

# ITALIAN PATENT OFFICE

Document No.

102010901816505A1

Publication Date

20110905

Applicant

FONDAZIONE ISTITUTO ITALIANO DI TECNOLOGIA

Title

PROCEDIMENTO PER LA DERIVAZIONE DI UN INSIEME MINIMO DI  
RELAZIONI DI RIDONDANZA ANALITICA PER LA DIAGNOSI DI SISTEMI

DESCRIZIONE dell'invenzione industriale dal titolo:

"Procedimento per la derivazione di un insieme minimo 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: 5 marzo 2010

\* \* \*

DESCRIZIONE

La presente invenzione riguarda in generale la diagnostica dei sistemi, ed in particolare la generazione di relazioni di ridondanza analitica impiegate nella diagnosi di sistemi basata su modelli.

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

Il funzionamento di un sistema - termine generico 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 o sonde spaziali) - è controllato tipicamente mediante sofisticati sistemi diagnostici in grado

di rilevare ed isolare condizioni anomale di funzionamento appena esse si manifestano. Nelle missioni spaziali guidate da terra, in orbita terrestre o nello spazio profondo, grande attenzione è dedicata alla diagnosi del sistema costituito dal velivolo e dai suoi apparati di bordo, ed in particolare alla rivelazione in tempo reale dei guasti al sistema, al fine di rimediare alle anomalie che potrebbero compromettere la missione.

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, ottenute tramite un insieme di sensori ad esso associati per rilevare eventuali discrepanze (incongruenze) e diagnosticarne le cause all'origine (guasti).

Negli ultimi decenni la ricerca nel campo della diagnosi di sistemi basata su un modello descrittivo della funzione dei componenti del sistema e della sua connettività (topologia) è stata condotta essenzialmente secondo due differenti discipline: una, l'approccio di rivelazione e di isolamento dei guasti (Fault Detection and Isolation, FDI), sfrutta la conoscenza completa del si-

stema ed è basata sulle teorie dei controlli automatici e decisioni statistiche; l'altra, nota come approccio DX, non necessita della completa conoscenza del sistema ed è basata su tecniche di intelligenza artificiale applicate ad un insieme di assunzioni sui modi di funzionamento del sistema nel suo complesso.

L'approccio FDI impiega nella sua applicazione le *relazioni di ridondanza analitica* (Analytical Redundancy Relations, ARR), note anche come residuo o equazione di parità, che rappresentano ciascuna una differente relazione tra parametri misurati del sistema. Ogni ARR non soddisfatta rappresenta una discrepanza tra il comportamento atteso del sistema e quello reale, e permette di distinguere un funzionamento anomalo del sistema, dovuto alla presenza di qualche guasto, rispetto alla normale attività. Se per un insieme di misure eseguite dai sensori del sistema una determinata ARR non è soddisfatta, allora almeno una delle componenti dell'insieme di supporto di quella ARR, ovvero le componenti coinvolte nella derivazione della ARR, è guasta.

Un modello di 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 una pluralità di sensori ad esso associati.

In figura 1 è mostrato l'esempio di un sistema a più porte, consistente di quattro moltiplicatori ( $M_1, M_2, M_3, M_4$ ) e tre sommatori ( $A_1, A_2, A_3$ ).

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

$$\begin{array}{ll}
 \text{PR}_1: x = a \cdot b; & M_1 \\
 \text{PR}_2: y = b \cdot c; & M_2 \\
 \text{PR}_3: z = c \cdot d; & M_3 \\
 \text{PR}_4: t = d \cdot e; & M_4
 \end{array}$$

$$\text{PR}_5: f = x + y; \quad A_1$$

$$\text{PR}_6: g = y + z; \quad A_2$$

$$\text{PR}_7: h = z + t; \quad A_3$$

La tecnica di diagnosi secondo l'approccio FDI si basa sui concetti di relazione di ridondanza analitica (ARR) e matrice di firma dei guasti (Fault Signature Matrix, FSM), che sono discussi brevemente nel seguito, per chiarezza e semplicità assumendo il caso di un singolo guasto al sistema.

L'insieme di variabili ( $V$ ) di un sistema, ad esempio il sistema di figura 1, può essere scomposto in un insieme di variabili incognite ( $X$ ) e un 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.

Il *supporto di una ARR* è il sottoinsieme di componenti coinvolti nella derivazione della ARR.

Per il sistema di figura 1, se i sensori sono disposti alle uscite  $f$ ,  $g$  ed  $h$ , e sono noti gli in-

gressi  $a, b, c, d, e$ , allora  $O = \{a, b, c, d, e, f, g, h\}$  e  $X = \{x, y, z, t\}$ .

Le ARR risultanti sono date nella tabella 1 seguente:

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

| <b>n.</b>        | <b>Relazione</b>        | <b>Componenti</b>                                                                  | <b>Sensori</b> |
|------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| ARR <sub>1</sub> | $f = a b + b c$         | M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> , A <sub>1</sub>                                   | $f$            |
| ARR <sub>2</sub> | $g = b c + c d$         | M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , A <sub>2</sub>                                   | $g$            |
| ARR <sub>3</sub> | $h = c d + d e$         | M <sub>3</sub> , M <sub>4</sub> , A <sub>3</sub>                                   | $h$            |
| ARR <sub>4</sub> | $f - g = a b - c d$     | M <sub>1</sub> , M <sub>3</sub> , A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub>                  | $f, g$         |
| ARR <sub>5</sub> | $g - h = b c - d e$     | M <sub>2</sub> , M <sub>4</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>3</sub>                  | $g, h$         |
| ARR <sub>6</sub> | $f - g + h = a b + d e$ | M <sub>1</sub> , M <sub>4</sub> , A <sub>1</sub> , A <sub>2</sub> , A <sub>3</sub> | $f, g, h$      |

Le ARR sono quindi utilizzate per verificare la consistenza delle osservazioni sul sistema rispetto al modello SM. In altre parole, le ARR sono soddisfatte se il comportamento del sistema osservato soddisfa i vincoli del modello, ossia produce osservazioni attese dal modello.

Nell'assunzione di un singolo guasto, ovvero 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.

Una *matrice di firma dei guasti* (FSM) è derivabile dalle ARR. Essa è definita come una matrice binaria le cui righe sono le ARR generate per il sistema in esame e le cui colonne identificano i componenti (i guasti) del sistema. Un elemento  $FSM_{ij}$  di questa matrice ha valore 1 se l'associato componente  $C_i$  del sistema è parte del supporto della relazione  $ARR_j$ , altrimenti  $FSM_{ij} = 0$ . La  $i$ -esima colonna corrispondente al componente  $C_i$  è definita come *vettore di firma del guasto* di  $C_i$  ed è denominata  $FSV_i = [FSV_{i1}, ..., FSV_{in}]^t$ .

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 il sistema di figura 1

| ARR              | $M_1$ | $M_2$ | $M_3$ | $M_4$ | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ARR <sub>1</sub> | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     |
| ARR <sub>2</sub> | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     |
| ARR <sub>3</sub> | 0     | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     |
| ARR <sub>4</sub> | 1     | 0     | 1     | 0     | 1     | 1     | 0     |
| ARR <sub>5</sub> | 0     | 1     | 0     | 1     | 0     | 1     | 1     |
| ARR <sub>6</sub> | 1     | 0     | 0     | 1     | 1     | 1     | 1     |

La diagnosi del sistema è quindi basata sulla

valutazione delle ARR, a partire da un insieme di ingressi ed osservazioni del sistema.

Le ARR sono istanziate con gli ingressi ed i valori osservati fornendo una *firma osservata*. Se una  $ARR_i$  è soddisfatta sulla base delle osservazioni, allora  $ARR_i = 0$ , altrimenti  $ARR_i = 1$ . 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 di figura 1 per un sottoinsieme di tutte le possibili osservazioni.

Tabella 3 - Diagnosi del sistema di figura 1 mediante ARR, per un sottoinsieme di possibili osservazioni.

| ARR      | Osservazioni  |                 |       |                 |                                       |                                                                                       |
|----------|---------------|-----------------|-------|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| $ARR_1$  | 0             | 1               | 1     | 0               | 1                                     | 1                                                                                     |
| $ARR_2$  | 0             | 0               | 1     | 0               | 1                                     | 0                                                                                     |
| $ARR_3$  | 0             | 0               | 0     | 1               | 1                                     | 1                                                                                     |
| $ARR_4$  | 0             | 1               | 0     | 0               | 0                                     | 1                                                                                     |
| $ARR_5$  | 0             | 0               | 1     | 1               | 1                                     | 1                                                                                     |
| $ARR_6$  | 0             | 1               | 0     | 1               | 1                                     | 1                                                                                     |
| diagnosi | Nessun guasto | $M_1 \circ A_1$ | $M_2$ | $M_4 \circ A_3$ | $\{M_2, M_4\}$<br>o<br>$\{M_2, A_3\}$ | $\{M_1, M_4\}$<br>o<br>$\{A_1, A_3\}$ ,<br>o<br>$\{M_1, A_3\}$<br>o<br>$\{M_4, A_1\}$ |

La diagnosi è formulata sulla base dei 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  $[1, 0, 0, 1, 0, 1]^t$  è equivalente alla firma di guasto dei componenti  $M_1$  ed  $A_1$ .

