, eventualmente, in al massimo $k!/2$ modi. Di fatto, se un dato algoritmo esegue una ricerca esaustiva per rintracciare variabili incognite comuni, e deriva nuove ARR eliminando la varia-

bile comune, allora la medesima ARR potrebbe essere derivata molte volte, potenzialmente un numero di volte pari al fattoriale del numero di relazioni primarie, il che potrebbe portare ad un algoritmo con complessità temporale fattoriale nel numero di relazioni primarie. Appare infatti che la complessità esponenziale degli algoritmi di tecnica nota, basati sul rintracciamento e l'eliminazione di variabili comuni, sia dovuto a questo fatto. Data la natura associativa della derivazione delle relazioni ARR, sembra che la ripetizione della derivazione di una ARR non possa essere evitata.

Ad oggi, a discapito dell'importanza delle ARR sia per l'ottimizzazione dei sensori che per la diagnosi di sistemi o impianti, gli inventori ritengono che non sia stata posta sufficiente attenzione allo sviluppo di approcci sistematici ed efficienti per la loro generazione. Gli attuali procedimenti per la generazione di relazioni di ridondanza analitica sono infatti dipendenti dal sistema che descrivono, e la derivazione di un insieme completo di ARR dipende essenzialmente dall'esperienza e dalla conoscenza di un esperto programmatore nel manipolare equazioni analitiche, e non può essere esteso facilmente ad un gran numero di sistemi o

impianti di interesse.

La presente invenzione si prefigge quindi lo scopo di fornire una soluzione soddisfacente ai problemi in precedenza esposti, evitando gli inconvenienti della tecnica nota.

Più in particolare, la presente invenzione si prefigge lo scopo di fornire un procedimento per la generazione di un insieme completo e corretto di relazioni di ridondanza analitica rappresentativo di un sistema o impianto di interesse.

Ulteriore scopo della presente invenzione è quello di fornire un metodo per la generazione di relazioni di ridondanza analitica che sia efficiente dal punto di vista computazionale, ovvero presenti una complessità computazionale ridotta rispetto ai procedimenti di tecnica nota.

Secondo la presente invenzione tali scopi vengono raggiunti grazie ad un procedimento per la generazione di relazioni di ridondanza analitica avente le caratteristiche richiamate nella rivendicazione 1.

Modi particolari di realizzazione formano oggetto delle rivendicazioni dipendenti, il cui contenuto è da intendersi come parte integrale o integrante della presente descrizione.

Formano ulteriore oggetto dell'invenzione un sistema di elaborazione ed un programma per elaboratore per l'attuazione del suddetto procedimento, come rivendicato.

In sintesi, la presente invenzione si fonda sul principio di generare relazioni di ridondanza analitica in forma implicita.

Il procedimento oggetto dell'invenzione si basa sull'osservazione che il passo fondamentale nell'ottimizzazione e analisi dei sensori è la formazione della matrice di firma dei guasti FSM. La matrice FSM descrive relazioni logiche tra insiemi di sensori e componenti di un sistema o impianto controllato.

Si noti tuttavia che, data la FSM del sistema, è possibile determinare le capacità di rivelazione e di isolamento di guasti dei sensori associati al sistema senza alcuna valutazione esplicita delle relazioni di ridondanza analitica.

Una relazione di ridondanza analitica è una relazione logica stabilita tra l'insieme di sensori coinvolto nella sua valutazione, e l'insieme dei suoi componenti di supporto.

Una ARR è definita sulla base dell'insieme di variabili implicate nella sua valutazione, dell'in-

sieme delle sue componenti di supporto e dell'insieme di relazioni primarie utilizzate per la sua valutazione. Allora, due relazioni ARR sono considerate uguali se presentano lo stesso insieme di variabili e sono derivate dallo stesso insieme di relazioni primarie.

La questione fondamentale è che una ARR risulta dalla combinazione di un insieme di relazioni primarie attraverso l'eliminazione di variabili incognite.

Al fine di sfruttare la potenza logica delle relazioni di ridondanza analitica, esse si possono utilizzare in forma implicita, ossia senza alcuna necessità di derivarne la formula analitica.

Si consideri un semplice esempio. Si supponga di avere derivato una relazione ARR_i , in forma implicita, come $ARR_i = f_i(x, y, z)$, in cui x , y , e z sono alcuni valori misurati (sensori) con un insieme di supporto (c_k, c_m) .

Tale derivazione è sufficiente per formare la riga i -esima della matrice FSM, e se si derivano tutte le relazioni ARR in forma implicita è possibile costruire l'intera matrice FSM ed attuare un'ottimizzazione e analisi dei sensori senza alcuna necessità di conoscere la forma esplicita delle

funzioni f_i .

La metodologia proposta secondo l'invenzione è basata sulla derivazione di relazioni ARR e dei loro supporti come operazioni tra insiemi.

Le relazioni ARR e le relazioni primarie PR sono rappresentate come una tupla di un insieme di variabili (S) con un associato insieme di componenti di supporto (C).

Ad esempio, la relazione ARR_i di cui sopra è presentata come $S_i = \{x, y, z\}$ con un insieme di supporto di componenti $C_i = \{c_k, c_m\}$.

L'eliminazione delle variabili incognite comuni e quindi la formazione di nuove relazioni ARR è attuata trovando gli insiemi intersezione tra gli insiemi di variabili, eseguendo un'operazione di differenza simmetrica sulle variabili (quindi, eliminando la variabile incognita comune), ed eseguendo un'operazione di unione sugli insiemi di supporto per trovare l'insieme di supporto della nuova relazione ARR.

Ad esempio, se un'altra ARR_j è definita come $S_j = \{x, t, u\}$ con un insieme di supporto di componenti $C_j = \{c_q, c_n\}$, allora la nuova ARR_p , risultante dall'eliminazione della variabile comune x delle due ARR, sarà della forma $S_p = \{y, z, t, u\}$ con l'in-

sieme di supporto $C_p = \{c_k, c_m, c_q, c_n\}$.

Utilizzando le notazioni introdotte in precedenza, il modello comportamentale implicito BM del sistema esemplificativo descritto in figura 1 è quindi costruito come:

$$PR_1: S_1 = \{a, c, x\} \quad \& \quad C_1 = \{M_1\}$$

$$PR_2: S_2 = \{b, d, y\} \quad \& \quad C_2 = \{M_2\}$$

$$PR_3: S_3 = \{c, e, z\} \quad \& \quad C_3 = \{M_3\}$$

$$PR_4: S_4 = \{x, y, f\} \quad \& \quad C_4 = \{A_1\}$$

$$PR_5: S_5 = \{y, z, g\} \quad \& \quad C_5 = \{A_2\}$$

Il procedimento oggetto dell'invenzione, sostituendo le equazioni e le operazioni algebriche con insiemi ed operazioni tra insiemi consente la derivazione di ARR implicite e quindi la costruzione della matrice FSM senza necessità di conoscere esattamente le funzioni analitiche e la loro inversione.

Tuttavia, si deve notare che per l'applicazione alla diagnosi del sistema la forma esplicita delle ARR e quindi la loro valutazione risulta sempre necessaria.

