ourn es d Etudes Nationales de M cani ue, ENM 2011
Ouargla, Algérie, 07-08 Mars, 2011, pp. xxx-xxx

Modélisation et Simulation par Bond Graph d'un Système Mécatronique pour la Conception Integrée de Supervision

Mellal Mohamed Are i [1], Ad erid Sma l [1] Bena ou D amel [1]

1 Laboratoire Mécanique des Solides et des Systèmes (Université de Boumerdès)

E-mail: mellal-mohamed@umbb.dz

Résumé **La recherche en m catroni ue porte sur la conception et la mise en u re de syst mes fiables, s curis s et conomi ues. u ue la m catroni ue est une science pluridisciplinaire, il est difficile de mod liser un tel syst me, c est pour cela u on a choisi les bond graph. Cet outil nous permet de mod liser un syst me hybride a ec un m me langage. Notre tude consiste mod liser la partie op rati e d une machine commande num ri ue par l approche bond graph a ec un placement optimal de capteurs afin d aboutir un mod le destin la conception int gr e de super ision. Le mod le propos permet une conception techni uement faisable et conomi uement r alisable pour tre int gr e dans les chaines de production. La g n ration des relations de redondance analyti ue permet de trou er la matrice FDI (Fault Detection and Isolation) ui optimise la fonction maintenance.**

Mots Clés-modélisation; simulation; bond graph; conception intégrée de supervision; mécatronique.

I. INTRODUCTION

La mécatronique est la combinaison synergique et systémique de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique en temps réel, l'intérêt de ce domaine d'ingénierie interdisciplinaire est de concevoir des systèmes automatiques puissants et de permettre le contrôle de systèmes complexes [1]. À partir de cette définition nous déduisons que chaque système mécatronique doit être modélisé et simulé afin d'aboutir à un modèle plus performant, plus économique, plus fiable et plus simple.

Une méthode de modélisation unifiée est nécessaire pour l'analyse et le mode. L'outil graphique est bien convenu à cette fin. Cette méthodologie permet l'affichage de l'échange de puissance d'un système, qui inclut le stockage, la dissipation et la transformation.

En outre, cet outil tient compte de la génération non seulement d'un mode comportemental, mais également il peut être employé pour l'analyse structurale et causale qui est essentielle pour concevoir les systèmes de commande et de surveillance.

Cette méthode est souple, car on peut par la suite ajouter plus d'éléments comme les pertes/effets thermiques, d'inertie et de stockage, sans devoir refaire encore une fois la modélisation, donc plus de manière significative du point de vue simulation, les propriétés causales et structurales du langage graphique permettent au modeleur de résoudre le niveau algorithmique du modèle à l'étape de formulation avant que les équations détaillées aient été dérivées, ce contexte a été développé dans [2].

Ces propriétés peuvent être employées pour la conception des systèmes de surveillance et de supervision, ces méthodes sont illustrées dans [3], [4], [5] et [6]. Par conséquent, cette méthode graphique peut être considérée comme outil intégré de conception assistée par ordinateur. Les bond graph, abrégés par (BG) sont [7] :

- Des graphes de représentation du comportement dynamique des systèmes indépendamment du domaine considéré.
  Des graphes fondés sur les flux d'énergie.
  Une modélisation orientée objet des systèmes.
  Un outil de modélisation puissant pour les ingénieurs.

Dans le langage bond graph il y a un ensemble de multiports qui sont nécessaires pour la modélisation d'un système physique d'une manière générique en utilisant les variables généralisées d'effort et de flux. Ces éléments de base se classifient en trois catégories, [7]: trois éléments passifs (R, C et I), deux éléments actifs (Se et Sf) et quatre jonctions (1, 0, TF et GY). La notion de causalité a été présentée dans [8].

II. ETUDE DE CAS

Dans notre étude nous allons modéliser et simuler la partie porte pièce d'une machine à commande numérique en utilisant les bond graph afin d'aboutir à un modèle destiné à la

conception intégrée de supervision. Cette machine est constituée de deux (2) parties :

Partie commande pour la programmation de l'usinage et l'affichage du plan d'instrumentation général pour la supervision.
Partie opérative pour l'usinage des pièces.