Si noti che ciò indica che, dipendentemente dai sensori del sistema, i guasti delle componenti  $M_1$  ed  $A_1$  non possono essere discriminati, così come nel caso di  $M_4$  ed  $A_3$ .

Il criterio di rivelazione ed isolamento (discriminazione dei guasti) può essere descritto in termini di FSM. Un dato componente  $C_i$  guasto può essere rivelato se il suo vettore di firma del guasto non è un vettore interamente nullo, ovvero almeno una ARR viene influenzata. 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. L'isolamento dei 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 siano identici e che quindi i relativi guasti non possano essere distinti.

Per il sistema di figura 1, come si evince dalla tabella 2, tutti i guasti possono essere rivelati ed i guasti di  $M_2$ ,  $M_3$  ed  $A_2$  possono essere isolati. Tuttavia, il guasto di  $M_1$  non può essere isolato dal guasto di  $A_1$  ed il guasto di  $M_4$  non può essere isolato dal guasto di  $A_3$ . Pertanto, gli insiemi di ambiguità per il sistema di figura 1 sono  $\{M_1, A_1\}$  e  $\{M_4, A_3\}$ .

Il caso di guasti multipli può essere trattato espandendo le colonne della matrice FSM di un singolo guasto. Il vettore FSV di firma di un guasto multiplo è ottenibile dai vettori  $FSV_k$  di firma dei singoli guasti occorsi simultaneamente eseguendo una operazione di OR logico tra elementi corrispondenti dei rispettivi vettori di firma  $FSV_k$ . In termini più rigorosi, se si definisce  $MFSV_k$  un guasto multiplo corrispondente alla simultanea occorrenza dei guasti ai componenti  $C_i, \dots, C_j$  gli elementi di  $MFSV_k$  sono  $MFSV_{kp} = 0$  se  $FSV_{ip} = \dots = FSV_{jp} = 0$ , altrimenti  $MFSV_{kp} = 1$ . Pertanto, in un sistema con  $n$  componenti, la considerazione di tutte le possibili combinazioni di guasti multipli porta a co-

struire una matrice FSM con  $2^n$  colonne.

La tabella 4 mostra la matrice di firma dei guasti del sistema di figura 1 con tutti i possibili doppi guasti. La combinazione delle tabelle 2 e 4 dà la matrice dei guasti per tutti i guasti singoli e doppi del sistema.

Tabella 4 - Matrice di firma dei guasti doppi per il sistema di figura 1.

| M <sub>1</sub> | M <sub>1</sub> | M <sub>1</sub> | M <sub>1</sub> | M <sub>1</sub> | M <sub>1</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>4</sub> | M <sub>4</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| M <sub>2</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | M <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | M <sub>4</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | A <sub>1</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | A <sub>2</sub> | A <sub>3</sub> | A <sub>3</sub> |
| 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 0              | 1              | 0              | 0              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1              | 0              |
| 1              | 1              | 0              | 0              | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 0              | 1              | 0              | 1              | 1              |
| 0              | 1              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1              | 1              | 0              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 0              | 1              | 1              |
| 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 0              | 1              | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              |
| 1              | 0              | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |
| 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 0              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              | 1              |

Si noti anche che in sede di diagnosi la valutazione delle ARR può determinare una firma osservata che non è contemplata nella matrice di firma dei guasti, ossia non è equivalente a nessun vettore di firma dei guasti. In questo caso la diagnosi può essere condotta determinando colonne multiple che collettivamente soddisfino la firma osservata, quindi risolvendo un relativo problema di determinazione dell'"hitting set", ossia dell'insieme minimo di componenti di cui almeno uno è contenuto in ciascuno degli insiemi di componenti di supporto

delle ARR non soddisfatte.

Per esempio, in tabella 3 la firma di osservazione di  $[1,1,1,0,1,1]^t$  non è contemplata nella matrice di firma dei guasti di tabella 2. In questo caso, almeno uno dei componenti degli insiemi di supporto delle ARR non soddisfatte è guasto. Le ARR non soddisfatte sono  $ARR_1$ ,  $ARR_2$ ,  $ARR_3$ ,  $ARR_5$ , e  $ARR_6$ . Gli insiemi di supporto di queste ARR sono rispettivamente  $\{A_1, M_1, M_2\}$ ,  $\{A_2, M_2, M_3\}$ ,  $\{A_3, M_3, M_4\}$ ,  $\{A_2, A_3, M_2, M_4\}$  e  $\{A_1, A_2, A_3, M_1, M_4\}$ . La diagnosi è quindi condotta calcolando l' hitting set di questi insiemi, che si ottiene essere  $\{M_2, M_4\}$  o  $\{M_2, A_3\}$ .

Ulteriore esempio con riferimento alla tabella 3 è la firma di osservazione di  $[1,0,1,1,1,1]^t$  che non è contemplata nella matrice di firma dei guasti riportata nella tabella 2. Le relazioni ARR non soddisfatte sono  $ARR_1$ ,  $ARR_3$ ,  $ARR_4$ ,  $ARR_5$ , e  $ARR_6$ . Gli insiemi di supporto di queste relazioni sono rispettivamente  $\{A_1, M_1, M_2\}$ ,  $\{A_3, M_3, M_4\}$ ,  $\{A_1, A_2, M_1, M_3\}$ ,  $\{A_2, A_3, M_2, M_4\}$  e  $\{A_1, A_2, A_3, M_1, M_4\}$ . La diagnosi è quindi condotta calcolando l' hitting set di questi insiemi, che si ottiene essere  $\{M_1, M_4\}$ , o  $\{A_1, A_3\}$ , o  $\{M_1, A_3\}$ , o  $\{M_4, A_1\}$ .

Sulla scorta della teoria che precede, un procedimento per la diagnosi di un sistema basata su

un modello del sistema e facente uso delle relazioni ARR può essere sintetizzato nelle fasi seguenti:

- Predisposizione: dato uno specifico modello del sistema e noti i sensori disposti per le osservazioni del sistema, si deriva l'insieme completo di ARR. Quindi, si costruisce la matrice di firma dei guasti (FSM) per ogni desiderato numero di guasti al fine di analizzare le proprietà di rivelazione ed isolamento del sistema e determinare i possibili insiemi di ambiguità;

- Diagnosi in tempo reale: questa fase è eseguita

- a) calcolando tutte le ARR per determinare le ARR non soddisfatte e costruire il vettore di osservazioni. Se il vettore di osservazioni corrisponde ad un vettore di firma dei guasti (FSV), la diagnosi è completa, altrimenti

- b) risolvendo un problema di determinazione di un hitting set tra gli insiemi di supporto delle ARR non soddisfatte, questo insieme minimo rappresentando, in definitiva, la diagnosi del sistema.

Benché le relazioni di ridondanza analitica rivestano 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, non è stata prestata grande attenzione a sviluppare 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 estesa facilmente ad un gran numero di sistemi o impianti di interesse.

Una questione fondamentale nell'applicazione delle relazioni ARR è relativa alla *completezza* dell'insieme di ARR.

Nella diagnosi basata su modelli, l'importanza e la criticità della completezza dell'insieme di ARR discende dal fatto che essa può significativamente influenzare le capacità di rivelazione e isolamento dei guasti del sistema. In altre parole, un predeterminato insieme di sensori predisposti in un sistema è teoricamente in grado di fornire un predefinito livello di rivelazione ed isolamento, ma questo livello può non essere realmente raggiunto a causa dell'incompletezza dell'insieme di ARR.

Gli inventori, in "A new efficient method for system structural analysis and generating analytical redundancy relations", *Proc. IEEE Aerospace Conference*, Marzo 2009, hanno discusso in dettaglio le tematiche correlate alla derivazione di un insieme completo di ARR, dimostrando che gli algoritmi non deterministici noti nella tecnica conducono al calcolo di insiemi incompleti di ARR, diversi in funzione dell'ordine in cui le variabili incognite sono selezionate per l'eliminazione. I più diffusi algoritmi per la derivazione di un insieme completo di ARR presentano complessità esponenziale, rendendo di fatto poco pratica la loro applicazione per sistemi di interesse. Viceversa, il procedimento descritto nell'articolo garantisce la derivazione efficiente dell'insieme completo e non ridondante di ARR la cui complessità è pari - nel caso peggiore - solo a  $O(L^4)$ , dove  $L$  è il numero di relazioni del sistema.

Un ulteriore aspetto meritevole di considerazione affrontato dagli inventori nell'articolo citato è l'efficienza e in definitiva la fattibilità della derivazione delle ARR, ovvero l'effettiva procedibilità nella derivazione e nel calcolo (valutazione) delle ARR in forma esplicita. Poiché una

ARR è per definizione ottenibile per combinazione di un insieme di relazioni primarie, tale combinazione può richiedere l'inversione delle funzioni rappresentative di una o più relazioni primarie, espresse in forma analitica. Di fatto, nei sistemi reali che si incontrano in applicazioni pratiche, le funzioni rappresentative della relazioni primarie di alcuni componenti non lineari non possono essere invertite in forma analitica, ma solo in forma numerica, il che rappresenta un ulteriore forte inconveniente che accresce gli oneri computazionali della procedura e ne limita l'applicazione pratica.