Il concetto fondamentale alla base del procedimento secondo l'invenzione è che esso non è fondamentalmente basato sulla ricerca di una variabile comune per la sua eliminazione, al contrario esso è

fondato sul raggruppamento di ARR, a partire dalle relazioni primarie, e sulla considerazione di tutte le possibili combinazioni di ARR per l'eliminazione delle variabili comuni.

Vantaggiosamente, l'approccio inventivo consente di sviluppare in modo accurato ed efficiente un insieme completo di relazioni di ridondanza analitica in forma implicita.

Inoltre, mentre gli algoritmi di tecnica nota presentano costi computazionali esponenziali, il procedimento secondo l'invenzione raggiunge una complessità polinomiale, ovvero, dato un sistema con L ARR, la complessità dell'algoritmo oggetto dell'invenzione è dell'ordine di $O(L^4)$.

Di fatto, impiegando un appropriato ordinamento nella derivazione di ARR, gli inventori hanno reso possibile limitare la ripetizione di derivazioni di ARR attraverso il medesimo algoritmo in un tempo di calcolo polinomiale invece che fattoriale.

Ulteriori caratteristiche e vantaggi dell'invenzione verranno più dettagliatamente esposti nella descrizione particolareggiata seguente, data a titolo di esempio non limitativo, con riferimento ai disegni allegati, nei quali:

la figura 1 rappresenta uno schema circuitale di un sistema multiporta analizzato nella parte introduttiva di questa descrizione;

la figura 2 è uno schema logico di generazione di relazioni di ridondanza analitiche secondo il procedimento oggetto dell'invenzione;

la figura 3 è uno schema circuitale di un sistema elettrico multiporta per l'esemplificazione del procedimento oggetto dell'invenzione; e

la figura 4 è un diagramma schematico di un sottosistema di turbina di un impianto industriale, impiegato per l'esemplificazione del procedimento oggetto dell'invenzione.

Il procedimento oggetto dell'invenzione è descritto nel seguito, con riferimento allo schema di figura 2.

I dati di ingresso del procedimento sono l'insieme di relazioni primarie, e i dati di uscita costituiscono l'insieme delle relazioni di ridondanza analitica ricercate.

Ciascuna relazione intermedia, di seguito indicata brevemente R_j , impiegata per derivare l'insieme di relazioni di ridondanza analitica ARR, che per definizione comportano solo variabili note (osservazioni), è data da una quadrupla della forma

seguente:

$$R_j = (N_j, C_j, S_j, T_j)$$

in cui N_j è il numero d'ordine assegnato alla relazione R_j , C_j è l'insieme delle componenti di supporto, S_j è l'insieme delle variabili coinvolte in R_j e T_j è l'insieme delle relazioni primarie utilizzate per derivare la relazione R_j .

Specificamente, ciascuna relazione primaria è rappresentata da una quadrupla di forma

$$R_j = (n_j, C_j, S_j, \{n_j\})$$

in cui n_j è il numero della relazione primaria, e dal momento che ciascuna relazione primaria non dipende dalle altre relazioni, l'ultima componente della quadrupla è $\{n_j\}$.

E' possibile che si ottengano le medesime relazioni (intermedie o ARR) attraverso differenti derivazioni. Per evitare di mantenere diverse copie di una medesima relazione, due relazioni

$$R_j = (N_j, C_j, S_j, T_j) \text{ e } R_k = (N_k, C_k, S_k, T_k)$$

si definiscono *identiche* se

$$(S_j, T_j) = (S_k, T_k).$$

Nel processo di generazione delle ARR, se una nuova relazione intermedia o una ARR è identica ad una generata precedentemente, allora è cancellata dall'elenco.

Le relazioni primarie sono gli elementi iniziali del sistema $\mathbf{V}$, e man mano che sono calcolate nuove relazioni, esse vengono aggiunte ad $\mathbf{V}$.

Il risultato del procedimento dell'invenzione è insieme $\mathbf{V}$ di tutte le relazioni intermedie distinte, di cui fanno parte le ARR ricercate.

Operazione di base del procedimento oggetto dell'invenzione è la generazione di una nuova relazione a partire da due relazioni date.

Si supponga che esistano due relazioni in $\mathbf{V}$:

$$R_j = (N_j, C_j, S_j, T_j) \quad \text{e} \quad R_k = (N_k, C_k, S_k, T_k)$$

Se sono soddisfatte entrambe le seguenti condizioni:

$$S_j \cap S_k \neq \{\} \quad \text{e} \quad T_j \cap T_k = \{\}$$

allora, per ciascuna variabile non osservata $x \in S_j \cap S_k$

si genera la seguente relazione

$$R = (N, C_j \cup C_k, (S_j \cup S_k) - \{x\}, T_j \cup T_k),$$

in cui N è un nuovo numero.

La R sarà aggiunta all'insieme di soluzioni $\mathbf{V}$ solo se essa è una nuova relazione, ovvero se essa non è identica ad altre relazioni già presenti in $\mathbf{V}$.

L'esecuzione dell'algoritmo o procedimento og-

getto dell'invenzione include almeno una iterazione, e tipicamente una pluralità di iterazioni (round), ciascuna iterazione comprendendo una pluralità di cicli.

In ciascuna iterazione il procedimento muove le mosse da un insieme di partenza o sfondo $\mathbf{D}$ di relazioni, inizialmente l'insieme delle relazioni primarie PR.

Quindi, il procedimento genera gli insiemi

$$\mathbf{D}_1, \mathbf{D}_2, \mathbf{D}_3, \dots$$

in cui $\mathbf{D}_1 = \mathbf{D}$ e $\mathbf{D}_2$ è l'insieme di nuove relazioni ottenuto a partire da due relazioni appartenenti all'insieme $\mathbf{D}$. In generale, $\mathbf{D}_{k+1}$ è l'insieme di nuove relazioni ottenuto a partire da una relazione appartenente all'insieme di relazioni di sfondo $\mathbf{D}$ ed una relazione appartenente all'insieme di relazioni derivate $\mathbf{D}_k$.

La rappresentazione grafica dell'iterazione di generazione di relazioni è mostrata in figura 2.

Il processo di calcolo di ciascun insieme $\mathbf{D}_k$ è di seguito denominato *ciclo* di generazione di relazioni.

Gli insiemi $\mathbf{D}_k$ non vuoti ottenuti in questo modo sono aggiunti ad una coda $\mathbf{Q}$ di insiemi di seme candidati, ovvero insiemi candidati a servire come

possibili insiemi di partenza o sfondo di una nuova iterazione.

Una iterazione termina quando la combinazione delle relazioni in D e D_n (ultimo insieme non vuoto generato nell'iterazione) non produce alcuna nuova relazione, ossia conduce ad un insieme vuoto

Al termine di una iterazione, una nuova iterazione è eseguita a partire dal primo insieme appartenente alla coda Q (che diventa l'insieme di partenza o sfondo dell'iterazione), estraendo tale insieme dalla coda. Questo insieme così selezionato è utilizzato come insieme di partenza della nuova iterazione se la combinazione delle relazioni in questo insieme porta ad un insieme non vuoto altrimenti saranno considerati altri insiemi di seme candidati in Q .

