

N° d'ordre :

ECOLE CENTRALE DE LILLE
UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

THESE

Présentée en vue d'obtenir le grade de

DOCTEUR

en

Productique : Automatique et Informatique Industrielle

par

Ridha ANDOULSI

DOCTORAT DELIVRE CONJOINTEMENT PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE
ET L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

ETUDE D'UNE CLASSE DE SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES
PAR UNE APPROCHE BOND GRAPH
MODELISATION, ANALYSE ET COMMANDE

Soutenue le 19 Décembre 2001 devant le jury d'examen :

Mme Betty SEMAIL , Professeur, EUDIL	:Président
M. Mekki KSOURI , Professeur, ENIT Tunisie	:Rapporteur
M. Xavier ROBOAM , Chargé de Recherches CNRS, LEEI Toulouse	:Rapporteur
M. Mohamed ANNABI , Professeur, ESST Tunisie	:Examineur
Mme Geneviève DAUPHIN-TANGUY , Professeur, E. C. Lille	:Examineur, Directeur de thèse
M. Christophe SUEUR , Professeur, Ecole Centrale de Lille	:Examineur
M. Abdelkader MAMI , Maître Assistant, Fac. des Sciences de Tunis	:Examineur

Thèse préparée dans les laboratoires LAIL de l'E. C. de Lille et LAS de l'I.N.R.S.T de Tunis
sous la direction de Mme Geneviève DAUPHIN-TANGUY

Résumé : Nous présentons l'étude d'une classe de systèmes photovoltaïques par une approche bond graph. Cette étude concerne la modélisation, l'analyse et la commande de quelques configurations comportant un générateur PV, des convertisseurs DC/DC et des motopompes DC.

La modélisation des différents éléments d'un système photovoltaïque est une étape indispensable qui doit précéder toute phase de dimensionnement, d'identification ou de simulation. Cependant, ces systèmes PV sont de type hybride et leur modélisation est complexe. Pour cela nous utilisons une approche unifiée de modélisation basée sur la technique bond graph. Cette technique est complètement systématique et a une flexibilité suffisante pour pouvoir introduire différents composants dans le système.

Dans le premier chapitre, nous rappelons le principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque et nous traitons principalement le fonctionnement en MPPT (Maximum Power Point Tracking).

Dans le deuxième chapitre nous élaborons des modèles bonds graphs de diverses configurations de systèmes photovoltaïques. Pour la source PV, nous élaborons, dans une première étape, un modèle complet tenant compte des divers phénomènes physiques qui influent sur la qualité de la source PV. Dans une seconde étape, nous déduisons un modèle bond graph réduit afin de le rendre utilisable dans des applications d'analyse et de commande. Pour les convertisseurs DC/DC, nous rappelons la modélisation par bond graph des éléments de commutation et les modèles bond graph moyens des convertisseurs DC/DC développés dans la littérature. Suite à ceci nous déduisons les modèles bonds graphs des divers convertisseurs DC/DC à utiliser.

Le troisième chapitre présente une étude dynamique en linéaire de la stabilité de quelques configurations.

Dans le quatrième chapitre, nous étudions la faisabilité d'une commande linéarisante entrée-sortie pour quelques configurations de systèmes PV. Dans cette étude, nous utilisons le concept du bond graph inverse pour déterminer, par une approche bond graph, l'expression de la commande linéarisante entrée-sortie et la nature de la stabilité de la dynamique interne (dynamique des zéros).

Le cinquième chapitre est consacré à la présentation de résultats expérimentaux. Ces résultats sont relatifs aux dispositifs expérimentaux réalisés :

- Système de caractérisation de modules et champs photovoltaïques,
- Système photovoltaïque constitué d'un générateur PV couplé à une motopompe DC à travers un hacheur dévoltageur. Ce système fonctionne en MPPT suite à l'implantation d'une loi de commande non linéaire.

Mots clés : système photovoltaïque, bond graph, convertisseur DC/DC, analyse dynamique, commande non linéaire.