La tecnica descritta nel citato articolo 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. Questa osservazione conduce ad un nuovo apprezzamento e ad una nuova interpretazione del potere reale delle ARR. Infatti, il potere delle ARR risiede nella relazione logica che esse stabiliscono tra l'insieme di sensori coinvolti nella loro valutazione e l'insieme di componenti di sup-

porto. Per sfruttare il potere logico delle ARR, queste vengono utilizzate in forma implicita, senza alcuna necessità di derivarne la formula analitica, almeno in questa fase della procedura. In generale, 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.

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

Tale procedimento, 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 che comporta significativi oneri di calcolo, anche quando non sono presenti guasti nel sistema.

Infatti, secondo la tecnica nota, in un proce-

dimento di diagnosi basato sulle relazioni di ridondanza analitica deve essere valutato l'intero insieme di relazioni per ciascuna misura di ogni sensore del sistema, non essendo possibile determinare a priori un sottoinsieme di ARR che è sufficiente calcolare per rispondere alle necessità di diagnosi contingenti. Inoltre, il calcolo di ciascuna relazione potrebbe richiedere un numero notevole di operazioni di calcolo numerico per il motivo che per molti sistemi pratici di interesse l'insieme delle ARR può non essere ottenibile in forma analitica.

Per sistemi nei quali la tempestiva rivelazione dei componenti guasti è di primaria importanza, l'eccessiva complicazione computazionale è un ostacolo all'adozione di questa tecnica.

Per questo motivo, nella fase di diagnosi in tempo reale acquista estrema rilevanza il numero di relazioni di ridondanza analitica.

\*       \*       \*

Riassumendo, gli inconvenienti della tecnica nota di diagnosi basata sulla derivazione di relazioni di ridondanza analitica risiedono nella necessità di completezza dell'insieme di ARR, nella numerosità e complessità di derivazione delle ARR,

nella producibilità di una forma analitica delle ARR per il loro calcolo, nella complessità di calcolo delle ARR e nella complessità della soluzione di problemi di hitting set per la determinazione dell'insieme di potenziali componenti guasti.

Il procedimento di generazione di un insieme di relazione di ridondanza analitiche messo a punto dagli inventori e descritto in "A new efficient method for system structural analysis and generating analytical redundancy relations", *Proc. IEEE Aerospace Conference*, Marzo 2009, consente di ovviare ai primi tre inconvenienti, poiché insegna una modalità di derivazione un insieme completo di ARR in forma implicita allo stesso tempo efficiente e pratica, rendendo questa metodologia potenzialmente applicabile ad ogni sistema di interesse.

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

Più in particolare, la presente invenzione si prefigge lo scopo di fornire un procedimento efficiente dal punto di vista computazionale per la derivazione di un insieme minimo di relazioni di ridondanza analitica adeguato per la diagnosi tempe-

stiva di guasti critici ad un sistema il cui insieme completo di ARR presenti una elevata numerosità.

Secondo la presente invenzione tali scopi vengono raggiunti grazie ad un procedimento per la derivazione di un insieme 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 procedimento ed un sistema di diagnosi nonché un programma per elaboratore per l'attuazione dei suddetti procedimenti, come rivendicato.

La presente invenzione si fonda sul principio che per ogni sistema esiste un sottoinsieme di ARR che fornisce lo stesso grado di rivelazione e isolamento dei guasti dell'insieme completo di ARR, ovvero un sottoinsieme di ARR che determina una matrice di firma dei guasti FSM con la medesima capacità di rivelazione ed isolamento della matrice di firma dei guasti originale.

L'invenzione riguarda, in particolare, i sottoinsiemi minimi, ossia i sottoinsiemi con il mini-

mo numero di ARR.

Per meglio comprendere quanto si afferma, si consideri il sistema di figura 1 e la relativa matrice di firma dei guasti singoli riportata in tabella 2. Si consideri inoltre il sottoinsieme di relazioni di ridondanza analitica  $\{ARR_1, ARR_2, ARR_5\}$ .

La nuova ridotta matrice di firma dei guasti (FSM) derivata dal sottoinsieme di ARR è data in tabella 5.

Tabella 5 - Matrice di firma dei guasti per il sistema di figura 1, derivata da un insieme minimo di relazioni di ridondanza analitica

| ARR              | $M_1$ | $M_2$ | $M_3$ | $M_4$ | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ARR <sub>1</sub> | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     |
| ARR <sub>2</sub> | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     |
| ARR <sub>5</sub> | 0     | 1     | 0     | 1     | 0     | 1     | 1     |

Un'analisi della FSM di tabella 5 mostra che essa ha esattamente le medesime proprietà di rivelazione ed isolamento dei guasti della FSM di tabella 2. In altre parole, tutti i guasti al sistema possono essere rivelati, i guasti di  $M_2$ ,  $M_3$  ed  $A_2$  possono essere isolati, i guasti di  $M_1$  ed  $A_1$ , rispettivamente  $M_4$  ed  $A_3$ , non possono essere isolati.

Pertanto, è lecito affermare che il sistema di figura 1 può essere diagnosticato completamente calcolando soltanto un sottoinsieme di tre ARR in luogo dell'insieme completo di sei ARR.

Il sottoinsieme  $\{ARR_1, ARR_2, ARR_5\}$  è, di fatto, un insieme minimo di ARR per la diagnosi di un singolo guasto del sistema di figura 1.

Inoltre, si noti che il sottoinsieme minimo di ARR determinato non è unico, ma per il sistema di figura 1 esistono in realtà 16 sottoinsiemi minimi di ARR, rispettivamente:  $\{ARR_1, ARR_2, ARR_3\}$ ,  $\{ARR_1, ARR_2, ARR_5\}$ ,  $\{ARR_1, ARR_2, ARR_6\}$ ,  $\{ARR_1, ARR_3, ARR_4\}$ ,  $\{ARR_1, ARR_3, ARR_5\}$ ,  $\{ARR_1, ARR_3, ARR_6\}$ ,  $\{ARR_1, ARR_4, ARR_5\}$ ,  $\{ARR_1, ARR_4, ARR_6\}$ ,  $\{ARR_2, ARR_3, ARR_4\}$ ,  $\{ARR_2, ARR_3, ARR_6\}$ ,  $\{ARR_2, ARR_4, ARR_5\}$ ,  $\{ARR_2, ARR_4, ARR_6\}$ ,  $\{ARR_2, ARR_5, ARR_6\}$ ,  $\{ARR_3, ARR_4, ARR_5\}$ ,  $\{ARR_3, ARR_5, ARR_6\}$ , e  $\{ARR_4, ARR_5, ARR_6\}$ .

Si noti che i differenti insiemi minimi di ARR conducono a differenti matrici di firma dei guasti, tutte aventi le medesime proprietà di rivelazione ed isolamento dei guasti.

Ad esempio, in tabella 6 è riportata la FSM ricavata dall'insieme minimo di ARR comprendente le relazioni  $\{ARR_1, ARR_3, ARR_4\}$ .

Tabella 6 - Matrice di firma dei guasti per il sistema di figura 1, derivata da un differente insieme minimo di relazioni di ridondanza analitica

| ARR              | $M_1$ | $M_2$ | $M_3$ | $M_4$ | $A_1$ | $A_2$ | $A_3$ |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ARR <sub>1</sub> | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     | 0     | 0     |
| ARR <sub>3</sub> | 0     | 0     | 1     | 1     | 0     | 0     | 1     |
| ARR <sub>4</sub> | 1     | 0     | 1     | 0     | 1     | 1     | 0     |

Questa FSM è differente da quella di tabella 5, eppure ha esattamente le medesima proprietà di rivelazione ed isolamento dei guasti.

Al proposito, è importante notare che l'esistenza possibile di diversi insiemi minimi di ARR fornisce un ulteriore grado di libertà nella derivazione dell'insieme di ARR per la diagnosi di un sistema, che può essere sfruttato per ottenere una maggiore efficienza computazionale del procedimento di diagnosi. Infatti, per ogni sistema sotto esame, attraverso una attenta analisi di tutti i possibili insiemi minimi di ARR, si può preferire e selezionare l'insieme che richiede il minimo onere computazionale e/o che può essere calcolato con maggiore accuratezza, particolarmente nei casi in cui alcune componenti hanno funzioni non lineari.

E' altresì importante notare che un insieme minimo di ARR può essere definito per ogni matrice

FSM per guasti multipli, ovvero per ogni numero di guasti.

Per il sistema di figura 1, considerando tutti i possibili guasti doppi, l'insieme minimo di ARR è di dimensione 5. Di nuovo, esso non è unico, poiché esistono quattro insiemi minimi, rispettivamente  $\{ARR_1, ARR_2, ARR_3, ARR_4, ARR_5\}$ ,  $\{ARR_1, ARR_2, ARR_3, ARR_4, ARR_6\}$ ,  $\{ARR_1, ARR_2, ARR_3, ARR_5, ARR_6\}$ , e  $\{ARR_1, ARR_2, ARR_4, ARR_5, ARR_6\}$ .

La dimensione dell'insieme minimo aumenta con il numero di guasti considerati, e possono essere derivati un limite minimo ed un limite massimo sul numero di ARR richiesto per mantenere il grado di rivelazione ed isolamento dei guasti dell'insieme completo di ARR.