Il procedimento si arresta quando la coda Q è vuota, ossia non esistono più insiemi candidati a formare insiemi di partenza per nuove iterazioni.

Ad esempio, in figura 2 è mostrata una prima iterazione del procedimento. Per eseguire una seconda iterazione si imposta $D=D_2$ se la combinazione delle relazioni in D_2 conduce ad almeno una nuova relazione, ossia ad un insieme non vuoto di relazioni. Altrimenti, altri insiemi in Q sono conside-

rati come potenziali insiemi candidati di partenza.

L'intero procedimento termina quando non è più disponibile alcun insieme D_k per una nuova iterazione.

Di seguito è dato lo pseudo-codice per un algoritmo di realizzazione del procedimento sopra descritto.

ARR_Generation (D)

/* generates the set V of all ARR's from the primary relations in set D */

```
1.   V = D
2.   Q = { D }
3.   while Q ≠ {}
4.       S = first element of Q
5.       Q = Q after removing the first
element of Q
6.       T = all new Rs obtained from D and
S
7.       if T ≠ {} then
8.           V = V ∪ T
9.           add T to the end of Q
10.      end if
11.  end while
12.  return V
```

Il ciclo *while* corrisponde alle iterazioni e

la pseudo-istruzione 6 ai cicli del procedimento. D è generico per identificare l'insieme di partenza o di sfondo di ogni iterazione (includente le relazioni primarie nella prima iterazione).

Per analizzare la complessità dell'algoritmo si consideri il numero totale L di relazioni.

E' dimostrabile che il numero di operazioni necessarie per terminare l'algoritmo è $O(L^4)$. Infatti, il numero di insiemi nella coda Q è al massimo L ; il ciclo *while* si ripete pertanto al massimo L volte. In ciascuna iterazione del ciclo *while*, la dimensione dell'insieme S è al massimo L e l'insieme T di nuove relazioni ha dimensione massima L ed è ottenuto con $O(L^2)$ operazioni. Inoltre, ci sono al massimo L insiemi T . Pertanto, ciascuna iterazione del ciclo *while* ha necessità di $O(L^3)$ operazioni; l'intero algoritmo richiede quindi $O(L^4)$ operazioni.

Vantaggiosamente, dunque, è stato dimostrato che il procedimento oggetto dell'invenzione presenta una complessità solo polinomiale per la derivazione delle relazioni di ridondanza analitica, contrariamente agli esempi di tecnica nota.

Un sistema di diagnosi o analisi strutturale di un impianto comprende una stazione di lavoro

computerizzata (workstation) di tipo noto (non raffigurata), ovvero un sistema di elaborazione di tipo distribuito, avente un sottosistema elaboratore e dispositivi periferici di ingresso/uscita, locali o remoti, predisposti per eseguire un programma di elaborazione e calcolo o gruppi/moduli di programma memorizzati su disco o accessibili in rete, che realizzano il metodo (algoritmo) oggetto dell'invenzione. Tali soluzioni qui richiamate sono considerate ben note nella tecnica e non saranno ulteriormente descritte in questa sede perché di per sé non rilevanti ai fini dell'attuazione e della comprensione della presente invenzione.

ESEMPI DI REALIZZAZIONE

Per la dimostrazione del procedimento sopra descritto sono presentati nel seguito esempi di applicazione a due sistemi sintetici e ad un sistema reale.

Primo esempio

Si faccia riferimento al sistema illustrato in figura 1, già descritto nella parte introduttiva di questa descrizione.

La tabella 4 seguente presenta i risultati dell'applicazione del procedimento oggetto dell'invenzione per la derivazione di relazioni implicite

per questo sistema.

Tabella 4 - Derivazione di relazioni (ARR) implicite per il sistema di figura 1

n.	Relazione	Componenti di supporto	Sensori (variabili)	Derivazione	Forma esplicita
1	$S_1 = \{a, c, x\}$	M_1	x	S_1	$x = ac$
2	$S_2 = \{b, d, y\}$	M_2	y	S_2	$y = bd$
3	$S_3 = \{c, e, z\}$	M_3	z	S_3	$z = ce$
4	$S_4 = \{x, y, f\}$	A_1	x, y, f	S_4	$f = x + y$
5	$S_5 = \{y, z, g\}$	A_2	y, z, g	S_5	$g = y + z$
$D_1 = \{S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$					
6	$S_6 = \{a, c, y, f\}$	M_1, A_1	y, f	S_1, S_4	$f = y + ac$
7	$S_7 = \{b, d, x, f\}$	M_2, A_1	x, f	S_2, S_4	$f = x + bd$
8	$S_8 = \{b, d, z, g\}$	M_2, A_2	z, g	S_2, S_5	$g = z + bd$
9	$S_9 = \{c, e, y, g\}$	M_3, A_2	y, g	S_3, S_5	$g = y + ce$
10	$S_{10} = \{x, z, f, g\}$	A_2, A_1	x, z, f, g	S_4, S_5	$f - g = x - z$
$D_2 = \{S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}\}$					
11	$S_{11} = \{a, b, c, d, f\}$	M_2, M_1, A_1	f	S_1, S_7	$f = ac + bd$
12	$S_{12} = \{a, c, z, f, g\}$	M_1, A_2, A_1	z, f, g	S_1, S_{10}	$f - g = ac - z$
11'	$S_{11} = \{a, b, c, d, f\}$	M_2, M_1, A_1	f	S_2, S_6	$f = ac + bd$
13	$S_{13} = \{b, c, d, e, g\}$	M_3, M_2, A_2	g	S_2, S_9	$g = bd + ce$
13'	$S_{13} = \{b, c, d, e, g\}$	M_3, M_2, A_2	g	S_3, S_8	$g = bd + ce$
14	$S_{14} = \{c, e, x, f, g\}$	M_3, A_2, A_1	x, f, g	S_3, S_{10}	$f - g = x - ce$
14'	$S_{14} = \{c, e, x, f, g\}$	M_3, A_2, A_1	x, f, g	S_4, S_9	$f - g = x - ce$
12'	$S_{12} = \{a, c, z, f, g\}$	M_1, A_2, A_1	z, f, g	S_5, S_6	$f - g = ac - z$
$D_3 = \{S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}\}$					
15	$S_{15} = \{a, c, e, f, g\}$	M_3, M_1, A_2, A_1	f, g	S_1, S_{14}	$f - g = ac - ce$
15'	$S_{15} = \{a, c, e, f, g\}$	M_3, M_1, A_2, A_1	f, g	S_3, S_{12}	$f - g = ac - ce$

Per completezza la forma esplicita delle equazioni rappresentative delle relazioni implicite è mostrata in tabella.

Il procedimento è applicato alle relazioni primarie per eliminare le variabili incognite (non osservabili) (x, y, z) .

Le relazioni ARR sono quelle relazioni che coinvolgono soltanto le variabili note, ossia gli

ingressi (a, b, c, d, e) ed i sensori o variabili di osservazione (f, g) , quindi le relazioni indicate 11, 13 e 15 in tabella 4. Si noti che l'applicazione del procedimento in questo esempio comporta una sola iterazione e tre cicli, risultando in tre insiemi di relazioni D_2 a D_4 . Si noti anche che una medesima relazione può essere derivata in modi diversi, ad esempio le relazioni 11, 12, 13, 14 e 15 sono ottenute ciascuna a partire da due differenti combinazioni di relazioni precedenti. Tuttavia, come indicato sopra, il procedimento è atto a rivelare relazioni duplicate ed a scartare ogni duplicazione.