Abstract : We present in this thesis a study of a class of photovoltaic system by a bond graph approach. This study concerns the modelling, the analysis and the control of some configurations including PV generator, DC/DC converters and DC motor-pumps.

The modelling of the different elements of a photovoltaic system is an indispensable stage that must precede all application of sizing, identification or simulation. However, these PV systems are of hybrid type and their modelling is complex. It is why we use a unified modelling approach based on the bond graph technique. This methodology is completely systematic and has a sufficient flexibility for allowing the introduction of different components in the system.

In the first chapter, we recall the principle of functioning of a photovoltaic generator and we treat mainly the MPPT (Maximum Power Point Tracking) working.

In the second chapter, we elaborate bond graph models of various photovoltaic system configurations. For the PV source, we elaborate, in a first stage, a complete model taking into account the various physical phenomena influencing the quality of the PV source. In a second stage, we deduce a reduced bond graph model more easy to use for analysis and control purposes. For the DC/DC converters, we recall the bond graph modelling of switching elements and the average bond graph of the DC/DC converters developed in the literature. Thus, we deduce the bond graphs models of the various DC/DC converters to be used.

The third chapter presents a dynamic study of some configurations stability in linear procedure .

In the fourth chapter, we study the feasibility of non linear controllers by input/output linearization for some configurations of PV systems. In this study, we use the concept of inverse bond graph to determine, by a bond graph approach, the expression of the control input and the nature of the stability of the internal dynamics (dynamics of zeros).

The fifth chapter is dedicated for the presentation of some experimental results. These results are relative to the achieved experimental devices:

- characterization system for photovoltaic modules and fields,
- photovoltaic system using a PV generator coupled to a DC motor-pump through a buck converter. This system uses a non linear control for MPPT running.

Key words : photovoltaic system, bond graph, DC/DC converter, dynamical analysis, non linear control.

SOMMAIRE

Introduction générale	10
CHAPITRE I	
Généralités sur les systèmes photovoltaïques	13
I.1. Introduction	14
I. 2. Principe de fonctionnement des photopiles.....	15
I. 3. Caractéristiques électriques des photopiles.....	16
I. 3. 1. Caractéristique courant-tension (I-V).....	16
I. 3. 2. Paramètres externes.....	18
I. 3. 3. Influence des résistances série et shunt	21
I. 3. 4. Influence du flux lumineux.....	22
I. 3. 5. Influence de la température.....	23
I. 4. Association des photopiles: Générateur solaire.....	24
I. 5. Conception des systèmes photovoltaïques.....	27
I. 5. 1. Evolution des systèmes PV.....	27
I. 5. 2. Critères de conception des systèmes PV.....	27
I. 5. 3. Les divers modes de couplage.....	29
I. 6. Adaptation entre générateurs PV et motopompes DC.....	31
I. 6. 1. Charge adaptée.....	31
I. 6. 2. Nécessité d'une adaptation.....	33
I.6. 3. Principe de l'adaptation par convertisseur DC/DC.....	34
I. 6. 4. Algorithmes de commande des adaptateurs MPPT.....	36
I. 6. 4. 1. Méthodes analogiques	37
I. 6. 4. 2. Méthodes micro-programmées	38
I. 6. 4. 3. Procédés de recherche extrême adaptative	40
I. 6. 5. Problèmes posés par la commande des systèmes PV.....	42
I.7. Conclusion.....	44
 Chapitre II	
Modélisation par Bond graph des éléments d'une classe de systèmes PV	45
II. 1. Introduction.....	46
II. 2. Modélisation par bond graph	47
II.3. Modèle bond graph de la source photovoltaïque.....	48
II.3.1. Représentation par Modèle complet	49
II. 3. 2. Représentation par Modèle réduit	53
II. 4. Modélisation par bond graph des convertisseurs DC/DC	55
II. 4. 1. Introduction.....	55
II. 4. 2. Principe de fonctionnement d'un convertisseur DC/DC.....	56
II. 4. 2. 1. Les hacheurs à liaisons directes	56
	6