Per un sistema in grado di isolare  $m$  guasti (singoli o multipli) il numero di ARR minime è almeno pari a  $\log_2 m + 1$ . Infatti, si consideri un vettore di firma dei guasti come numero binario e le ARR come bit binari per la sua rappresentazione. Per rappresentare  $m$  vettori FSV distinti non nulli sono necessari almeno  $\log_2 m + 1$  bit, ovvero ARR.

Per un sistema in grado di isolare  $m$  guasti (singoli o multipli) il numero di ARR minime è al massimo  $m(m+1)/2$ . Infatti, sono necessarie al mas-

simo  $m$  ARR per evitare colonne non nulle, ed al massimo  $m(m-1)/2$  ARR per assicurare colonne distinte, ed il numero massimo di ARR è dato dal caso peggiore di somma di queste due numerosità.

Tuttavia, è dimostrabile che il limite superiore così definito è in pratica assai conservativo, dal momento che per molti sistemi, sia reali che sintetici, studiati dagli inventori nel caso di singolo guasto il numero di ARR minime è molto inferiore a  $m$ .

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 multi-porta analizzato nella parte introduttiva di questa descrizione;

le figure 2a e 2b rappresentano rispettivi schemi circuitali di circuiti combinatori a cui è stato applicato il procedimento oggetto dell'invenzione; e

la figura 3 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 nei termini generali e successivamente ne è dimostrata l'applicazione a due casi di studio e ad un sistema reale.

Il procedimento di individuazione degli insiemi minimi di relazioni di ridondanza analitica è un procedimento che realizza un algoritmo di ottimizzazione secondo la tecnica di branch-and-bound a partire da un insieme completo di relazioni di ridondanza analitica.

Il problema di individuazione delle ARR minime è formulato in termini di matrice di firma di un sistema come segue: data la matrice di firma  $H$  corrispondente ad un insieme completo di ARR, il problema è quello di individuare il numero minimo di righe di  $H$  cosicché la corrispondente sottomatrice presenti le medesime proprietà di rivelazione ed isolamento di  $H$ , ossia il medesimo numero di colonne non nulle (rivelazione) ed il medesimo numero di colonne distinte (isolamento).

In altre parole, a partire dalla matrice di firma originaria completa vengono eliminate quante più righe (ARR) possibili conservando le proprietà di rivelazione ed isolamento della matrice  $H$ .

Questo problema può essere formulato come problema di programmazione intera 0-1 o programmazione binaria, nella quale le variabili sono vincolate ad assumere valori binari.

Si consideri un matrice di firma  $H$  di dimensioni  $m \times n$ . sia  $M = H^T$  la trasposta di  $H$ . una formulazione equivalente del problema definito sopra è la seguente: selezionare un sottoinsieme minimo delle colonne di  $M$  tale che la sottomatrice definita da queste colonne abbia lo stesso numero di righe non nulle (proprietà di rivelazione) e lo stesso numero di righe distinte (proprietà di isolamento) per confronto con  $M$ .

Al proposito, si definisca un vettore binario di dimensione  $m$  come  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$  la cui dimensione corrisponda al numero di colonne della matrice  $M$  e per cui  $x_j = 0$  o  $1$ . Allora, il prodotto  $M \cdot \mathbf{x}$  è interpretabile come selezione di un sottoinsieme di colonne di  $M$  nel seguente modo:  $x_j=1$  se e solo se è selezionata la  $j$ -esima colonna di  $M$ .

Si definisca anche un vettore  $b$  di dimensione  $n$ ,  $b = [1, 1, \dots, 1]^T$ , ossia  $b$  è un vettore colonna di soli  $1$ . Allora, il vincolo

$$M \cdot \mathbf{x} \geq b$$

implica che la soluzione definita da  $\mathbf{x}$  ha la pro-

prietà che la corrispondente sottomatrice non possiede righe tutte nulle (e soddisfa quindi la condizione di rivelazione).

Per soddisfare la condizione di discriminazione si definisca una matrice  $M_2$  con  $n(n-1)/2$  righe e  $m$  colonne come segue: ciascuna riga  $R_{i,j}$  di  $M_2$  è associata ad una (distinta) coppia  $R_i$  e  $R_j$  di righe di  $M$ , e  $R_{i,j} = |R_i - R_j|$ , ovvero l'elemento  $k$ -esimo di  $R_{i,j}$  è uguale a 1 se gli elementi  $k$ -esimi di  $R_i$  e  $R_j$  sono distinti, altrimenti è uguale a 0. Allora il vincolo

$$M_2 \mathbf{x} \geq b$$

implica che la soluzione definita da  $\mathbf{x}$  ha la proprietà che tutte le righe della corrispondente sottomatrice  $M$  sono distinte.

Allora, considerando la matrice composta

$$\tilde{M} = \begin{pmatrix} M \\ M_2 \end{pmatrix},$$

il problema di ricerca del minimo insieme di ARR può essere formulato come il seguente problema di programmazione lineare intera binaria seguente:

$$\begin{aligned} & \text{minimize} && x_1 + \dots + x_m \\ & \text{subject to} && \tilde{M}\mathbf{x} \geq b \end{aligned}$$

La formulazione di programmazione riportata può facilmente essere estesa al caso in cui si con-

siderano differenti *pesi* associati alle ARR, i pesi riflettendo la complessità computazionale delle relative ARR, per cui le ARR più semplici sono associate a pesi minori. Infatti, molti sistemi reali comportano componenti con funzioni non lineari il cui calcolo si rivela più costoso e/o meno preciso rispetto a componenti descrivibili da funzioni più semplici. Per questi casi, una volta generato l'insieme completo di ARR una attenta analisi permette di identificare le relazioni il cui calcolo si rivela oneroso o meno preciso. La derivazione dell'insieme minimo di ARR che è più conveniente utilizzare può essere condotta assegnando un costo di calcolo e/o precisione a ciascuna relazione, riconducendo il problema alla derivazione dell'insieme minimo di ARR di costo minimo.

La soluzione di tale problema è l'insieme più semplice di ARR che fornisce il medesimo grado di rivelazione e isolamento. In questo caso, la funzione obiettivo è sostituita da

$$\text{minimize} \quad c_1x_1 + \dots + c_mx_m$$

dove  $c_j$  è il peso della  $j$ -esima ARR. Si noti che anche in questo caso la funzione obiettivo rimane una funzione lineare.

Nel seguito è riportato un algoritmo in pseu-

do-codice per la realizzazione del procedimento descritto.

### **Minimal-ARR ( $H$ )**

*/\*solves the minimal ARR problem defined by the signature matrix  $H$ \*/*

1.  $Labels = \{(\{\}, \{\})\}$
2.  $Solution = \mathbf{UpperBound}[\{\}, \{\}, H]$
3.  $Usen = \text{size of } Solution$
4. while  $Labels \neq \{\}$
5.     choose  $\lambda = (R_{in}, R_{out}) \in Labels$
6.      $Labels = Labels - \{\lambda\}$
7.     if  $\mathbf{Closure}[R_{in}] \cap R_{out} = \{\}$  then
8.          $upper = \mathbf{UpperBound}[\mathbf{Closure}[R_{in}], R_{out} \cup R_2, H]$
9.         if size of  $upper < Usen$  then
10.              $Usen = \text{size of } upper$
11.              $Solution = upper$
12.         end if
13.     end if
14.     if  $\mathbf{TestLeaf}[R_{in}, R_{out}, Usen, H] = \text{False}$  then
15.          $(\lambda_0, \lambda_1) = \mathbf{Split}[R_{in}, R_{out}, H]$
16.          $Labels = Labels \cup \{\lambda_0, \lambda_1\}$
17.     end if
18. end while
19. return  $Solution$

Le subroutines richiamate nell'algoritmo hanno le seguenti caratteristiche:

- Per una matrice di firma  $H$  e due insiemi  $R_1$  e  $R_2$  di righe di  $H$ , la procedura  $\mathbf{UpperBound}[R_1, R_2, H]$  ritorna un insieme di righe che rappresenta una soluzione del problema di riduzione dell'insieme completo di ARR assumendo che  $R_1$

- sia parte della soluzione e  $R_2$  non lo sia;
- Per un dato insieme  $R$  di righe della matrice di firma  $H$ , la procedura **Closure** $[R]$  ritorna l'insieme di tutte le righe di  $H$  che dipendono solo dalle ARR coinvolte in  $R$ ;
  - Per una matrice di firma  $H$ , una etichetta  $\lambda=(R_{in}, R_{out})$  e un numero  $U$  (che rappresenta il limite superiore corrente del numero di ARR), la procedura **TestLeaf** $[R_{in}, R_{out}, U, H]$  ritorna *True* se e solo se questa etichetta descrive una foglia dell'albero di ricerca dell'algoritmo branch-and-bound, altrimenti ritorna *False*;
  - Per una matrice di firma  $H$  e l'etichetta  $(R_{in}, R_{out})$ , la procedura **Split** $[R_{in}, R_{out}, H]$  ritorna una coppia di nuove etichette.

Un sistema di diagnosi di un sistema o 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 realiz-

zano 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.

