Différentes méthodes d'analyse structurelle pour le diagnostic

BENABBASSI Youssef*, HAFFAF Hafid** CIT 2007.
*Centre Universitaire de Bechar
**Université d'Oran
E-mail : Youssefbena@yahoo.fr
Haffaf_hafid@yahoo.fr

Abstract- **The diagnostic task consists in detecting system's anomalies then in attempting to explain those errors by indicating the components that can be faulty. For this, the modelbased diagnostic uses a description of the system's behavior. The error is detected when the model data and the system data are inconsistent. Further to the error's detection, a set of explanations is generated. The diagnosis can, then, continue by identifying the relevant diagnoses. This report presents an algorithm for finding a small set of submodels that can be used to derive consistency relations with highest possible diagnosis capability. An important step towards finding these submodels, and therefore also towards finding consistency relations, is to find all minimal structurally singular (MSS) sets of equations.**

The analysis structural approach is a powerful tool which ensures the task of the detection and isolation of faults (FDI).

Keywords: **Fault diagnosis, Structural analysis, Graph theory**.

I. Introduction

Dans les systèmes complexes ayant un grand nombre de capteurs (sensors), les informations obtenues à partir des divers paramètres et signaux, doivent être contrôlés dans le but de la détection des fautes. Ceci est devenu une tâche rigoureuse avec l'accroissement du nombre des sous-systèmes (acteurs-capteurs).

L'approche structurelle constitue un plan de travail général pour fournir des informations quand le système devient complexe.

L'objectif principal de l'application de l'approche structurelle est d'identifier les sous-systèmes qui présentent de la redondance.

II. NOTIONS DE BASE SUR L'APPROCHE STRUCTURELLE

A. *Modèle Structurel*

On considère le système S comme un ensemble de composants $U^m_{i=1}c_i$, chaque sous composant est défini par une ou plusieurs relations f_i qui sont appliquées sur un ensemble de variables z_j j=1,…,n. Ces relations sont définies comme suit :

$$f_i(z_1,\ldots,z_p)=0 \text{ avec } 1<=p<=n. \quad (1)$$

Le modèle structurel du système est représenté par l'ensemble des relations F={ f_1, f_2,…, f_m } et l'ensemble de variables Z= K u X , telle que Z représente l'union entre l'ensemble des variables connues noté K, et l'ensemble des variables inconnues noté X ; Z={ z_1, z_2,…, z_n }.

La fonction fi peut représenter tous types de relations (dynamique, statique, linéaire, ou non linéaire,…).
Ces relations sont aussi appelées contraintes, telle que la valeur d'une variable impliquée ne peut changer indépendamment des autres variables de l'équation.
K= u U y est l'ensemble des variables connues, comme exemple :des inputs/signal de référence(u) et un signal mesuré (y).

L'ensemble des contraintes f représente l'union entre les deux ensembles de contraintes f_k et f_x telles que f_k est l'ensemble des contraintes qui sont appliquées uniquement aux variables connues et f_x=f\ f_k est l'ensemble des contraintes qui sont appliquées à au moins une variable inconnue.

B. *Représentation du modèle structurel*

Le modèle structurel du système est représenté par l'ensemble des relations F={ f_1, f_2,…, f_m } et l'ensemble de variables Z= K u X , telle que Z représente l'union entre l'ensemble des variables connues noté K, et l'ensemble des variables inconnues noté X ; Z={ z_1, z_2,…, z_n }.

La fonction fi peut représenter tous types de relations (dynamique, statique, linéaire, ou non linéaire,…).

Ces relations sont aussi appelées contraintes, telle que la valeur d'une variable impliquée ne peut changer indépendamment des autres variables de l'équation.

K= u U y est l'ensemble des variables connues, comme exemple :des inputs/signal de référence(u) et un signal mesuré (y).

L'ensemble des contraintes f représente l'union entre les deux ensembles de contraintes f_k et f_x telles que f_k est l'ensemble des contraintes qui sont appliquées uniquement aux variables connues et f_x=f\ f_k est l'ensemble des contraintes qui sont appliquées à au moins une variable inconnue.

B. *Représentation du modèle structurel*

Le modèle structurel du système peut être représenté par un graphe biparti G(F,Z,A), où les éléments de l'ensemble des arcs A c FxZ, sont définis comme suit :

Pour tout x Є X et k Є K on a :
$a_{ij}=(f_i,x_j)=1$ si et seulement si f_i est appliquée à x_j ;
$a^*_{ij}=(x_i,f_j)=1$ si et seulement si x_i est calculée à partir de f_j ;
$Kfi=(K_i,f_j)=1$ si et seulement si f_j est appliquée à une variable connue ;
Autrement c'est égal à zéro.