Un moteur électrique entraîne par l'intermédiaire d'un ensemble réducteur, vis/écrou une table porte pièce en mouvement horizontal. Le moteur est alimenté par une tension électrique et la table est repérée par sa position notée Pos(t).

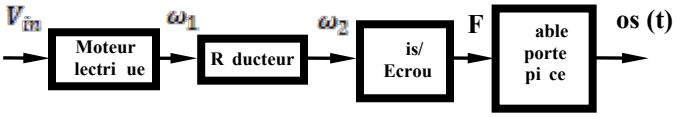

Figure 1. Présentation de la table porte pièce.

Les paramètres de la table à surveiller sont représentés dans le Tableau.I, [9] :

TABLEAU I. PARAMETRES DE LA TABLE PORTE PIECE

aleur	D finition	Unit
Kv = 0,47	Constante du moteur	(rad/s)/v
L = 0,0019	Inductance du moteur	H
R = 0,61	Résistance de l'induit du moteur	Ω
J = 0,01	Inertie de la partie tournante	kg·m²
n = 0,5	Rapport du réducteur	
h = 0,01	Rapport vis/écrou	m/rad
M = 8	Masse de la table	Kg
f = 6000	Frottements visqueux	N·s/m
k = 300000	Raideur de la vis	N·m/rad

A. *Modélisation et simulation du modèle bond graph*

La modélisation consiste à construire le modèle bond graph sur un logiciel afin de le simuler. Dans notre cas on a choisi le logiciel SYMBOLS 2000 (Le module BondPad) qui est puissant pour la recherche, une étude comparative des différents logiciels a été traitée dans [4]. La Fig.2 montre le modèle bond graph dont on a proposé, modélisé sur SYMBOLS 2000 :

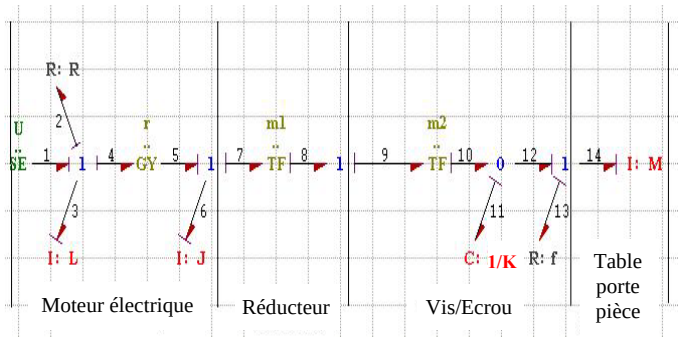

Figure 2. Modèle bond graph proposé avec ses différents composants.

Ce modèle bond graph permet de poser analytiquement toutes les équations du système sans réduction du chemin causal :

Jonction 1 : I

$$\begin{cases} f_1 = f_3 = f_4 = \{f_2\} \\ e_2 = V_{in} - e_3 - e_4 \end{cases} \quad (1)$$

Jonction 1 :

$$\begin{cases} \\ \end{cases} \quad (2)$$

Jonction 0

$$\begin{cases} e_8 = e_{10} = \{e_9\} \\ f_9 = f_8 - f_{10} \end{cases} \quad (3)$$

Jonction 1 : Moteur

$$\begin{cases} f_{11} = f_{13} = \{f_{12}\} \\ e_{12} = e_{11} - e_{13} \end{cases} \quad (4)$$

Elément I :L

$$\begin{cases} \dot{p}_2 = e_2 \\ f_2 = \frac{1}{L} \times p_2 \end{cases} \quad (5)$$

Elément I : J

$$\begin{cases} \dot{p}_6 = p_6 \\ f_6 = \frac{1}{j} \times p_6 \end{cases} \quad (6)$$

Gyrateur GY : r

$$\begin{cases} e_5 = r \times f_4 \\ e_4 = r \times f_5 \end{cases} \quad (7)$$

Elément I : M

$$\begin{cases} \dot{p}_{12} = e_{12} \\ f_{12} = \frac{1}{M} \times p_{12} \end{cases} \quad (8)$$