II. 4. 2. 2. Les hacheurs à liaisons indirectes	57
II. 4. 3. Modélisation des éléments de commutation.....	58
II. 4. 4. Modélisation bond graph d'un élément de commutation.....	59
II. 4. 4. 1. Méthodes à causalité variable.....	60
II. 4. 4.2 . Méthode à causalité fixe.....	61
II. 4. 5. Modèles Bond graph moyens des convertisseurs DC/DC.....	63
II. 4. 5. 1. Principe	63
II. 4. 5. 2. Application.....	65
II. 4. 5. 3. Modèle bond graph moyen direct	66
II. 4. 5. 4. Modèle bond graph moyen indirect	73
II. 4. 5. 5. Modèle bond graph moyen d'autres types de hacheurs.....	78
II. 5. Modèles bond graph de systèmes PV avec moteurs DC	81
II. 5. 1. Modèle bond graph avec moteur DC à aimant permanent.....	81
II. 5. 2. Modèle bond graph avec moteur DC Shunt	82
II. 5. 3. Modèle bond graph avec moteur DC série	83
II. 5. 4. Modèle bond graph avec moteur DC à excitation séparée.....	83
II. 6. Conclusion	86

Chapitre III

Etude dynamique en linéaire d'une Classe de

Systèmes photovoltaïques.....

III.1. Introduction.....	88
III.2. Etude d'une configuration : Générateur PV - hacheur dévolteur – moteur DC à aimant permanent.....	89
III. 2. 1. Modèle bond graph du système	89
III.2. 2. Mise en équation.....	90
III. 2. 3. Etude dynamique en linéaire.....	94
III. 2. 3. 1. Linéarisation de l'équation d'état.....	94
III. 2. 3. 2. Linéarisation directe sur bond graph.....	96
III. 3. Etude d'une configuration : Générateur PV - hacheur survolteur – moteur DC à aimant permanent.....	109
III. 3.1. Modèle bond graph et mise en équation d'état.....	109
III. 3. 2. Modèle bond graph et mise en équation en régime statique.....	111
III. 3. 3. Modèle bond graph linéarisé et mise en équation d'état en petits mouvements.....	111
III. 3. 4. Etude de la stabilité en petits mouvements.....	112
III. 3. 5. Etude des zéros de la fonction de transfert.....	113
III. 4. Etude d'une configuration : Générateur PV - hacheur dévolteur- survolteur – moteur DC à aimant permanent.....	117
III. 4.1. Modèle bond graph et mise en équation d'état.....	117
III. 4. 2. Modèle bond graph et mise en équation en régime statique.....	119
III. 4. 3. Modèle bond graph linéarisé et mise en équation d'état en petits mouvements.....	120
III. 4. 4. Etude de la stabilité en petits mouvements.....	121
III. 4. 5. Etude des zéros de la fonction de transfert.....	122
III. 5. Etude d'une configuration : Générateur PV - hacheur survolteur –	

dévolteur – moteur DC à aimant permanent.....	123
III. 5.1. Modèle bond graph et mise en équation d'état.....	124
III. 5. 2. Modèle bond graph et mise en équation en régime statique.....	126
III. 5. 3. Modèle bond graph linéarisé et mise en équation d'état en petits mouvements.....	126
III. 5. 4. Etude de la stabilité en petits mouvements.....	127
III. 5. 5. Etude des zéros de la fonction de transfert.....	128
III. 6. Conclusion.....	129

Chapitre IV

Commande non Linéaire d'une classe de systèmes photovoltaïques.....