Come esempio di relazioni ridondanti si considerino le relazioni R_8 e R_9 con la variabile comune g . Entrambe R_8 e R_9 presentano la relazione primaria PR_5 (o, in altri termini, l'insieme di variabili S_5) nella loro derivazione. Pertanto, l'eliminazione della variabile g porterebbe ad ottenere una relazione ridondante nella forma della somma delle relazioni primarie $PR_2 + PR_3$. Lo stesso vale per le relazioni R_6 e R_7 con la variabile comune f ; per le relazioni R_8 ed R_{10} con la variabile comune g ; per le relazioni R_9 e R_{10} con la variabile comune g .

L'esecuzione del procedimento è terminata alla

prima iterazione dopo tre cicli. Ha inizio con l'insieme D_1 delle relazioni primarie, corrispondente alle relazioni 1-5 già evidenziate in tabella 1 agli inizi della descrizione. L'insieme D_2 (le relazioni indicate 6-10 in tabella 4) è ottenuto a partire da una relazione in D_1 per combinazione con un'altra relazione dello stesso insieme. L'insieme D_3 (le relazioni 11-12') è ottenuto a partire da una relazione in D_1 ed una relazione in D_2 . L'insieme D_4 (relazioni 15-15') è ottenuto da una relazione in D_1 ed una relazione in D_3 . La combinazione di D_1 e D_4 non genera alcuna nuova relazione, il che indica il completamento della prima iterazione. Il procedimento termina con la prima iterazione, dal momento che nessuno dei possibili insiemi candidati D_2 , D_3 e D_4 può essere utilizzato per iniziare una nuova iterazione, ossia la combinazione delle relazioni in ciascuno degli insiemi D_2 , D_3 , D_4 non conduce ad alcuna nuova relazione. Quindi, il procedimento termine con questo stadio.

Secondo Esempio

Si consideri un altro circuito multiporta, mostrato in figura 3, comprendente quattro sommatore M_1 - M_4 , a cui afferiscono tre ingressi, rispettivamente u , v , t , e dai quali emergono quattro uscite

x, y, z, w .

L'insieme di relazioni primarie ed i loro componenti associati sono:

$$PR_1: x = u + v ; M_1$$

$$PR_2: y = u - 2v ; M_2$$

$$PR_3: z = u + t ; M_3$$

$$PR_4: w = u - 2t ; M_4$$

Una caratteristica specifica di questo sistema è che esistono più variabili comuni tra le sue relazioni primarie. Si supponga che tutte le variabili siano osservabili. In tabella 5 sono rappresentate le 24 relazioni intermedie.

Tabella 5 - Insieme completo di relazioni (ARR) per il sistema di figura 3

n.	Relazione	Componenti di supporto	Sensori (variabili)	Derivazione	Forma esplicita
1	$S_1 = \{x, u, v\}$	M_1	x, u, v	1	$x = u + v$
2	$S_2 = \{y, u, v\}$	M_2	y, u, v	2	$y = u - 2v$
3	$S_3 = \{z, u, t\}$	M_3	z, u, t	3	$z = u + t$
4	$S_4 = \{w, u, t\}$	M_4	w, u, t	4	$w = u - 2t$
	$D_1 = \{S_1, S_2, S_3\}$				
5	$S_5 = \{x, y, v\}$	M_1, M_2	x, y, v	1, 2	$x - y = 3v$
6	$S_6 = \{x, y, u\}$	M_1, M_2	w, u, t	1, 2	$2x + y = 3u$
7	$S_7 = \{x, z, v, t\}$	M_1, M_3	x, z, v, t	1, 3	$x - z = v - t$
8	$S_8 = \{x, w, v, t\}$	M_1, M_4	x, w, v, t	1, 4	$x - w = v - 2t$
9	$S_9 = \{z, y, v, t\}$	M_2, M_3	z, y, v, t	2, 3	$z - y = 2v + t$
10	$S_{10} = \{y, w, t, v\}$	M_2, M_4	y, w, t, v	2, 4	$y - w = 2t - 2v$
11	$S_{11} = \{z, w, u\}$	M_3, M_4	z, w, u	3, 4	$2z + w = 3u$
12	$S_{12} = \{z, w, t\}$	M_3, M_4	z, w, t	3, 4	$z - w = 3t$
	$D_2 = \{S_8, S_6\}$				
13	$S_{13} = \{z, y, x, u, t\}$	M_1, M_2, M_3	z, y, x, u, t	1, 9	$z - y = 2x - 2u +$
14	$S_{14} = \{y, w, x, u, t\}$	M_1, M_2, M_4	y, w, x, u, t	1, 10	$y - w = 2t - 2x - 2u$

15	$S_{15} = \{z, w, x, v\}$	M_1, M_3, M_4	z, w, x, v	1, 11	$2z + w = 3x - 3v$
16	$S_{16} = \{z, w, y, v\}$	M_2, M_3, M_4	z, w, y, v	2, 11	$2z + w = 3y + 6v$
17	$S_{17} = \{x, y, z, t\}$	M_1, M_2, M_3	x, y, z, t	3, 6	$2x + y = 3z - 3t$
18	$S_{18} = \{x, w, v, z, u\}$	M_1, M_3, M_4	x, w, v, z, u	3, 8	$x - w = v - 2z + 2u$
19	$S_{19} = \{y, w, z, u, v\}$	M_2, M_3, M_4	y, w, z, u, v	3, 10	$y - w = 2z - 2u -$
20	$S_{20} = \{x, y, w, t\}$	M_1, M_2, M_4	x, y, w, t	4, 6	$2x + y = 3w + 6t$
	$D_3 = \{S_{13}, S_{14}, \dots\}$				
21	$S_{21} = \{z, w, y, x, u\}$	$M_1, M_2, M_3,$	z, w, y, x, u	1, 16	$2z + w = 3y + 6x -$
22	$S_{22} = \{y, w, z, x, v\}$	$M_1, M_2, M_3,$	y, w, z, x, v	1, 19	$y - w = 2z - 2x -$
23	$S_{23} = \{y, w, t, x, z\}$	$M_1, M_2, M_3,$	y, w, t, x, z	3, 14	$y - w = 4t - 2x -$
	$D_4 = \{S_{21}, S_{22},$				
24	$S_{24} = \{z, w, x, y\}$	$M_1, M_2, M_3,$	z, w, x, y	6, 11	$2z + w = 2x + y$
	$D_5 = \{S_{24}\}$				

Al contrario, l'applicazione di un algoritmo di derivazione di relazioni di ridondanza analitica della tecnica nota permette di generare un numero inferiore (14, 15, o al massimo 17) di relazioni intermedie, in funzione dell'ordine delle variabili selezionate per l'eliminazione. Ad esempio, non è possibile produrre la relazione R_{13} data in tabella come: $2x + y - z + t - 2u = 0$. Questo esempio dimostra chiaramente che la focalizzazione del procedimento di generazione delle relazioni di ridondanza analitica sulle variabili può risultare in un insieme incompleto di relazioni. Un'altra caratteristica interessante del sistema d'esempio è che, come mostrato dalle relazioni R_5 ed R_6 , esso dimostra che differenti relazioni possono avere lo stesso insieme di componenti di supporto e lo stes-

so insieme di relazioni primarie nella propria derivazione, ma insiemi differenti di variabili.