##### ***Circuiti multi-porta combinatori***

Una verifica delle prestazioni del procedimento oggetto dell'invenzione è stata condotta a titolo esemplificativo sulle strutture circuitali rappresentate nelle figura 2a e 2b, che mostrano due schemi di circuiti combinatori includenti sommatore e moltiplicatori dalla connettività più complessa rispetto al sistema di figura 1.

In figura 2a è mostrato un sistema con 25 componenti in cui 5 sensori sono disposti in corrispondenza delle uscite  $z_2$ ,  $z_8$ ,  $z_9$ ,  $z_{10}$ ,  $z_{11}$ .

Il numero totale di ARR del sistema è 484. Applicando il procedimento oggetto dell'invenzione è possibile derivare un insieme minimo di ARR per la

diagnosi di guasti singoli del sistema avente numerosità pari a 6, ed un insieme minimo per la diagnosi di guasti doppi avente numerosità pari a 17.

In figura 2b è mostrato un sistema con 35 componenti in cui 6 sensori sono disposti in corrispondenza delle uscite  $x_{26}$ ,  $x_{28}$ ,  $x_{29}$ ,  $x_{33}$ ,  $x_{34}$ ,  $x_{35}$ . Il numero totale di ARR è 2056 e un insieme minimo di ARR per la diagnosi di singoli guasti derivato applicando il procedimento oggetto dell'invenzione contiene solo 9 ARR.

Si noti in generale che la numerosità dell'insieme minimo di ARR, ossia il numero di ARR minime, è di gran lunga inferiore al numero di guasti (componenti) del sistema.

L'analisi è stata condotta senza necessità della descrizione della funzione dei componenti del sistema. Una volta ottenuto l'insieme minimo di ARR le relazioni richieste possono essere valutate mediante verifica di consistenza attraverso la conoscenza delle relazioni primarie coinvolte, secondo la tecnica nota.

A questo punto, dopo aver determinato le ARR non soddisfatte si può formare un vettore di osservazione ed eseguire la diagnosi del sistema mediante la matrice FSM, secondo il tradizionale approc-

cio FDI o applicando l'algoritmo descritto da A. Fijany, A. Barrett, and F. Vatan, "A Novel Efficient Method for Conflict Sets generation for Model-based Diagnosis," Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Conf. on Space Mission Challenges for Information technology, Pasadena, CA, Luglio 2009.

### **Sistema di turbina a gas**

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

Si faccia riferimento alla rappresentazione schematica del sottosistema di alimentazione di gas 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 8.

Tabella 8 - 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 9.

Tabella 9 - Matrice strutturale del sistema di turbina

| variabili         | $Q2$ | $Q3$ | $Q4$ | $P3$ | $FPG2$ | $FQG$ | $FSG$ | $FSGR$ | $FAG$ | $FAGR$ |
|-------------------|------|------|------|------|--------|-------|-------|--------|-------|--------|
| 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 8 è collegata con determinati guasti del sistema.

E' stato applicato il procedimento per la derivazione delle relazioni di ridondanza analitica e della matrice FSM risultante, descritto in "A new efficient method for system structural analysis and generating analytical redundancy relations", *Proc. IEEE Aerospace Conference*, Marzo 2009.

Facendo uso della matrice strutturale di tabella 9 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. Nel seguito della discussione la numerazione delle ARR indica la posizione delle medesime nell'insieme completo di 551 relazioni.

Per l'analisi dei quattro sensori esistenti del sottosistema di alimentazione carburante è stato selezionato dall'insieme completo di 551 ARR il sottoinsieme di 26 ARR corrispondenti ai quattro sensori. La matrice di firma dei guasti (FSM) risultante da queste ARR è presentata in tabella 10.

Tabella 10 - Matrice di firma dei singoli guasti risultante dai 4 sensori del sistema di turbina a gas

| guasti<br>ARR      | GCVh | GCVm | Inj | SRVh | SRVm | TCpd | Tfqg | Tfsg | Tfsgr | Sensori           |
|--------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|-------|-------------------|
| ARR <sub>5</sub>   | 0    | 0    | 0   | 1    | 0    | 0    | 1    | 0    | 1     | {fpg2, fqg, fsgr} |
| ARR <sub>9</sub>   | 0    | 1    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0     | {fsg}             |
| ARR <sub>10</sub>  | 0    | 0    | 0   | 0    | 1    | 0    | 0    | 0    | 1     | {fsgr}            |
| ARR <sub>11</sub>  | 0    | 0    | 0   | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0     | {fpg2}            |
| ARR <sub>25</sub>  | 0    | 0    | 0   | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 1     | {fpg2, fqg}       |
| ARR <sub>26</sub>  | 0    | 0    | 0   | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 1     | {fqg, fsgr}       |
| ARR <sub>62</sub>  | 0    | 0    | 0   | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 1     | {fqg}             |
| ARR <sub>121</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 0     | {fpg2, fqg, fsg}  |
| ARR <sub>231</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 1     | {fqg, fsg, fsgr}  |
| ARR <sub>232</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 0     | {fpg2, fsg, fsgr} |
| ARR <sub>236</sub> | 1    | 1    | 1   | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 0     | {fpg2, fqg}       |
| ARR <sub>237</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fqg, fsg}        |
| ARR <sub>378</sub> | 1    | 1    | 1   | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 1     | {fqg, fsgr}       |
| ARR <sub>379</sub> | 1    | 1    | 1   | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 1     | {fpg2, fsgr}      |
| ARR <sub>380</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fpg2, fsg, fsgr} |
| ARR <sub>382</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fqg, fsg}        |
| ARR <sub>384</sub> | 1    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 0     | {fqg}             |
| ARR <sub>398</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fpg2, fsg}       |
| ARR <sub>399</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fsg, fsgr}       |
| ARR <sub>497</sub> | 1    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fpg2, fsgr}      |
| ARR <sub>501</sub> | 1    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fqg}             |
| ARR <sub>508</sub> | 1    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fpg2}            |
| ARR <sub>509</sub> | 1    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fsgr}            |
| ARR <sub>510</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fpg2, fsg}       |
| ARR <sub>511</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fsg}             |
| ARR <sub>550</sub> | 1    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fpg2}            |

Una attenta analisi della matrice FSM di Tabella 10 dimostra le capacità di rivelazione ed isolamento del sistema e conferma che tutti i guasti possono essere rivelati, ossia non esistono colonne di soli zeri, e che tutti i guasti possono essere

isolati, eccezion fatta per i guasti di GCVh (valvola di controllo del gas), Inj (pressione all'iniettore) e CPD (pressione al compressore). Per questi motivi i vettori di firma dei guasti FSV per questi tre guasti sono identici e quindi non possono essere distinti tra loro.

Il procedimento oggetto dell'invenzione è stato applicato per la determinazione degli insiemi minimi di ARR per la matrice di firma dei guasti di Tabella 10, ottenendo che esistono tre insiemi minimi di numerosità 4, ossia  $\{ARR_5, ARR_9, ARR_{11}, ARR_{121}\}$ ,  $\{ARR_5, ARR_9, ARR_{11}, ARR_{237}\}$ , e  $\{ARR_9, ARR_{11}, ARR_{25}, ARR_{121}\}$ . Le FSM corrispondenti a questi insiemi sono riportate rispettivamente nelle tabelle 11, 12 e 13.

Tabella 11 - Matrice di firma dei guasti relativa al primo insieme di ARR minime con 4 sensori

| guasti<br>ARR      | GCVh | GCVm | Inj | SRVh | SRVm | TCpd | Tfqg | Tfsg | Tfsgr | Sensori           |
|--------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|-------|-------------------|
| ARR <sub>5</sub>   | 0    | 0    | 0   | 1    | 0    | 0    | 1    | 0    | 1     | {fpg2, fqg, fsgr} |
| ARR <sub>9</sub>   | 0    | 1    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0     | {fsg}             |
| ARR <sub>11</sub>  | 0    | 0    | 0   | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0     | {fpg2}            |
| ARR <sub>121</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 0    | 1    | 1    | 1    | 0     | {fpg2, fqg, fsgr} |

Tabella 12 - Matrice di firma dei guasti relativa al secondo insieme di ARR minime con 4 sensori

| guasti<br>ARR      | GCVh | GCVm | Inj | SRVh | SRVm | TCpd | Tfqg | Tfsg | Tfsgr | Sensori          |
|--------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|-------|------------------|
| ARR <sub>5</sub>   | 0    | 0    | 0   | 1    | 0    | 0    | 1    | 0    | 1     | {fpg2, fqg, fsg} |
| ARR <sub>9</sub>   | 0    | 1    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0     | {fsg}            |
| ARR <sub>11</sub>  | 0    | 0    | 0   | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0     | {fpg2}           |
| ARR <sub>237</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1     | {fqg, fsg}       |

Tabella 13 - Matrice di firma dei guasti relativa al terzo insieme di ARR minime con 4 sensori

| guasti<br>ARR      | GCVh | GCVm | Inj | SRVh | SRVm | TCpd | Tfqg | Tfsg | Tfsgr | Sensori          |
|--------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|-------|------------------|
| ARR <sub>9</sub>   | 0    | 1    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0     | {fsg}            |
| ARR <sub>11</sub>  | 0    | 0    | 0   | 1    | 1    | 0    | 0    | 0    | 0     | {fpg2}           |
| ARR <sub>25</sub>  | 0    | 0    | 0   | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 1     | {fpg2, fqg}      |
| ARR <sub>121</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 0     | {fpg2, fqg, fsg} |

Una analisi delle FSM mostra che esse raggiungono il medesimo grado di rivelazione ed isolamento dei guasti della FSM di tabella 10. Pertanto, il sottosistema di alimentazione di carburante può essere interamente diagnosticato valutando solamente 4 ARR tra quelle date negli insiemi sopra presentati, in luogo delle 26 ARR richieste dalla tabella 10.