Pour spécifier les éléments de l'ensemble A d'une manière largement utilisée, une propriété additionnelle dite propriété de calculabilité est introduite. Elle est nécessairement tenue en considération.

C. *Définition de la calculabilité*

Soient z_j, j=1,…,p,…,n sont des variables reliées à travers la contrainte f_i, comme exemple : $f_i(z_1,\dots, z_n)=0$. La variable z_p est calculable si ses valeurs peuvent être déterminées à travers la contrainte f_i, sous la condition que les valeurs des autres variables z_j ,j=1,…,n avec j≠p , sont connues.

D. *Matrice d'incidence*

Le graphe structurel est représenté par une matrice d'incidence dont les rangs représentent les contraintes et les colonnes représentent l'ensemble des variables. Un arc (C_i,Z_j) est représenté par « 1 » dans l'intersection entre la ligne « i » et la colonne « j ».

La matrice d'incidence I_{md} correspond à la forme compactée suivante :

TABLE I
LA MATRICE D'INCIDENCE

$$I_{md} = \begin{array}{cc} & \begin{array}{ccc} K & Fk & X \end{array} \\ \begin{array}{c} K \\ \\ X \end{array} & \left[\begin{array}{ccc} 0 & KF & 0 \\ KF^T & 0 & A \\ 0 & A^* & 0 \end{array}\right] \end{array}$$

Avec A,A* et KF sont données par:

TABLE II
LA SOUS MATRICE A

$$A= \left[\begin{array}{ccc} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ . & & \\ . & & \\ . & & \\ a_{m1} & & a_{mn} \end{array}\right]$$

TABLE III
LA SOUS MATRICE A*

$$A^*= \left[\begin{array}{ccc} a^*_{11} & \dots & a^*_{1m} \\ . & & \\ . & & \\ . & & \\ a^*_{n1} & & a^*_{nm} \end{array}\right]$$

TABLE IV
LA SOUS MATRICE DES VARIABLES CONNUES

$$KF= \left[\begin{array}{ccc} Kf_1 & \dots & Kf_m \end{array}\right]$$

Avec m est le nombre d'éléments dans f_x et n est le nombre d'éléments dans X.

E. *Concept du Couplage*

Représenter le système en terme de graphe structurel facilite sa compréhension et permet en suite de localiser ses parties (ses sous systèmes) qui présentent de la redondance.

Ces parties peuvent être analysées en détail et les informations redondantes peuvent être manipulées dans le but de la détection et isolation des fautes (FDI) et la tolérance aux pannes.

On considère le graphe $G(F_x, X, A_x)$ qui représente une partie restreinte du graphe structurel du système. Etant donné $a=(F_x(a), X(a))$ soit l'arc qui connecte la contrainte $F_x(a)$ avec une variable inconnue X(a) ; un couplage sera défini comme suit.

F. *Définition du Couplage* [1]

Le sous graphe $G(Fx_m, X_m, Ax_m)$ est un couplage sur $G(F_x, X, A_x)$, Fx_m est inclus ou égal à F_x et X_m est inclus ou égal à X si et seulement si :

1- Ax_m est inclus ou égal à A_x
2- Quelques soient a1,a2 appartenant à $Ax_m \setminus a_1 \neq a_2$
$\leftrightarrow Fx_m(a_1) \neq Fx_m(a_2)$ et
$X_m(a_1) \neq X_m(a_2)$.

Un couplage complet F_x est obtenu lorsque $Fx_m=F_x$.
Un couplage complet X est obtenu lorsque $X_m=X$.
Soit E un ensemble qui peut représenter les fonctions f_x ou des variables Z et soit P(E) qui dénote le degré de E. Alors le sous système (F,Q(F)), F Є $P(f_x)$ soit défini comme suit :

$$Q : P(f_x)\rightarrow P(z)$$
$$F\rightarrow Q(F)=\{z_j/\exists f_i \in F \text{ tel que } (f_i, z_j) \in A\} \qquad (2)$$

Avec l'application du couplage on peut décomposer le système en trois parties selon le théorème suivant :
Tout graphe biparti d'une dimension finie peut être décomposé uniquement en :

- $G^+ = (F^+, X^+, A^+)$, tel que $Q(F^+)=X^+$ et il existe un couplage complet sur X^+ mais pas sur F^+.
- $G^= =(F^=, X^=, A^=)$ tel que $Q(F^=)=X^=$ u X^+ et il existe un couplage complet sur $X^=$ et sur $F^=$.
- $G^- = (F^-, X^-, A^-)$ tel que $Q(F^-)=X^-$ u X^+ et il existe un couplage complet sur F^- mais pas sur X^-.