Elément C : 1/k

$$(9)$$

Elément R : R

$$e_3 = R \times f_3 \quad (10)$$

Elément R : f

$$e_{13} = f \times f_{13} \quad (11)$$

Transformateur TF :

$$\begin{cases} f_8 = m_1 \times f_7 \\ e_7 = m_1 \times e_8 \end{cases} \quad (12)$$

Transformateur TF :

$$\begin{cases} e_{11} = \frac{1}{m_2} \times e_2 \\ f_6 = \frac{1}{L} \times p_2 \end{cases} \quad (13)$$

B. *Résultats et discussion*

Le logiciel SYMBLOS 2000 permet de générer directement les équations simplifiées. Il prend en considération la causalité et les chemins causaux, d'où l'élimination directe des variables inconnues.

Le rang du modèle bond graph proposé est de quatre (I:L ; I:J ; C:1/k ; I :M) et nous avons obtenu le même nombre d'équations (Voir Fig.3), ce qui confirme que notre modèle bond graph est bien structuré (causalité, couplage, liens d'informations).

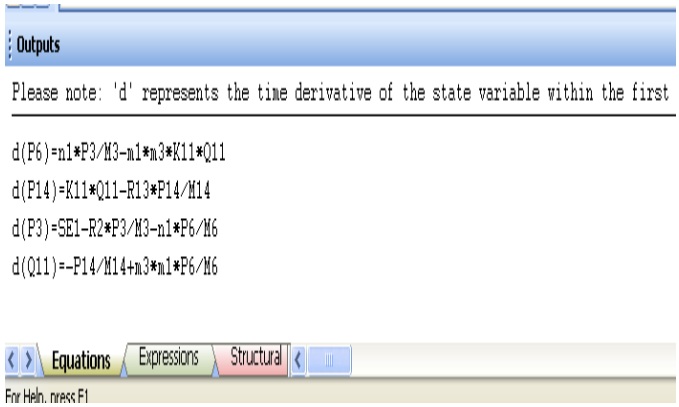

Figure 3. Equations générées par le logiciel.

C. *Construction des capsules pour générer la matrice FDI*

Ce logiciel permet aussi de faire sortir la matrice de signature des défauts directement après la modélisation du système. Pour modéliser un système de supervision sur ce logiciel, il faut construire des capsules qui contiennent les différents composants du système, donc une capsule est le bond graph de chaque partie du système qu'on lui attribue une icône représentative. Ces capsules sont reliées avec les capteurs qui sont couplés aux jonctions. On ne dispose que de capsules de génie des procédés, d'où la nécessité de construire des capsules propre à notre système à superviser.

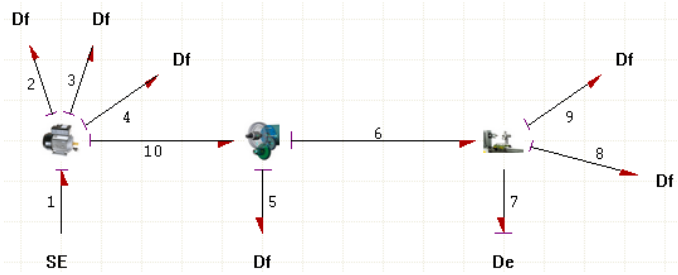

Figure 4. Système étudié modélisé par les capsules construites.

: Détecteur de la résistance interne du moteur.
: Détecteur de l'inductance du moteur.
: Détecteur de vitesse de la partie tournante du moteur.
: Détecteur de vitesse du réducteur.
: Détecteur de couple.
: Détecteur de vitesse de l'ensemble Vis/Ecrou.
: Détecteur de vitesse du porte pièce.

1) Résultats : Le modèle BG permet d'obtenir les valeurs numériques des résidus mais aussi la matrice de signature des défaillances .

En effet, cette dernière est indispensable pour la localisation des défaillances pouvant survenir durant le fonctionnement du système. Le parcours des chemins causaux permet d'éliminer les variables inconnues pour générer des RRAs (Relations de Redondance Analytique). Le parcours des chemins causaux de la variable inconnue vers le détecteur est utilisé pour construire la matrice de signature des défaillances.