IV. 1. Introduction.....	132
IV. 2. Commande linéarisante entrée-sortie par retour d'état	133
IV. 2. 1. Introduction	133
IV. 2. 2. Principe de la méthode	133
IV. 2. 2. 1. Cas monovariable.....	134
IV. 2. 2. 2. Cas multi-variables.....	135
IV. 2. 3. Stabilité interne des systèmes non-linéaires.....	137
IV. 2. 4. Linéarisation entrée-sortie et stabilité interne directement sur bond graph	139
IV. 2. 4. 1. Linéarisation entrée-sortie directement sur bond graph.....	139
IV. 2. 4. 1. 1. Modèle bond graph du système inverse	140
IV. 2. 4. 1. 2. Détermination de l'équation dynamique minimale.....	143
IV. 2. 4. 1. 3. Linéarisation exacte avec loi statique.....	143
IV. 2. 4. 2. Etude de la stabilité interne directement sur bond graph	144
IV. 3. Commande linéarisante et stabilité interne d'une classe de systèmes photovoltaïques	147
IV. 3. 1. Introduction.....	147
IV. 3. 2. Etude d'une configuration :	
Générateur PV, hacheur-dévolteur, moteur DC à aimant permanent.....	147
IV. 3. 2. 1. Commande linéarisante de la tension du générateur PV.....	148
IV. 3. 2. 2. Commande linéarisante de la vitesse de la motopompe DC.....	158
IV. 3. 2. 3. Conclusion.....	161
IV. 3. 3. Etude d'une configuration :	
Générateur PV - hacheur dévolteur- moteur DC shunt.....	162
IV. 3. 3. 1. Commande de la tension du générateur PV.....	163
IV. 3. 3. 2. Commande de la vitesse de la motopompe DC.....	165
IV. 3. 4. Etude d'une configuration : Générateur PV – hacheur dévolteur- moteur DC série.....	166
IV. 3. 4. 1. Commande de la tension du générateur PV.....	167
IV. 3. 4. 2. Commande de la vitesse de la motopompe DC.....	167
IV. 3. 5. Etude d'une configuration : Générateur PV - hacheur survolteur - moteur DC à aimant permanent.....	168
IV. 3. 5. 1. Commande du courant de générateur PV	168
IV. 3. 5. 2. Commande de la vitesse du moteur DC	169

IV. 3. 6. Tableau récapitulatif.....	170
IV. 4. Conclusion	171
 CHAPITRE V	
REALISATION EXPERIMENTALE.....	173
V. 1. Introduction	174
V. 2. Description du dispositif expérimental.....	175
V.2. 1. Générateur photovoltaïque	175
V. 2. 1. 1. Identification des paramètres de la source PV.....	176
V. 2. 1. 2. Variation de la caractéristique I-V au cours de la journée.....	182
V. 2. 2. Motopompe DC	184
V.3. Etude et réalisation du hacheur	188
V.3.1. Choix de la configuration	188
V. 3. 2. Structure du hacheur	188
V. 3. 2. 1. filtres	189
V. 3. 2. 2. Etage de puissance	189
V. 3. 2. 3. Etage de commande	189
V. 4. Etude et Implantation de la loi de commande non linéaire en fonctionnement MPPT	190
V. 4. 1. Présentation du problème	190
V. 4. 2. Recherche du point de puissance maximale	191
V. 4. 2. 1. Méthode statique	191
V. 4. 2. 2. Méthode dynamique	191
V. 4. 2. 3. Méthode de calcul de la dérivée de la puissance	192
V. 4. 3. Synthèse de la loi de commande linéarisante	192
V. 5. Configuration matérielle	194
V. 6. Configuration logicielle.....	196
V. 7. Résultats expérimentaux	198
V. 8. Comparaison avec les résultats simulés.....	201
V.9. Conclusion.....	202
 Conclusion générale	 207
 Références Bibliographiques	 212
Annexes.....	223
Annexe A : Principe de la méthodologie bond-graph.....	224
Annexe B : Modèles bond graphs moyens de systèmes PV avec divers types de hacheurs.....	232

Introduction générale

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. Actuellement, on assiste à un regain d'intérêt pour les installations utilisant l'énergie solaire, surtout dans les régions ayant des conditions climatiques favorables ou encore pour les applications sur des sites isolés. Parmi ces applications considérables nous citons le pompage d'eau pour la consommation et l'irrigation en agriculture dans les sites isolés des pays en voie de développement. En effet, pour nombre de ces pays, il est difficile de connecter ces sites au réseau électrique national. Cependant les inconvénients majeurs de cette énergie sont le prix du générateur qui reste encore élevé ainsi que le rendement énergétique relativement bas. Pour surmonter ces problèmes, deux voies sont souvent suivies:

- augmenter le rendement énergétique en adoptant des technologies de très haut niveau lors de la fabrication des cellules photovoltaïques,
- maximiser la puissance délivrée par le générateur.