Nel caso di guasti doppi con 4 sensori esiste un unico insieme minimo di 5 ARR: {ARR<sub>5</sub>, ARR<sub>9</sub>, ARR<sub>10</sub>, ARR<sub>11</sub>, ARR<sub>121</sub>}.

E' ulteriormente possibile determinare l'in-

sieme ottimale di sensori, ossia l'insieme minimo di sensori tra tutti i possibili sensori, che raggiunge il maggior grado di rivelazione e isolamento dei guasti per il sistema. Nel caso in esempio questo insieme è l'insieme di tre sensori {FSGR, FSG, Q3 (o P3)}. Pertanto, dall'insieme di 551 ARR è possibile selezionare l'insieme di 21 ARR corrispondenti all'insieme di sensori ottimale. La matrice di firma dei guasti per questo insieme di sensori è presentata in tabella 14 e, per confronto con la tabella 10, è facile dimostrare che l'insieme di sensori ottimale raggiunge lo stesso grado di rivelazione ed isolamento dei guasti del precedente insieme di quattro sensori.

Tabella 14 - Matrice di firma dei guasti con l'insieme ottimale di 3 sensori FQG, FSG, Q3

| ARR                | guasti | GCVh | GCVm | Inj | SRVh | SRVm | TCpd | Tfqg | Tfsg | Tfsg | Sensori        |
|--------------------|--------|------|------|-----|------|------|------|------|------|------|----------------|
| ARR <sub>9</sub>   | 0      | 1    | 0    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0    | {fsg}          |
| ARR <sub>22</sub>  | 1      | 0    | 0    | 1   | 0    | 0    | 0    | 1    | 0    | 0    | {fqg, q3}      |
| ARR <sub>62</sub>  | 0      | 0    | 0    | 1   | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 1    | {fqg}          |
| ARR <sub>74</sub>  | 1      | 0    | 1    | 1   | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 0    | {fsg, q3}      |
| ARR <sub>82</sub>  | 1      | 0    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 0    | {fsg, fqg, q3} |
| ARR <sub>150</sub> | 1      | 0    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | {fsg, fqg, q3} |
| ARR <sub>161</sub> | 1      | 1    | 1    | 1   | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 0    | {q3}           |
| ARR <sub>168</sub> | 1      | 0    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | {fsg, fqg, q3} |
| ARR <sub>172</sub> | 1      | 1    | 1    | 1   | 1    | 1    | 1    | 1    | 1    | 0    | {fqg, q3}      |
| ARR <sub>226</sub> | 1      | 0    | 0    | 1   | 1    | 0    | 1    | 0    | 1    | 1    | {q3}           |

|                    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |            |
|--------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|------------|
| ARR <sub>237</sub> | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | {fsg, fqg} |
| ARR <sub>272</sub> | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | {fsg, q3}  |
| ARR <sub>286</sub> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | {fqg, q3}  |
| ARR <sub>301</sub> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | {fqg, q3}  |
| ARR <sub>309</sub> | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | {fsg, q3}  |
| ARR <sub>382</sub> | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | {fsg, fqg} |
| ARR <sub>384</sub> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | {fqg}      |
| ARR <sub>418</sub> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | {q3}       |
| ARR <sub>435</sub> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | {q3}       |
| ARR <sub>501</sub> | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | {fqg}      |
| ARR <sub>511</sub> | 1 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | {fsg}      |

Applicando il procedimento oggetto dell'invenzione per la derivazione di un insieme minimo di ARR per la FSM di Tabella 14 si ottiene un insieme di numerosità 4 dato da {ARR<sub>9</sub>, ARR<sub>22</sub>, ARR<sub>62</sub>, ARR<sub>74</sub>}. La FSM risultante da questo insieme minimo è mostrata in Tabella 15 e fornisce il medesimo grado di rivelazione ed isolamento dei guasti delle FSM di tabella 10 e tabella 14.

Tabella 15 - Matrice di firma dei guasti relativa all'insieme di ARR minime con l'insieme ottimale di 3 sensori FQG, FSG, Q3

| ARR guasti        | GCVh | GCVm | Inj | SRVh | SRVm | TCpd | Tfqg | Tfsg | Tfsgr | Sensori   |
|-------------------|------|------|-----|------|------|------|------|------|-------|-----------|
| ARR <sub>9</sub>  | 0    | 1    | 0   | 0    | 0    | 0    | 0    | 1    | 0     | {fsg}     |
| ARR <sub>22</sub> | 1    | 0    | 0   | 1    | 0    | 0    | 1    | 0    | 0     | {fqg, q3} |
| ARR <sub>62</sub> | 0    | 0    | 0   | 1    | 1    | 0    | 1    | 0    | 1     | {fqg}     |
| ARR <sub>74</sub> | 1    | 0    | 1   | 1    | 1    | 1    | 0    | 1    | 0     | {fsg, q3} |

Infine, nel caso di guasti doppi, si dimostra che esiste un unico insieme minimo di 4 ARR, che è il medesimo del caso per singoli guasti, ovvero  $\{ARR_9, ARR_{22}, ARR_{62}, ARR_{74}\}$ .

## **CONCLUSIONI**

Il procedimento di derivazione di un insieme minimo di relazioni di ridondanza analitica oggetto dell'invenzione consente vantaggiosamente una diagnosi di sistema molto più rapida a partire da un insieme completo di relazioni e dalla risultante matrice di firma dei guasti per un qualsiasi numero di guasti, dal momento che l'insieme minimo di relazioni così costruito presenta lo stesso grado di rivelazione e isolamento dell'insieme completo.

Vantaggiosamente, il procedimento oggetto dell'invenzione permette di derivare l'insieme minimo (o gli insiemi minimi) di ARR senza necessità di eseguire una ricerca esaustiva tra tutti gli insiemi possibili, che risulterebbe un approccio impraticabile a causa del fatto che molti sistemi di interesse pratico, anche di dimensioni contenute, possono comportare un elevato numero di ARR.

Convenientemente, il procedimento si basa sulla formulazione di un problema di programmazione lineare intera binaria e la corrispondente attua-

zione di un procedimento di ottimizzazione secondo una tecnica di branch-and-bound.

Un perfezionamento del procedimento descritto permette di selezionare uno di una pluralità di insiemi minimi possibili di ARR in funzione della complessità di calcolo per la valutazione delle ARR implicate, particolarmente rilevante nel caso di relazioni non lineari, risultando in una più efficiente conduzione della fase di diagnosi del sistema in tempo reale, in termini di rapidità di esecuzione e affidabilità dei risultati.

Un ulteriore apprezzamento della efficienza del procedimento discende dalla considerazione che, per sistemi complessi descrivibili da un insieme completo di ARR di grande dimensioni, l'insieme minimo di ARR avente il medesimo grado di rivelazione ed isolamento dei guasti presenta una numerosità notevolmente minore, dell'ordine di diversi ordini di grandezza.

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 prote-

zione dell'invenzione definita dalle rivendicazioni  
allegate.

1. Procedimento attuabile per mezzo di un elaboratore per la derivazione 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 rappresentativa delle relazioni logiche tra un sottoinsieme di variabili osservabili del sistema ed un corrispondente sottoinsieme di componenti di supporto del sistema,

caratterizzato dal fatto che comprende:

a) la generazione di un insieme completo di relazioni di ridondanza analitica in forma implicita per il sistema;

b) la determinazione di una matrice di firma dei guasti binaria originaria ( $H$ ) associata a detto insieme completo di relazioni di ridondanza anali-

tica, di dimensioni  $m \times n$ ,  $m$  essendo la numerosità dell'insieme completo di relazioni di ridondanza analitica ed  $n$  la numerosità dei componenti del sistema;

c) la determinazione di almeno una sottomatrice di detta matrice di firma originaria ( $H$ ), avente un sottoinsieme minimo di righe della matrice originaria ( $H$ ) per cui detta sottomatrice possiede il medesimo numero di colonne non nulle ed il medesimo numero di colonne distinte della matrice originaria ( $H$ ); e

d) la derivazione di un sottoinsieme di relazioni di ridondanza analitica di detto insieme completo, comprendente le relazioni associate alle righe della sottomatrice di firma determinata al punto (c).