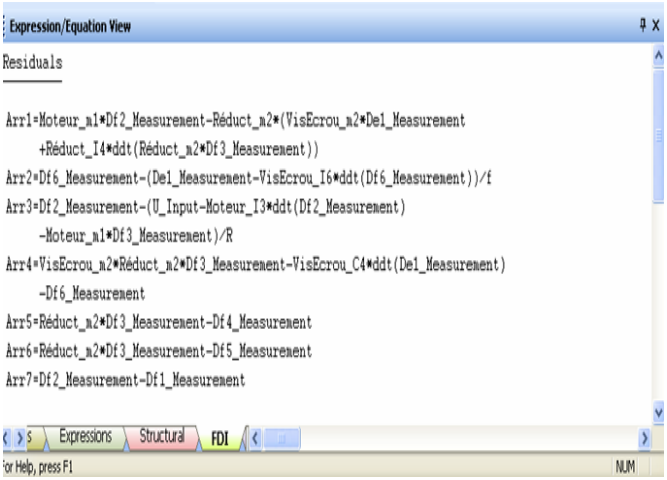

Figure 5. RRAs générées par le logiciel.

2) Discussion :

À partir de ces résultats, nous remarquons que :

Notre système contient sept (7) détecteurs et nous avons obtenu le même nombre de RRAs, ce qui signifie que notre modèle est correct, donc la règle : n nombre de détecteurs est égal à n nombre de RRAs a été concrétisée [4], [10].

Les RRAs sont structurellement indépendantes.

Nous avons un BG observable se qui implique : pour chaque jonction 0 ou 1 avec un seul détecteur, correspond une RRA.

D. *Génération de la matrice FDI*

La détectabilité et l'isolabilité des composants du processus peuvent être testées en utilisant les RRAs générées par ModelBuilder du logiciel. Pour cela, il faut tout d'abord exclure les composants qui sont, selon le cahier des charges fixé, supposés infaillibles. Dans notre cas, on suppose que la tension d'entrée de la machine est exclue du cahier des charges.

1) Résultats : La matrice de signature des défaillances (appelée aussi matrice de détection et isolation des défauts - FDI -) obtenue est :

Monitorability Analysis

	M_b	I_b	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
Df2_Measurement	1	1	1	0	1	0	0	0	1
Df3_Measurement	1	1	1	0	1	1	1	1	0
Df4_Measurement	1	1	0	0	0	0	1	0	0
De1_Measurement	1	0	1	1	0	1	0	0	0
Df6_Measurement	1	1	0	1	0	1	0	0	0
Df5_Measurement	1	1	0	0	0	0	0	1	0
Df1_Measurement	1	1	0	0	0	0	0	0	1
Réduct	1	1	1	0	0	1	1	1	0
VisEcrou	1	0	1	1	0	1	0	0	0
Moteur	1	1	1	0	1	0	0	0	0

Figure 6. Matrice FDI générée par le logiciel.

2) Discussion : Sur la matrice de la Fig.6 sont affichées les variables des mesures, des sources et des composants du processus. Sur cette fenêtre, on a spécifié les composants qu'on a jugé infaillibles dans le domaine d'application de processus, donc ils ne seront pas affichés.

Il est à noter que , ,..., représentent les résidus correspondant aux RRAs et (,) sont respectivement la détectabilité et l'isolabilité des défaillances. Les lignes de la matrice sont les signatures des composants (i.e. dépendance des résidus par rapport aux défaillances des composants). La valeur 1 signifie que la défaillance du composant influe théoriquement sur la réponse du (ou des) résidu(s) (0 sinon). Lorsque la variable associée à un composant apparaît dans au moins un résidu, alors sa défaillance est détectable (= 1). Si la signature d'un composant est unique (strictement différente des autres signatures) sa défaillance est isolable (= 1). À partir de la matrice de la Fig.6 nous remarquons que :

Toutes les valeurs de la colonne sont égales à 1, donc toutes les défaillances du système peuvent être détectées.