Le présent travail est basé sur cette dernière voie.

Lors de la conception des systèmes photovoltaïques, on essaie souvent d'obtenir le maximum d'énergie solaire afin de répondre aux besoins énergétiques des divers récepteurs utilisés. Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet la caractéristique $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Ces variations climatiques entraînent la fluctuation du point de puissance maximale. A cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de rattraper à chaque fois le point de puissance maximale. Ces convertisseurs, connus sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) assurent le couplage entre le générateur PV et le récepteur en forçant le premier à délivrer sa puissance maximale.

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les phénomènes transitoires provoqués par la commande d'une part, et les perturbations au niveau du générateur et du récepteur d'autre part. L'étude de la stabilité du système permet de définir le domaine admissible de la commande et le comportement dynamique idéal.

Pour établir les équations électriques et mécaniques des différents éléments du système nous sommes passés par une étape de modélisation exploitant la technique bond graph. Cette technique apparaît actuellement comme un outil puissant pour la modélisation des systèmes dynamiques grâce à sa souplesse et à la possibilité d'une analyse comportementale directe du système.

Dans le premier chapitre, nous rappelons le principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque et nous traitons principalement son fonctionnement en MPPT.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation par bond graph des éléments constituant une classe de systèmes photovoltaïques objet de notre étude (génératrice PV, Convertisseurs DC/DC, motopompes DC). Lors de cette modélisation nous traitons plusieurs structures et configurations.

Le troisième chapitre fait l'objet d'une étude dynamique en linéaire des diverses configurations de systèmes photovoltaïques étudiées.

Dans le quatrième chapitre, nous élaborons une loi de commande non linéaire pour asservir chaque configuration et nous analysons la stabilité de chacune par une approche bond graph.

Enfin dans le cinquième chapitre nous présentons les divers éléments du dispositif expérimental réalisé et les résultats obtenus.

Ce dispositif expérimental est constitué de deux parties :

- système de caractérisation du champ photovoltaïque,
- système photovoltaïque constitué par un générateur PV couplé à une motopompe DC à travers un hacheur dévolteur. L'algorithme de commande non linéaire, développé dans le chapitre quatre est implanté sur le système expérimental. Cet algorithme permet un fonctionnement en MPPT.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire traite de l'étude par une approche bond graph d'une classe de systèmes photovoltaïques. Cette étude concerne la modélisation, l'analyse et la commande de quelques configurations comportant un générateur PV, des convertisseurs DC/DC et des motopompes DC.

La modélisation des différents éléments d'un système photovoltaïque est une étape indispensable qui doit précéder toute application de dimensionnement, d'identification ou de simulation. Cependant, ces systèmes PV sont de type hybride et leur modélisation est complexe. Pour cela nous avons proposé une approche unifiée de modélisation basée sur une technique graphique dite bond graph. Cette technique est complètement systématique et a une flexibilité suffisante pour pouvoir introduire différents composants dans le système.

Pour profiter des avantages de cette approche, nous avons élaboré, au deuxième chapitre, des modèles bonds graphs de diverses configurations de systèmes photovoltaïques. La procédure consiste à répartir les systèmes PV ; en trois parties essentielles : la source photovoltaïque, le convertisseur DC/DC et la motopompe DC. Pour chaque partie nous avons élaboré le modèle bond graph correspondant.