2. Procedimento secondo la rivendicazione 1, in cui la determinazione di almeno una sottomatrice della matrice di firma originaria ( $H$ ) include le operazioni di:

- determinare una prima matrice ( $M$ ) trasposta della matrice di firma originaria ( $H$ ), con  $n$  righe ed  $m$  colonne;

- determinare una seconda matrice ( $M_2$ ) con  $n(n-1)/2$  righe e  $m$  colonne, in cui ciascuna riga è

associata ad una distinta coppia di righe della prima matrice  $(M)$ , e ogni elemento di ciascuna riga è uguale a 1 se gli elementi corrispondenti della associata coppia di righe della prima matrice  $(M)$  sono distinti, ed a 0 altrimenti; e

- determinare la minima combinazione lineare

$$x_1 + \dots + x_m$$

rispettando i vincoli

$$M \cdot \mathbf{x} \geq b \quad \text{e} \quad M_2 \mathbf{x} \geq b$$

dove  $x_1, \dots, x_m$  sono elementi di un vettore binario  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$  la cui dimensione corrisponde al numero di righe della matrice di firma originaria  $(H)$  e  $b = [1, 1, \dots, 1]^T$ ,  $b$  essendo un vettore di dimensione corrispondente al numero di colonne della matrice di firma originaria  $(H)$ ;

la sottomatrice della matrice di firma originaria  $(H)$  essendo determinabile per trasposizione della matrice  $(M \cdot \mathbf{x})$  di prodotto tra la prima matrice  $(M)$  ed il vettore binario  $(\mathbf{x})$ .

3. Procedimento secondo la rivendicazione 2, in cui la determinazione di almeno una sottomatrice della matrice di firma originaria  $(H)$  include la soluzione del problema di determinazione della minima combinazione lineare

$$c_1x_1 + \dots + c_mx_m$$

rispettando i vincoli

$$M \cdot \mathbf{x} \geq b \quad \text{e} \quad M_2 \mathbf{x} \geq b$$

dove  $c_j$  è il peso associato alla  $j$ -esima relazione di ridondanza analitica,

detti pesi essendo indicativi del costo computazionale e/o della precisione di calcolo numerico della associata relazione.

4. Procedimento secondo una qualsiasi delle rivendicazioni precedenti, in cui detta matrice di firma binaria associata all'insieme completo di relazioni di ridondanza analitica include vettori di firma di guasti singoli associati a singoli componenti del sistema e vettori di firma di guasti multipli associati a combinazioni di componenti del sistema.

5. Procedimento secondo la rivendicazione 4, in cui la dimensione dell'insieme minimo di relazioni di ridondanza analitica atto a mantenere il grado di rivelazione ed isolamento dei guasti dell'insieme completo di relazioni di ridondanza analitica del sistema è almeno pari a  $\log_2 m + 1$  per un sistema in grado di isolare  $m$  guasti singoli o multipli.

6. Procedimento secondo la rivendicazione 4, in cui la dimensione dell'insieme minimo di relazioni

di ridondanza analitica atto a mantenere il grado di rivelazione ed isolamento dei guasti dell'insieme completo di relazioni di ridondanza analitica del sistema è al massimo  $m(m+1)/2$  per un sistema in grado di isolare  $m$  guasti singoli o multipli.

7. Procedimento per la diagnosi di un sistema al quale è associata una pluralità di sensori per l'osservazione di variabili indicative di condizioni di funzionamento, basata su un modello del sistema rappresentativo della configurazione di componenti del sistema ed includente un insieme di relazioni primarie tra ingressi ed uscite di ciascuna componente, indicative della relativa funzione operativa, includente:

- la simulazione del sistema sulla base del modello; e

- la rivelazione di guasti al sistema per confronto tra i valori attesi dalla simulazione ed i valori osservati delle variabili di osservazione del sistema

caratterizzato dal fatto che comprende:

in via preliminare,

- la generazione di un insieme minimo di relazioni di ridondanza analitica rappresentative del sistema sulla base del modello di sistema e dei

sensori di osservazione; e

- la determinazione di una matrice di firma dei guasti associata a detto insieme di relazioni, includente una pluralità di vettori di firma di guasti, rappresentativa delle proprietà di rivelazione ed isolamento dei guasti di un predeterminato numero di componenti del sistema, secondo il procedimento di una qualsiasi delle rivendicazioni 1 a 6; e

in tempo reale

- il calcolo delle suddette relazioni di ridondanza analitica a partire dagli ingressi del sistema per la determinazione dei valori attesi;

- il confronto delle relazioni calcolate con i corrispondenti valori osservati, per la determinazione di una firma osservata del sistema indicativa delle relazioni di ridondanza analitica non soddisfatte; e

- il confronto di detta firma osservata con detti vettori di firma dei guasti.

8. Sistema di diagnosi, 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 e/o un procedimento di diagno-

si secondo la rivendicazione 7.

9. 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 e/o un procedimento di diagnosi secondo la rivendicazione 7.

## CLAIMS

I0139434

1. A computer-implemented method for generating a set of Analytical Redundancy Relations representing a system with which a plurality of sensors is associated for the observation of variables indicative of operating conditions and adapted to enable detection and isolation of faults,

the system being describable by a model based on the arrangement of components of said system, including a set of Primary Relations between inputs and outputs of each component, indicative of its operating function,

wherein each Analytical Redundancy Relation represents the logical relations between a subset of observable variables of the system and a corresponding subset of support components of the system,

characterized in that said method includes:

a) the generation of a complete set of Analytical Redundancy Relations for the system, in implicit form;

b) the determination of an original binary Fault Signature Matrix ( $H$ ) associated with said complete set of Analytical Redundancy Relations having size  $m \times n$  where  $m$  is the power of the complete set of Analytical Redundancy Relations and  $n$

is the number of the system components;

c) the determination of at least one submatrix of said original signature matrix  $(H)$ , having a minimal subset of rows of the original matrix  $(H)$  such that said submatrix has the same number of non-zero columns and the same number of distinct columns as the original matrix  $(H)$ ; and

d) the generation of a subset of Analytical Redundancy Relations of said complete set, including the Analytical Redundancy Relations associated to the rows of the signature submatrix determined in step (c).

2. Method according to Claim 1, wherein the determination of at least one submatrix of the original signature matrix  $(H)$  includes the operations of:

- determining a first matrix  $(M)$  transposed of the original signature matrix  $(H)$ , having  $n$  rows and  $m$  columns;

- determining a second matrix  $(M_2)$  having  $n(n-1)/2$  rows and  $m$  columns, wherein each row is associated to a distinct pair of rows of the first matrix  $(M)$ , and each element of each row is equal to 1 if the corresponding elements of the associated pair of rows of the first matrix  $(M)$  are distinct,

and is equal to 0 otherwise; and

- determining the minimal linear combination

$$x_1 + \dots + x_m$$

complying with the constraints

$$M \cdot \mathbf{x} \geq b \quad \text{and} \quad M_2 \cdot \mathbf{x} \geq b$$

where  $x_1, \dots, x_m$  are components of a binary vector  $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$  whose dimension corresponds to the number of rows of the original signature matrix ( $H$ ) and  $b = [1, 1, \dots, 1]^T$ ,  $b$  being a vector whose dimension corresponds to the number of columns of the original signature matrix ( $H$ );

the submatrix of the original signature matrix ( $H$ ) being determinable by transposing the matrix ( $M \cdot \mathbf{x}$ ) which is the product of the first matrix ( $M$ ) with the binary vector ( $\mathbf{x}$ ).

3. Method according to Claim 2, wherein the determination of at least one submatrix of the original signature matrix ( $H$ ) includes the solution of the problem of determining the minimal linear combination

$$c_1 x_1 + \dots + c_m x_m$$

complying with the constraints

$$M \cdot \mathbf{x} \geq b \quad \text{and} \quad M_2 \cdot \mathbf{x} \geq b$$

where  $c_j$  is the weight associated to the  $j$ -th Analytical Redundancy Relations,

said weights being representative of the computational cost and/or of the precision of the numerical computation of the associated relation.

4. Method according to any of the preceding claims, wherein said binary signature matrix associated with the complete set of Analytical Redundancy Relations includes single-fault signature vectors associated with single components of the system and multiple-fault signature vectors associated with combinations of system components.

5. Method according to Claim 4, wherein the dimension of the minimal set of Analytical Redundancy Relations adapted to provide the same degree of fault detection and isolation as the complete set of the system Analytical Redundancy Relations is at least equal to  $\log_2 m + 1$ , for a system able to isolate  $m$  single or multiple faults.

6. Method according to Claim 4, wherein the dimension of the minimal set of Analytical Redundancy Relations suitable to provide the same degree of fault detection and isolation as the complete set of the system Analytical Redundancy Relations is at most  $m(m+1)/2$  for a system able to isolate  $m$  single or multiple faults.

7. Method for the diagnosis of a system with

which a plurality of sensors is associated for the submission of variables indicative of operating conditions, said diagnosis being based on a system model representing the arrangement of the system components and including a set of primary relations between inputs and outputs of each component, representing the corresponding component operating function, said method including:

- the model-based system simulation; and
- the detection of system faults by comparing the values expected from the simulation and the observed values of the observation variables of the system,

the method being characterized in that it includes:

as a preliminary step,

- the generation of a minimal set of Analytical Redundancy Relations describing the system on the basis of the system model and of the observation sensors; and

- the determination of a fault signature matrix associated to said set of relations, including a plurality of fault signature vectors, said matrix representing the fault detection and isolation properties of a predetermined number of system com-

ponents, according to the method described in any of the claims from 1 to 6; and

in real time,

- the computation of said Analytical Redundancy Relations from the system inputs to determine the expected values;

- the comparison of the computed Analytical Redundancy Relations with the corresponding observed values to determine an observed system signature representing the unsatisfied Analytical Redundancy Relations; and

- the comparison of said observed signature with said fault signature vectors.