G^+ représente la partie du système avec redondance d'information possible tel que $|F^+| > |X^+|$ et $|F|$ dénote la cardinalité de F.

Les variables inconnues dans X^+ peuvent être calculées de diverses manières en utilisant les variables connues.

Le sous système représenté par G^+, il est dit sur-déterminé , tel que le nombre de relations dépasse le nombre de variables inconnues. Ceci veut dire qu'une variable x dans X^+ peut être calculée à travers des différents ensembles de relations(équations) dans F^+, c'est à dire l'existence de différents chemins de x vers des variables connues.

Cette propriété peut être utilisée dans le but de la détection et isolation des fautes(FDI) , si un composant, comme exemple un capteur, tombe en panne les variables reliées peuvent être calculées (estimées) à partir d'autres ensembles de relations et peuvent être utilisées dans la boucle de contrôle.

$G^{=}$ et G^{-} représentent les parties sans redondance d'informations.

G. *Procédure de Couplage*

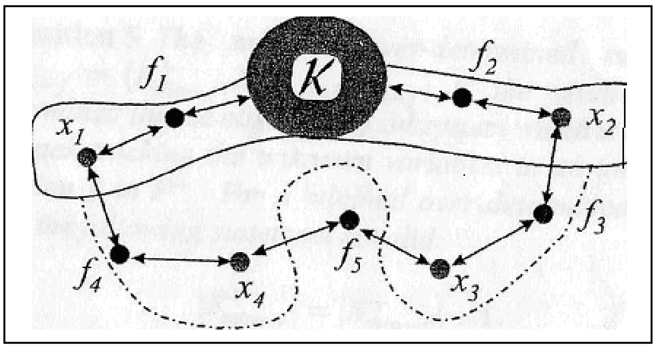
Dans la littérature, il existe un nombre d'algorithmes qui réalise le couplage. L'algorithme proposé a été développé pour décomposer le système en plusieurs sous systèmes.

Le but principal de développer un algorithme de couplage est d'identifier le sous graphe G^{+} qui représente le(s) sous système(s) contenant des informations redondantes.

L'idée est illustrée sur la fig. 1 , l'algorithme initie le couplage à partir des variables connues.

FIGURE 1

LE PROCESSUS DU COUPLAGE.



Cette figure illustre l'idée de rendre les variables inconnues, comme variables connues en les reliant de façon successive aux variables connues.

Premièrement x_1 et x_2 sont liées aux contraintes (fonctions) f_1 et f_2. Ces variables deviennent connues comme toutes les variables contenues dans f_1 et f_2 en entrées.

Alors, le nouveau ensemble de variables peut être considéré comme K_{new}= K u x_1 u x_2 . Après, x_3 et x_4 sont liées respectivement à f_3 et f_4 .

La procédure de couplage utilise énormément la matrice d'incidence I_{md}, du modèle structurel.

H. *Algorithme de Couplage* [1]

L'algorithme qui résout le problème de Couplage pour les variables inconnues et qui identifie les sous systèmes sur-déterminés est le suivant :

Entrée : Graphe structurel sous forme d'une matrice d'incidence avec directions causales marquées.

Résultat : Couplage maximal des variables inconnues et des informations sur l'existence du sous système sur-déterminés.

Début

I=0

Répéter

-Identifier les contraintes non- couplées (non-matchées) qui affectent causalement une variable inconnue ;

-Marquer les contraintes identifiées et les variables couplées;

-Marquer les variables couplées comme variables connues ;

-Affecter les variables et les contraintes couplées ;

-I=i+1 ;

Jusqu'à ce qu'il n'y a pas possibilité de couplage;

Si toutes les variables inconnues sont couplées **Alors**

 Si des contraintes non- couplées existent **Alors**

  Existence des sous systèmes sur-déterminés

 Sinon

  Le système est juste-déterminé

 finsi

Sinon

 Le système est sous-déterminé

Finsi

Fin.