Pour le modèle bond graph relatif à la source PV, nous avons élaboré, dans une première étape, un modèle complet tenant compte des divers phénomènes physiques qui influent sur la qualité de la source PV. Dans une seconde étape, nous avons élaboré un modèle bond graph réduit afin de le rendre utilisable dans des applications d'analyse et de commande.

Pour les convertisseurs DC/DC, nous avons rappelé la modélisation par bond graph des éléments de commutation et les modèles bond graph moyens des convertisseurs DC/DC développés dans la littérature. Suite à ceci nous avons choisi une méthode qui nous a permis d'élaborer les modèles bonds graphs des divers convertisseurs DC/DC à utiliser.

Les modèles bond graph obtenus ont été exploités dans le troisième chapitre où nous avons effectué une étude dynamique en linéaire des configurations étudiées. Dans cette étude nous avons traité quatre configurations différentes. Cette étude nous a permis :

- d'étudier la stabilité de ces configurations,
- de montrer, par l'étude des zéros relatifs à chaque variables de sortie, la présence de réponses non minimales de phase pour quelques grandeurs telles que la vitesse et le courant de la motopompe DC. Cette non minimalité de phase peut entraîner des problèmes mécaniques au niveau de la machine et constituent des contraintes pour la commande de ces grandeurs.
- Les seules grandeurs qui ont présenté des réponses minimales de phase sont les grandeurs relatives à la source PV :
 - la tension du générateur PV : V_p pour les cas dévolteur et dévolteur-survolteur
 - le courant du générateur PV : I_p pour les cas survolteur et survolteur-dévolteur

Suite à cette étude dynamique, nous pouvons dire que la commande en boucle fermée, de la vitesse ou du couple moteur, ne peut être assurée qu'à travers les grandeurs relatives à la source photovoltaïque (V_p , et I_p).

Dans le quatrième chapitre, nous avons étudié la faisabilité d'une commande linéarisante entrée-sortie pour quelques configurations de systèmes PV. Dans cette étude, nous avons utilisé le concept de bond graph inverse de Gawthrop et les propositions de Junco pour déterminer par une approche bond graph, l'expression de la commande linéarisante entrée-sortie et la nature de la stabilité de la dynamique interne (dynamique des zéros).

Suite à cette étude nous avons remarqué que :

- La commande linéarisante est possible lorsque la sortie correspond à l'une des grandeurs relatives au générateur PV (tension V_p dans le cas d'utilisation d'un hacheur dévolteur et courant I_p dans le cas d'utilisation d'un hacheur survolteur). En effet, la commande des ces grandeurs est souvent utilisée pour asservir la puissance maximale délivrée par le générateur photovoltaïque.
- La commande linéarisante ayant comme sortie la vitesse du moteur DC, n'est pas conseillée à cause de la non minimalité de phase des grandeurs rendues inobservables par cette commande. Pour cela nous jugeons utile

d'asservir, en cas de besoin, la vitesse à travers une commande linéarisante obtenues pour V_p ou I_p .

- la facilité offerte par l'approche bond graph pour la déduction des résultats est considérable. En effet, suite à l'étude de la première configuration, nous avons pu déduire les résultats relatifs à d'autres configurations, directement sur bond graph. Ceci nous a permis de dégager des conclusions nécessaires d'une façon plus rapide que celle utilisée dans le troisième chapitre.

L'étude de quelques configurations multivariées de systèmes photovoltaïques utilisant la même approche est en cours. Les premiers résultats obtenus confirment la non minimalité de phase de diverses configurations traitées dans [Antit 85] [Antit et al 92].

Le cinquième chapitre est consacré pour la présentation de quelques résultats expérimentaux obtenus. Ces résultats sont relatifs aux dispositifs expérimentaux réalisés suivants :

- Banc de caractérisation de modules et champs photovoltaïques permettant de relever les caractéristiques I-V du générateur PV. Ces relevés sont utilisés pour identifier les paramètres du générateur PV nécessaires pour la phase de simulation effectuée dans les chapitres trois et quatre.
- Système photovoltaïque constitué d'un générateur PV couplé à une motopompe DC à travers un hacheur dévolteur. Suite à une implantation d'une loi de commande non linéaire, le système est stable et fonctionne en MPPT. Ce dispositif expérimental a été testé pour une application utilisant un hacheur dévolteur. Cependant ce dispositif permet aussi de tester d'autres types de configurations (divers types de : hacheurs, machines DC, lois de commande).