8. Diagnostic system, including a processing system arranged for carrying out a method for generating a set of Analytical Redundancy Relations according to any of the claims from 1 to 6 and/or a diagnosis method according to Claim 7.

9. Computer program or set of programs, executable by a processing system, including one or more code modules for implementing a method for generating a set of Analytical Redundancy Relations according to any of the claims from 1 to 6, and/or a diagnosis method according to Claim 7.

FIG. 1

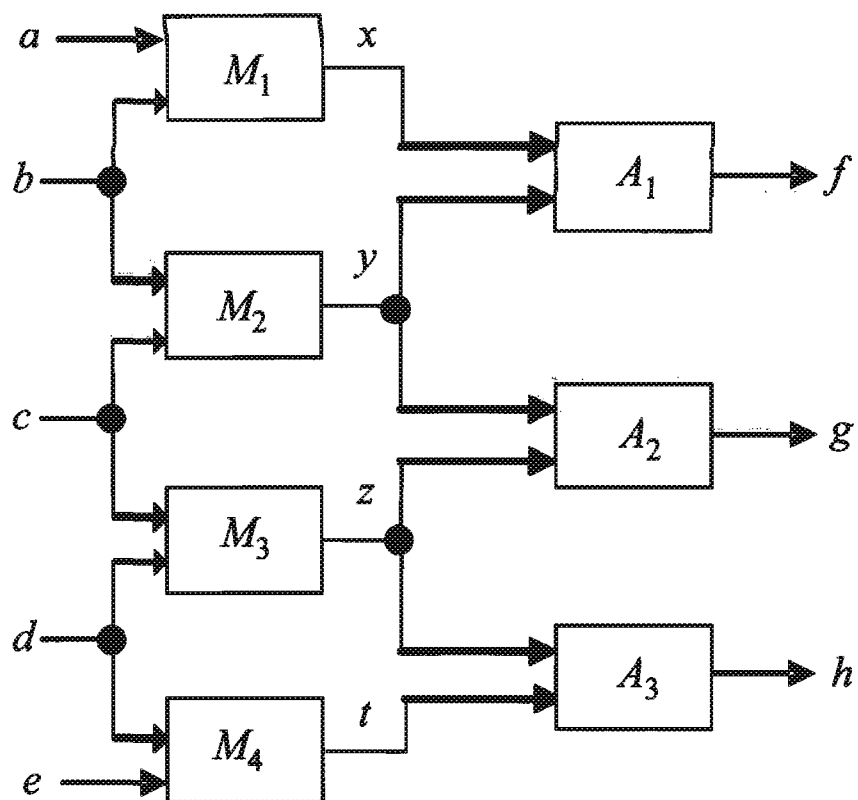


FIG 2a

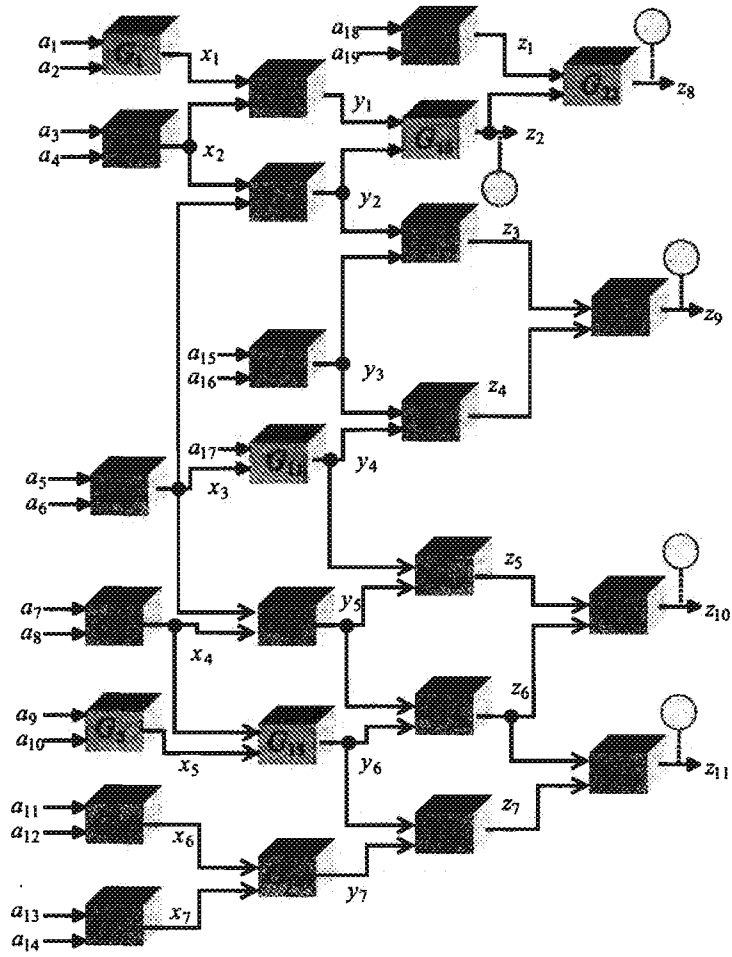


FIG 2b

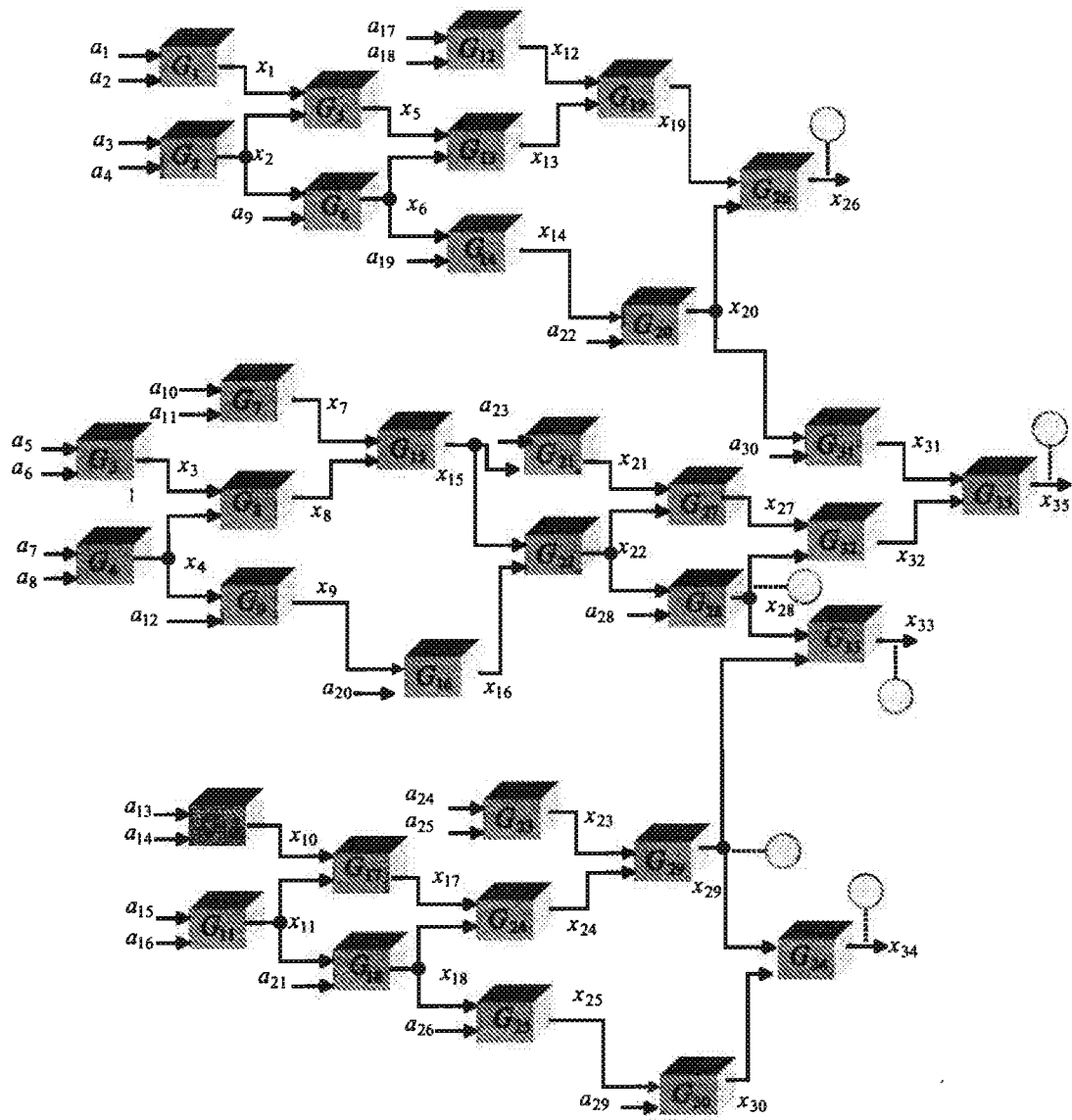


FIG 3