I. *Possibilités du Couplage*

A travers l'analyse des résultats obtenus et les matrices d'incidences résultantes, les observations suivantes sont établies :

Pour un système $G^{+}=(F^{+}, X^{+}, A^{+})$ obtenu par couplage :

1. Le nombre des sous systèmes sur-déterminés ,obtenus par chaînage des variables inconnues qui sont concernées par chacune des relations non-couplées dans F^{+}, est égal à : $|F^{+}| - |X^{+}|$.
2. Ces sous systèmes sont distincts.

Il est important de mentionner que le couplage peut généralement être réalisé de différentes façons et différents sous systèmes sur-déterminés peuvent être obtenus par la réalisation de différents couplages.

Le nombre des sous systèmes sur-déterminés obtenus est toujours le même pour tout couplage appliqué ; c'est à dire égale à $|F^{+}| - |X^{+}|$.

J. *Détection et Isolation des Fautes*

Tout sous système minimal sur-déterminé est sous la forme de l'expression suivante :

$$f(z_i,\ldots,z_j)=0 \text{ avec } z_i,\ldots,z_j \in K \quad (3)$$

Où toutes les variables introduites dans f sont connues.

Cette expression peut être directement utilisée comme une expression pour un résidus.

$$r=f(z_i,\ldots,z_j) \text{ avec } z_i,\ldots,z_j \in K \quad (4)$$

Le résidus obtenu peut être directement utilisé pour détecter les différentes fautes.

Les possibilités d'isolation des fautes peuvent être examinées en dressant une table qui illustre les effets des différentes fautes sur l'ensemble des résidus.

TABLE V

EFFET DES DIFFERENTES FAUTES SUR LES RESIDUS

	Δz_1	Δz_2	…	$\Delta z_{\lvert k \rvert}$
r_1	1	1	...	0
. . .	. . .	. . .	. . .	. . .
r_n	1	0	...	1

Les résultats similaires au résultats dans le tableau V peuvent assister le concepteur d'établir une logique recommandée dans le but d'isolation des fautes.

III PRISE EN COMPTE DES VARIABLES SUPPLEMENTAIRES

A. *Variables dérivées* [5]

Dans le modèle structurel, les variables dérivées qui définissent l'aspect dynamique du système sont représentées de deux manières différentes :

1. La variable x et sa dérivée x' sont représentée par la même variable. Les équations dynamiques sont alors traitées comme des équations statiques, alors l'aspect dynamique n'est pas tenu en compte dans ce cas.
2. Les variables x et x' sont considérées comme des variables différentes. Afin d'étudier l'observabilité structurelle, des relations de différentiations x'=dx/dt sont ajoutées au modèle, en plus dans ce cas, l'aspect dynamique du système est tenu en compte.

B. *Variables de défaillance* [5]

Pour assurer la surveillance du système la prise en compte des défaillances est nécessaire afin de caractériser le comportement défaillant du système. En tenant en compte de ces défaillances, trois cas sont possibles :

- ❑ Indiquer les équations (contraintes) du modèle qui ne sont plus valides en cas de défaillances, c'est le cas le plus élémentaire.
- ❑ Décrire comment sont modifiées les équations de fonctionnement normal lorsque une défaillance survient, ceci est fait grâce à des variables supplémentaires (variables de défaillances).
- ❑ Modéliser l'évolution dynamique de la défaillance. On fait appel à des équations supplémentaires liant les variables de défaillances, pour enrichir le modèle bon fonctionnement du système.

IV. LES MSS SETS

L'équipe de recherche de l'université de Lille (France), focalise son travail sur la recherche des relations de redondances analytiques (RRAs) pour développer son algorithme de diagnostic des systèmes, par contre les chercheurs de l'université suédoise Linkoping présente une autre variante des algorithmes du diagnostic des systèmes. Cette nouvelle vue se base sur la recherche du plus petit ensemble de relations de consistance (MSS Sets : Minimal Structurally Singular Sets of equations) qui sera par la suite utilisé pour générer les relations de redondances pour vérifier le bon fonctionnement du système.

L'algorithme pour rechercher les MSS Sets [10] est complètement automatique et il est décomposé en 6 algorithmes :

pour entrée : modèle structurel (matrice incidence) avec des informations additionnelles variables linéaires, non linéaires, variables dérivées.
pour sortie : MSS Sets pour garantir la surveillance .
Les six (06) algorithmes sont :

Algorithme de différentiation du modèle;
-Algorithme de simplification du modèle;
-Algorithme de recherche des MSS Sets;
-Algorithme d'analyse du diagnostic du système ;
-Algorithme de découplage des fautes ;
-Algorithme du Choix du plus simple MSS Sets pour assurer la surveillance demandée.