Si noti che, in questo esempio, il procedimento consiste di due iterazioni. La prima iterazione include tre cicli e porta alla generazione degli insiemi D_2 , D_3 e D_4 . La seconda iterazione inizia impostando come insieme di partenza $D=D_2$ e include un solo ciclo che porta alla generazione dell'insieme D_6 . La seconda iterazione termina non essendo possibile alcuna altra combinazione tra relazioni in D_2 e D_6 . Il procedimento termina dal momento che nessuno degli insiemi candidati rimanenti porta alla generazione di nuove relazioni.

Terzo esempio: sistema di turbina a gas

Il seguente esempio è un esempio di un sistema concreto, quale una turbina a gas di un impianto di generazione elettrica.

Si faccia riferimento alla rappresentazione schematica del sistema riportata in figura 4.

Le componenti principali del sistema sono due attuatori: la valvola di arresto o Stop Ratio Valve (SRV) e la valvola di controllo o Gas Control Valve (GCV). Queste valvole sono collegate in serie e controllano il flusso di gas che si immette nelle camere di combustione della turbina. La prima di

queste valvole, la valvola SRV, è controllata da un anello di retroazione che mantiene la pressione del gas costante alla sua uscita (pressione tra le due valvole) FPG2. Essendo questa pressione costante il flusso di gas è determinato esclusivamente dalla posizione della valvola GCV, per cui quest'ultima è una valvola a posizione controllata.

Le componenti del sistema sono:

GCVh: valvola di controllo del gas (componente idraulica)

SRVh: valvola di arresto (componente idraulica)

GCVm: valvola di controllo del gas (componente meccanica); e

SRVm: valvola di arresto (componente meccanica).

Si considerino guasti sui componenti: GCVm, GCVh, SRVm, SRVh, iniettori e quattro trasduttori. L'insieme di guasti è quindi dato da:

{GCVm, GCVh, SRVm, SRVh, Inj, TFSG, TFSGR, TFQG, TCPD}

in cui il simbolo "Txyz" indica il guasto nel sensore "xyz". Le relazioni primarie del sistema e le loro variabili associate sono indicate di seguito nella tabella 6.

Tabella 6 - Relazioni primarie del sistema di turbina a gas

Component	Realtion	Equation	Exogenous variables
Injectors	r_1	$Q_3 = K_{inj} \sqrt{P_3 - CPD}$	CPD
Injectors	r_2	$Q_4 - K_{lix} Q_3 = 0$	
GCVh	r_3	$Q_2 = FSG \sqrt{FPG2 - P_3}$	
GCVh	r_4	$Q_3 - K_l Q_2 = 0$	
SRVh	r_5	$FQG = FSGR \sqrt{P_1 - FPG2}$	P_1
SRVh	r_6	$Q_2 - K_l FQG = 0$	
GCVm	r_7	$FSG = f(FAG, 96HQL)$	$96HQL$
SRVm	r_8	$FSGR = f(FAGR, 96HQL)$	$96HQL$
GCVm	r_9	$FSG = f(FSROUT, 96HQL)$	$FSROUT, 96HQL$
SRVm	r_{10}	$FSGR = f(FPG2, FPRGOUT, 96HQL)$	$FPRGOUT, 96HQL$
SRVm + SRVh	r_{11}	$FPG2 = f(FPRGOUT)$	$FPRGOUT$

Si noti che alcune relazioni primarie sono indicate in forma implicita ed indicano soltanto la relazione funzionale tra le variabili.

La matrice strutturale del sistema è quindi presentata in tabella 7.

Tabella 7 - Matrice strutturale del sistema di turbina

variabili	Q_2	Q_3	Q_4	P_3	$FPG2$	FQG	FSG	$FSGR$	FAG	$FAGR$
guasti										
Iniettore, TCPD		X		X						
Iniettore			X	X						
GCVh, TFSG	X	X		X	X					
GCVh	X	X								
SRVh, TFSGR, TFQG						X		X		
SRVh, TFQG	X					X				
GCVm, TFSG							X		X	
GCVm, TFSGR							X			
SRVm, TFSG								X		X
SRVm, TFSGR								X		
SRVm, SRVh					X					

Questa matrice indica che ciascuna relazione primaria di tabella 6 è collegata con determinati guasti del sistema.

Applicando il procedimento oggetto dell'invenzione per la derivazione delle relazioni di ridondanza analitica e della matrice FSM risultante, è possibile effettuare un'analisi del sistema e giungere alle seguenti conclusioni.

Facendo uso della matrice strutturale di tabella 7 è possibile assumere dapprima che i sensori siano collocati fisicamente in nove siti, Q2, Q3, P3, FPG2, FQG, FSG, FSGR, FAG, FAGR. Dall'applicazione del procedimento è possibile derivare 551 relazioni implicite e la conseguente matrice HFSM.

Per prova è stato applicato anche un algoritmo di tecnica nota, ad esempio l'algoritmo descritto in L. Travé-Massuyès, T. Escobet, and X. Olive, "Diagnosability Analysis Based on Component-Supported Analytical Redundancy Relations," *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics, Part A: Systems and Humans*, Vol. 36, n. 6, pagg. 1146-1160, Nov. 2006.

La tabella 8 successiva mostra il confronto dei due procedimenti in termini di tempo di calcolo e numero delle relazioni derivate. Si noti che i due

procedimenti sono stati realizzati applicando algoritmi descritti nello stesso linguaggio (Mathematica) ed eseguiti sulla medesima piattaforma di calcolo.

Tabella 8 - Confronto di metodologie per la derivazione di relazioni per il sistema di turbina a gas.

Metodo	Numero di ARR	Tempo di calcolo [S]
Tecnica nota	317	1606.47
Invenzione	551	0.703

Come si può notare, l'algoritmo di tecnica nota non solo produce un insieme incompleto di relazioni, ma esso risulta anche scarsamente efficiente in termini di tempo di calcolo.

In seguito ci si occupa dell'analisi ed ottimizzazione dei sensori del sistema.

Per l'analisi dei quattro sensori esistenti del sistema, indicati nell'insieme {FSGR, FQG, FPG2, FSG} abbiamo dapprima selezionato dalle 551 relazioni originali, l'insieme di 26 relazioni corrispondenti ai 4 sensori impiegati. La matrice FSM risultante da queste relazioni è presentata nella tabella 9 seguente.

Tabella 9 - Matrice di firma dei guasti risultante da 4 sensori del sistema di turbina a gas.