En revanche, les signatures du détecteur et de l'ensemble Vis/Écrou sont identiques ce qui signifie que les défaillances affectant ces composants ne peuvent pas être isolées, donc le détecteur de couple ne peut pas contribuer efficacement à la supervision de la partie Vis/Écrou.

Le moteur et le réducteur sont supervisables car leur signature est différente.

L'ensemble Vis/Écrou n'est pas totalement supervisable.

Il est important de souligner que la matrice de signature des défaillances construite à partir des chemins causaux correspond à une configuration (ou mode de fonctionnement) bien déterminée et donc au modèle associé. La forme des équations pour chaque élément bond graph est alors la même durant toute la période de fonctionnement dans une configuration donnée.

III. Conclusion et Perspectives

Dans cette étude, nous proposons une solution pour la conception intégrée de supervision de ce système mécatronique techniquement faisable et économiquement réalisable pour être intégrée dans les chaînes de production, afin de faciliter la tâche aux opérateurs de maintenance. L'intérêt de cette méthode réside dans :

La possibilité de disposer d'un système de supervision intégrée adapté pour la surveillance des paramètres de la machine en temps réel.

Génération directe de la matrice de signature des défauts en temps réel.

Méthode polyvalente en cas de modification des paramètres de la machine.

Vu qu'on a constaté que tous les défauts au niveau de l'ensemble vis/écrou n'est pas totalement surveillable, une étude plus approfondie peut aboutir à la solution en prenant en considération les paramètres suivants :

Intégrer dans les calculs l'usure des éléments mécaniques (réducteur, vis/écrou et le gyrateur du moteur).

Intégrer dans la conception intégrée du système de supervision le porte outil.

Installation d'un système de régulation modélisé par les bond graph.

References

[1] R.H. Bishop, "Mechatronics : An introduction".Taylor and Francis Group. USA, 2006, pp. 1-10.

[2] A. K. Samantaray and B. Ould Bouamama, "Model-based Process Supervision : A Bond Graph Approach", Springer Verlag. London, 2008, 489 p.

[3] B. Ould Bouamama, "Modélisation et supervision des systèmes en génie des procédés : Approche Bond Graph", Mémoire de HDR, 2002, Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle de Lille USTL.

[4] M. A. Djeziri, "Diagnostic des Systèmes Incertains par l'Approche Bond Graph", Thèse de doctorat, 2007, Laboratoire d'Automatique et Informatique Industrielle de Lille.

[5] K. Medjaher, "Contribution de l'Outil Bond Graph pour la Conception de Systèmes de Supervision des Processus Industriels", Thèse de doctorat, 2005, USTLille1-ECLille.

[6] V. Cocquempot, "Contribution à la Surveillance des Systèmes Industriels Complexes", Mémoire de HDR, 2004, IUT de Lille.

[7] B. Ould Bouamama, G. Dauphin-Tanguy, "Modélisation par Bond Graph : Eléments de Base pour l'Energétique", Techniques de l'Ingénieur, 2006, pp. 1-5, BE 8 280.

[8] W. Borutzky, "Bond Graph Modelling and Simulation of Multidisciplinary Systems : An introduction", Simulation Modelling Practice and Theory, vol.17, issue.1, pp. 3-21, January 2009.

[9] M. Vergé, D. Jaume, "Modélisation Structurée des Systèmes avec les Bond Graphs", Edition Technip. France, 2004, pp. 273-287.

[10] F. Busson, "Les Bond Graphs Multi-énergie pour la Modélisation et la Surveillance en Génie des Procédés", Thèse de doctorat, 2002, Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille, pp. 97-109

Notations

M_D	Indice de détectabilité du défaut
I_D	Indice d'isolabilité du défaut
0	Jonction au même effort
1	Jonction au même flux
C	Élément capacitif du BG
De	Détecteur d'effort
Df	Détecteur de flux
FDI	Fault Detection and Isolation
GY	Élément gyrateur du BG
I	Élément inductif du BG
m_1	Module du gyrateur 1
m_2	Module du gyrateur 2
R	Élément résistif du BG
r	Module du transformateur
RRAs	Relations de Redondance Analytique
Se	Source d'effort
Sf	Source de flux
TF	Élément transformateur du BG
V_m	Tension d'entrée du moteur