La sortie de chaque algorithme représente une entrée de l'algorithme suivant.

V. Conclusion

Une amélioration des algorithmes de couplage pour le diagnostic des fautes a été présentée, son but final est de trouver les parties du système qui présente de la redondance, Ces parties peuvent être par la suite utilisées dans la détection et isolation des fautes (FDI).

A partir du graphe biparti orienté le modèle structurel du système est établi. Le concept de Couplage est utilisé d'une manière spécifique pour identifier la partie structurellement observable du système.

Toute relation non-couplée dans le système observable peut être utilisée pour générer des informations redondantes ; elle peut être manipulée pour obtenir un résidu.

Cette approche fournis un outil performant pour analyser un système dans toutes ses étapes. Elle donne ses résultats en manipulant des matrices d'incidences, et comme ces matrices sont formées uniquement par des « 1 » et des « 0 », la complexité et la taille du système ne posent aucun problème. Les recherches s'accentuent sur les perturbations et estimations des fautes dans les systèmes, ceci fait appel aux graphes tripartis.

Ce rapport a présenté une méthode à base des MSS Sets, elle est systématique et automatique pour la recherche d'un petit ensemble de sous systèmes qui peuvent être employés pour dériver des relations de consistance avec des possibilités plus élevées pour le diagnostic du système.

References

[1] Roozbeh Izadi-Zamanabadi, "Structural Analysis Approach to Fault Diagnosis With Application to Fixed-Wing Aircraft Motion",Control Engineering Dept., Intelligent Autonomous Systems (IAS) Group, Aalborg University, DK-9220 Aalborg, Denmark, 2003.

[2] Torsten Lorentzen, Morgens Blanke, Henrik Niemann, "Structural Analysis – A Case Study Of The Romer Satellite'',Automation, Orsted.DTU, Technical University Of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark,2003.

[3] Torsten Lorentzen, Morgens Blanke,"Sa Tool Course: An Introduction to the use of Sa Tool",Automation, Orsted.DTU, Technical University Of Denmark, DK-2800 Lyngby, Denmark,2002.

[4] Mattias Krysander,''Design and Analysis of Diagnostic Systems Utilizing Structural Methods", Departement of Electrical Engineering, Linkopings Universtitet, S-581 83, Sweden, Year 2003.

[5] Dilek Dustegor, Vincent Cocquempot, Marcel Staroswiecki, Erik Frisk, '' Isolabilité Structurelle des défaillances- Application à un modèle de vanne'', RS- JESA Volume 38,n°1-2/2004.
[6] Pr H. HAFFAF, ''Observabilité, Surveillabilité, et Tolérance aux Fautes par Analyse Structurelle : Cours PG-Informatique Année 2006'', Département Informatique, Université d'ORAN, 2006.
[7] Rim MRANI ALAOUI, ''Thèse Doctorat :Conception d'un module de diagnostic à base des suites de bandes temporelles en vue de la supervision des procédés énergétique. Application en ligne à un générateur de vapeur'', Université de Lille, France, Année 2004.

[8] XAVIER ZWINGMANN, ''Thèse Doctorat : Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception.'', Université Laval , Québec(QC), Année 2005.
[9] Moustapha ALHAJ DIBO,'' Thèse de Doctorat : Validation de données et diagnostic des systèmes incertains à l'aide de l'analyse par intervalle.'', Institut National Polytechnique de Lorraine, Année 2005.
[10] Mattias Krysander and Mattias Nyberg, ''Structural Analysis for Fault Diagnosis of DAE Systems Utilizing Graph Theory and MSS Sets '', Department of Electrical Engineering, Link¨oping University,SE-581 83 Link¨oping, Sweden,Link¨oping, May 21, 2002.
[11] Mattias Krysander, ''Design and Analysis of Diagnosis Systems Using Structural Methods'',Printed by LiU-Tryck, Link¨oping, Sweden 2006.
[12] Linda Rattfält , ''A comparative study of two structural methods for fault isolability analysis.'', Master's thesis performed in Vehicular Systems, Reg nr: LiTH-ISY-EX-3462-2004, 25th February 2004.