ARR \ guasti	GCVh	GCVm	Injt	SRVh	SRVm	TCpd	Tfqg	Tfsg	Tfsgr	Sensori
ARR1	0	0	0	1	0	0	1	0	1	{fpg2, fqg, fsgr}
ARR2	0	1	0	0	0	0	0	1	0	{fsg}
ARR3	0	0	0	0	1	0	0	0	1	{fsgr}
ARR4	0	0	0	1	1	0	0	0	0	{fpg2}
ARR5	0	0	0	1	1	0	1	0	1	{fpg2, fqg}
ARR6	0	0	0	1	1	0	1	0	1	{fqg, fsgr}
ARR7	0	0	0	1	1	0	1	0	1	{fqg}
ARR8	1	0	1	1	0	1	0	1	0	{fpg2, fqg, fsg}
ARR9	1	0	1	1	0	1	0	1	1	{fqg, fsg, fsgr}
ARR10	1	0	1	1	0	1	0	1	0	{fpg2, fsg, fsgr}
ARR11	1	1	1	1	0	1	0	1	0	{fpg2, fqg}
ARR12	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fqg, fsg}
ARR13	1	1	1	1	0	1	0	1	1	{fqg, fsgr}
ARR14	1	1	1	1	0	1	0	1	1	{fpg2, fsgr}
ARR15	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2, fsg, fsgr}
ARR16	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fqg, fsg}
ARR17	1	1	1	1	1	1	1	1	0	{fqg}
ARR18	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2, fsg}
ARR19	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fsg, fsgr}
ARR20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2, fsgr}
ARR21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	{fqg}
ARR22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2}
ARR23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	{fsgr}
ARR24	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2, fsg}
ARR25	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fsg}
ARR26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2}

L'applicazione del procedimento oggetto dell'invenzione consente di confermare, come già avveniva nell'applicazione del procedimento di tecnica nota, tramite la matrice FSM, che i guasti nella valvola di controllo del gas GCVh, nel sensore di pressione dell'iniettore (Inj) e nel sensore

di pressione del compressore (CPD) non possono essere discriminati tra loro. In altre parole, i vettori di firma di questi guasti, come mostrato in tabella 9, sono identici. Inoltre, è possibile mostrare che i guasti in {Inj, CPD} non possono essere distinti tra loro, non importa quale sistema di sensori venga utilizzato. Questo è mostrato dalla matrice HFSM dal momento che, anche assumendo che siano impiegati tutti i nove sensori possibili, i vettori di firma dei guasti di Inj e CPD permangono identici. In conclusione, a causa della mancanza di sensori adeguati, in ogni caso questi due guasti non possono essere discriminati.

E' possibile tuttavia eseguire un'analisi ulteriore dei sensori esistenti con risultati assai interessanti e sorprendenti.

Si dimostra infatti dall'applicazione del procedimento oggetto dell'invenzione che dei quattro sensori impiegati, di fatto, un sensore, e precisamente il sensore FSGR, è ridondante.

Per svolgere questa analisi è stato applicato un algoritmo di ottimizzazione dei sensori, come ad esempio descritto in US 7249003 (domanda n. US2006/195302), inventori A. Fijany e F. Vatan; "A New Efficient Algorithm for Analyzing and Optimiz-

ing the System of Sensors", *IEEE Aerospace Conference*, Marzo 2006; A. Fijany e F. Vatan, "A New Method for Sensor Placement Optimization," *Proceedings of 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, luglio 2005, A. Fijany e F. Vatan, "A Unified and Efficient Algorithmic Approach to Model-based Diagnosis and Optimal Sensor Placement," *Proceedings of 8th International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space (i-SAIRAS)*, settembre 2005.

Si è assunto che i sensori possano essere collocati in quattro siti, indicati FSGR, FQG, FPG2, FSG, corrispondenti ai siti dei sensori esistenti. L'algoritmo di ottimizzazione ha così permesso di determinare che, date le quattro possibili collocazioni, l'insieme di sensori ottimali per raggiungere la massima capacità possibile di rivelazione ed isolamento dei guasti è l'insieme {FQG, FPG2, FSG}.

La matrice FSM corrispondente a questo insieme di sensori è mostrata in tabella 10.

Tabella 10 – Matrice di firma dei guasti risultante da 3 sensori del sistema di turbina a gas

guasti ARR	GCVh	GCVm	Inj	SRVh	SRVm	TCpd	Tfqg	Tfsg	Tfsgr	Sensori
ARR1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	{fsg}
ARR2	0	0	0	1	1	0	0	0	0	{fpg2}
ARR3	0	0	0	1	1	0	1	0	1	{fpg2, fqg}

ARR4	0	0	0	1	1	0	1	0	1	{fpg}
ARR5	1	0	1	1	0	1	0	1	0	{fpg2, fpg, fsg}
ARR6	1	1	1	1	0	1	0	1	0	{fpg2, fpg}
ARR7	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fpg, fsg}
ARR8	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fpg, fsg}
ARR9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	{fpg}
ARR10	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2, fsg}
ARR11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	{fpg}
ARR12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2}
ARR13	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2, fsg}
ARR14	1	0	1	1	1	1	1	1	1	{fsg}
ARR15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	{fpg2}

Come si nota, e per confronto con la tabella 9, l'insieme dei tre sensori FGQ, FPG2, FSG raggiunge esattamente lo stesso livello di rivelazione ed isolamento dei guasti che viene raggiunto dall'insieme di sensori FSGR, FQG, FPG2, FSG.

Ciò indica chiaramente che nell'impianto realizzato il sensore FSGR è ridondante, ossia non fornisce alcuna informazione aggiuntiva per la rivelazione ed isolamento dei guasti dell'impianto.

CONCLUSIONI

E' stato descritto un procedimento per la generazione di un insieme completo di relazione di ridondanza analitica, atte a consentire l'ottimizzazione, la convalida e l'analisi di un sistema di sensori di controllo di un impianto, nonché atte a fornire la base di un procedimento di diagnosi dell'impianto.

E' stato dimostrato che il procedimento ogget-

to dell'invenzione è efficiente, poiché in un sistema con L relazioni il numero di operazioni che esso richiede per rintracciare tutte le relazioni è polinomiale in L .

L'efficacia dell'algoritmo è stata inoltre dimostrata applicandolo ad alcuni esempi, di sintesi o concreti.

Come richiamato, la derivazione dell'insieme di relazioni di ridondanza analitica in forma implicita è sufficiente per l'analisi ed ottimizzazione dei sensori.

Tuttavia, per una diagnosi basata su modello, la forma esplicita delle relazioni è necessaria per la loro valutazione. In tal caso il procedimento qui descritto può essere utilizzato insieme ad uno strumento manipolatore simbolico per derivare la forma esplicita delle relazioni di ridondanza analitica a partire dalla conoscenza delle relazioni primarie note.

Specificamente, lo strumento di derivazione delle relazioni di ridondanza analitica oggetto dell'invenzione ha tre principali applicazioni:

1. Analisi di sistemi

Per un sistema o impianto esistente e l'associato insieme di sensori, lo strumento oggetto

dell'invenzione può generare l'insieme completo di ARR e conseguentemente la matrice di firma dei guasti del sistema, in cui le colonne indicano le componenti (o guasti) e le righe indicano le ARR. Una semplice analisi della FSM può rivelare l'intrinseco grado di diagnosticabilità del sistema, ovvero il grado di rivelazione ed isolamento (discriminazione) dei guasti, indipendentemente dalla tecnica di diagnosi impiegata.

2. Progetto di sistemi e disposizione ottimale dei sensori

Per l'ottimizzazione del sistema, dato il modello di sistema e tutte le possibili, ipotetiche disposizioni dei sensori, questo strumento genera la matrice di firma dei guasti ipotetica (HFSM), a partire dalla quale può essere basata l'ottimizzazione dei sensori.

3. Diagnosi di sistemi

Dato un sistema e il suo insieme di sensori, questo strumento genera l'insieme completo di relazioni di ridondanza analitica relative a tali sensori. Per scopi di diagnosi, le ARR sono calcolate sulla base delle letture dei sensori. Se una data ARR non è soddisfatta, allora l'insieme di componenti associati a tale ARR include almeno un compo-

nente guasto.

Naturalmente, fermo restando il principio dell'invenzione, le forme di attuazione ed i particolari di realizzazione potranno essere ampiamente variati rispetto a quanto è stato descritto ed illustrato a puro titolo di esempio non limitativo, senza per questo allontanarsi dall'ambito di protezione dell'invenzione definita dalle rivendicazioni allegate.

1. Procedimento attuabile per mezzo di un elaboratore per la generazione di un insieme di relazioni di ridondanza analitica rappresentative di un sistema al quale è associata una pluralità di sensori per l'osservazione di variabili indicative di condizioni di funzionamento ed atte a consentire la rivelazione e la discriminazione di guasti,

il sistema essendo descrivibile da un modello basato sulla configurazione di componenti del sistema, comprendente un insieme di relazioni primarie tra ingressi ed uscite di ciascuna componente, indicative della relativa funzione operativa,

in cui ogni relazione di ridondanza analitica è funzione di un sottoinsieme di variabili osservabili del sistema ed ha come supporto un sottoinsieme di componenti del sistema,

caratterizzato dal fatto che comprende la selezione di un insieme completo di relazioni di ridondanza analitica (ARR_k) del sistema tra un insieme $\mathbf{V}$ di relazioni intermedie stabilite tra variabili osservabili e non osservabili del sistema,

in cui ogni relazione intermedia (R_j) è generata per combinazione di due relazioni predeterminate

$$R_j = (N_j, C_j, S_j, T_j) \quad \text{e} \quad R_k = (N_k, C_k, S_k, T_k)$$

N_j, N_k essendo i numeri d'ordine assegnati rispettivamente alle relazioni R_j, R_k , ciascuna delle quali è espressa in forma implicita come tupla (i) di un sottoinsieme S_j di variabili del sistema, (ii) dell'insieme C_j delle componenti di supporto a tale relazione, e (iii) dell'insieme T_j delle relazioni primarie utilizzate per derivare detta relazione intermedia,

secondo la regola:

$$R = (N, C_j \cup C_k, (S_j \cup S_k) - \{x\}, T_j \cup T_k),$$

dove $(S_j \cup S_k) - \{x\}$ indica una operazione di differenza simmetrica tra i sottoinsiemi di variabili S_j, S_k per ciascuna variabile non osservabile $x \in S_j \cap S_k$,

quando sono soddisfatte entrambe le condizioni:

$$S_j \cap S_k \neq \{\} \quad \text{e} \quad T_j \cap T_k = \{\}$$

2. Procedimento secondo la rivendicazione 1, caratterizzato dal fatto che detto insieme **V** di relazioni intermedie non include relazioni intermedie identiche, secondo la relazione di identità:

$$(S_j, T_j) = (S_k, T_k).$$

3. Procedimento secondo la rivendicazione 1 o 2,

in cui la generazione dell'insieme di relazioni intermedie **V** comprende l'esecuzione di una successione di cicli di combinazione tra coppie di relazioni predeterminate, ciascun ciclo di combinazione essendo eseguito tra una prima relazione appartenente ad un insieme di relazioni di sfondo ed una seconda relazione appartenente ad un insieme di relazioni derivate.

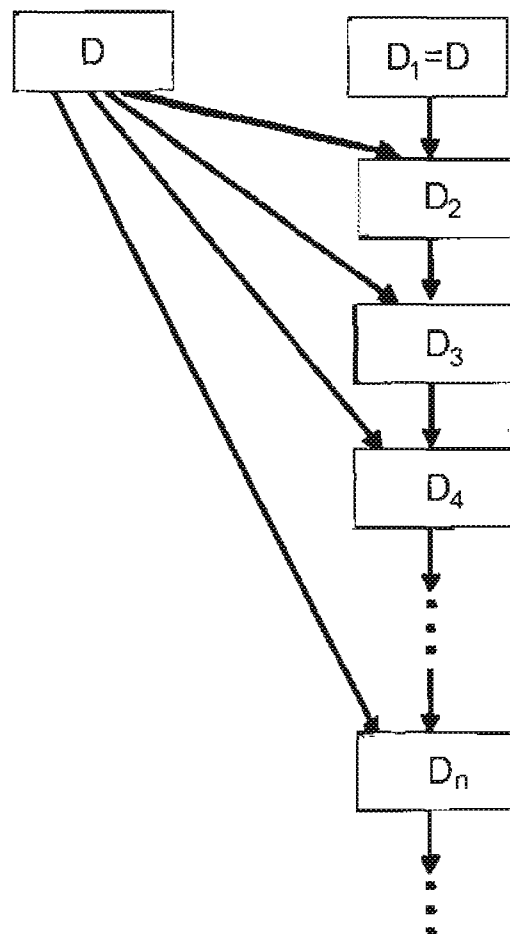
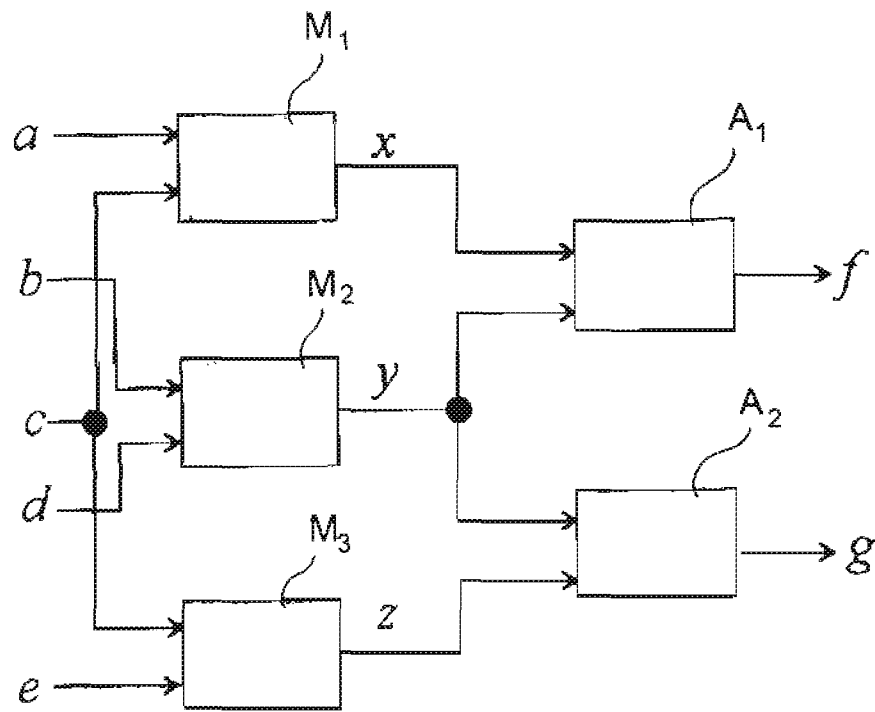
4. Procedimento secondo la rivendicazione 3, in cui l'insieme di relazioni di sfondo è l'insieme di relazioni primarie.

5. Procedimento secondo la rivendicazione 3, in cui nel primo ciclo l'insieme di relazioni derivate è l'insieme di relazioni primarie.

6. Procedimento secondo la rivendicazione 3, comprendente l'esecuzione iterata di successioni di cicli di combinazione, in cui l'insieme di relazioni di sfondo è un insieme di relazioni derivate generato dalla successione di cicli precedente.

7. Sistema di diagnosi o di analisi strutturale di una disposizione di sensori, comprendente un sistema di elaborazione predisposto per attuare un procedimento per la generazione di un insieme di relazioni di ridondanza analitica secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1 a 6.

8. Programma di elaboratore o gruppo di programmi eseguibile/i da un sistema di elaborazione, comprendente/i uno o più moduli di codice per l'attuazione di un procedimento per la generazione di un insieme di relazioni di ridondanza analitica secondo una qualsiasi delle rivendicazioni 1 a 6.



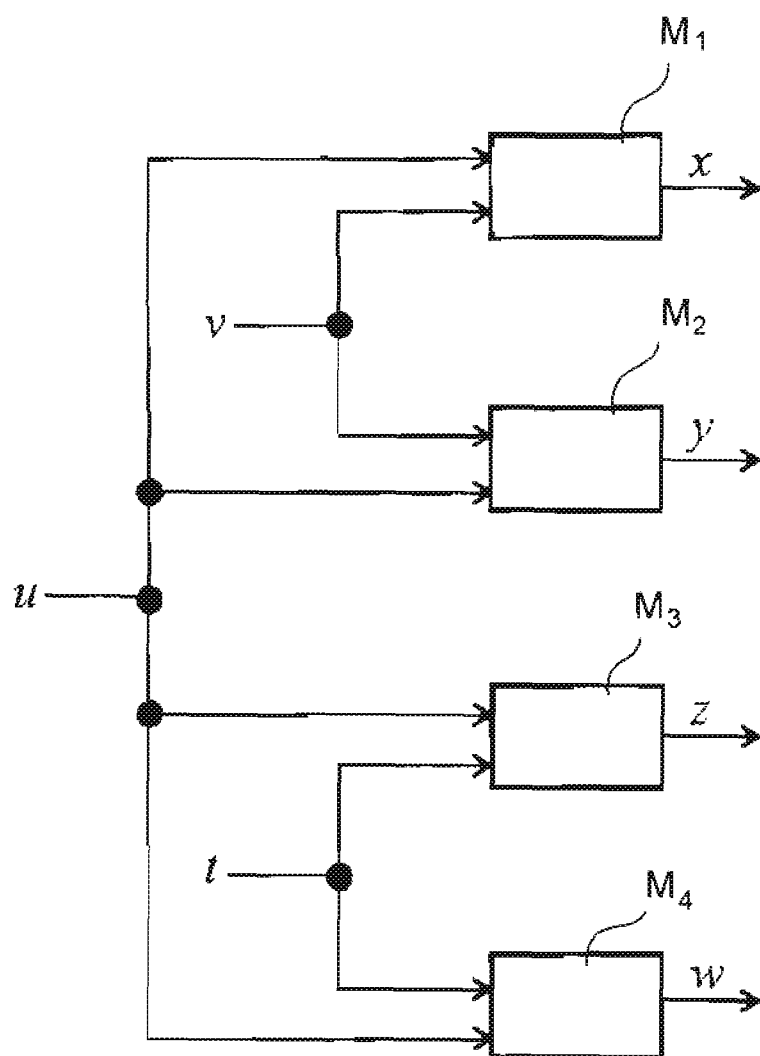


FIG.3

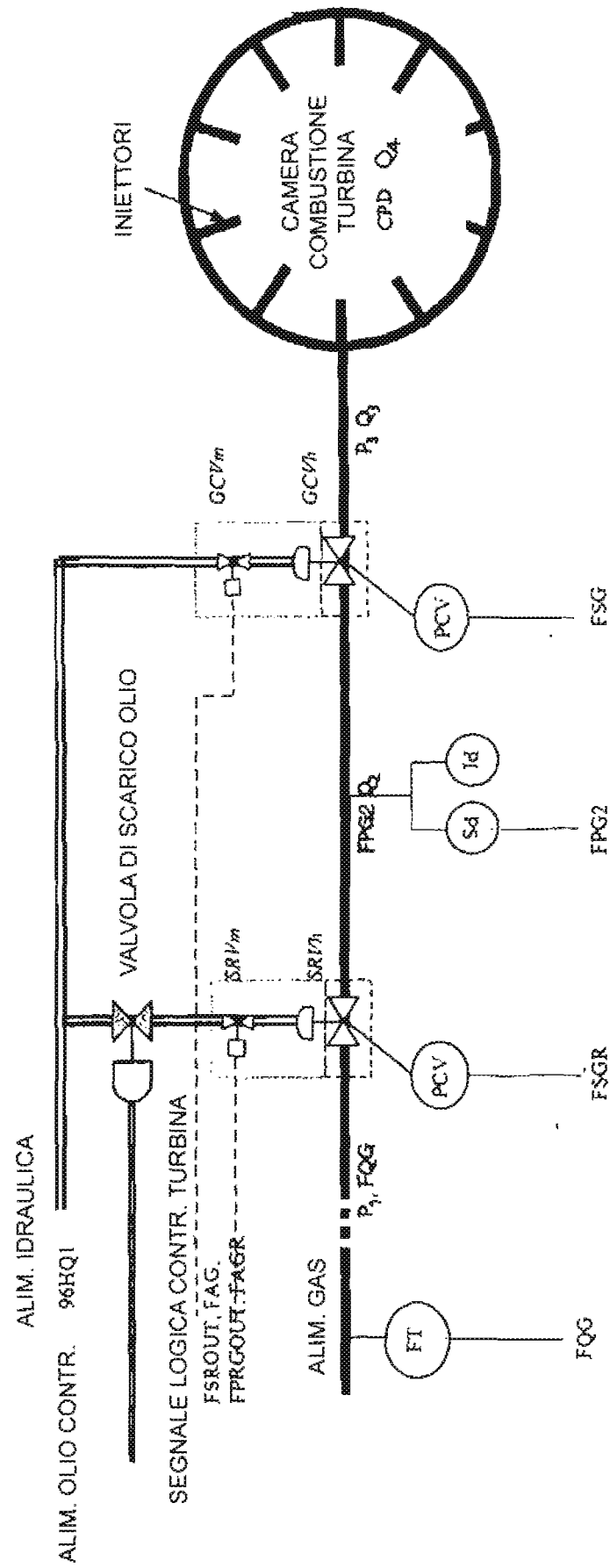


Fig. 4