Suite à une recherche bibliographique exhaustive, nous n'avons pas trouvé d'application qui traite de l'implantation de lois de commande non linéaires pour des systèmes photovoltaïques. Les approches utilisées sont souvent linéaires ou utilisent des régulateur PI. L'inconvénient majeur de ces approches linéaires est l'application limitée à des faibles variations autour d'un point de fonctionnement.

Perspectives

Enfin, comme suite aux travaux présentés, nous envisageons :

- l'extension des résultats obtenus à des applications utilisant la conversion continu/alternatif permettant d'alimenter des moto-pompes asynchrones (de plus en plus utilisées dans le pompage photovoltaïque). Les premiers résultats obtenus concernent la modélisation par bond graph d'un système photovoltaïque constitué d'un générateur PV, hacheur dévolteur , onduleur, machine asynchrone. La simulation est actuellement en boucle ouverte. Le fonctionnement en boucle fermée est en cours d'étude.
- Profiter des avantages de la modélisation par bond graph pour élaborer un modèle bond graph global qui tiendrait compte du système hydraulique (pompe).
- Utiliser les capteurs de débit et de pression (installés), pour asservir à travers l'électrovanne le simulateur de puits. L'application serait intéressante dans le domaine de dimensionnement des systèmes photovoltaïques de pompage.
- Modéliser par bond graph une unité de dessalement par osmose inverse couplée à un générateur photovoltaïque à travers un onduleur. Pour cette unité, nous avons installé aussi plusieurs capteurs (débit, pression, conductivité...).
- Utiliser l'approche bond graph pour modéliser des systèmes photovoltaïques de réfrigération, de ventilation avec ou sans batteries accumulateurs.

BIBLIOGRAPHIE

[Abadie 94] V. Abadie, Commande des systèmes continus à entrées binaires. Application aux machines électriques, Thèse USTL , 1994.

[Abdin et al 99] E.S. Abdin , A.M. Osheiba, M.M. Khater, Modeling and optimal controllers design for a stand-alone photovoltaic-diesel generating unit. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 14, No 3, September 1999, pp 560-565.

[Abou el ela et al 87] M. Abou el ela, J.A. Roger, Onsite testing of large PV arrays using a portable I-V curve plotter, Proceedings of the photovoltaic solar energy conference, Florence, Italy, vol 1, pp 479-483, May 1987.

[Abuelnaga et al 96] M. Abuelnaga, A. M. A. Mahmoud, Performance characteristics of a dc shunt motor with a maximum power point tracker. Proceeding of ICEM'96, Spain, Vol 1, September 1996, pp 395-400.

[Alghuwainem 92] S.M. Alghuwainem, Steady- state performance of dc motors supplied from photovoltaic generators with step-up converter, IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 7, No 2 June 1992, pp 267-272.

[Alghuwainem 94] S.M. Alghuwainem, Matching of a dc motor to a photovoltaic generator using a step-up converter with a current-locked loop, IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 9, No 1 March 1994, pp 192-198.

[Alghuwainem 96] S.M. Alghuwainem, Performance analysis of a PV powered dc motor driving a 3-phase self-excited induction generator, IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 11, No 1 March 1996, pp 155-161.

[Alghuwainem 96] S.M. Alghuwainem, Speed control of a PV powered dc motor driving a self-excited 3-phase induction genertor for maximum utilization efficiency. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 11, No 4 December 1996, pp 768-773.

[Alghuwainem 97] S.M. Alghuwainem, A closed-form solution for the maximum-power operation point of a solar cell array, Solar Energy Materials and solar cells no 46, 1997, pp 249-257.

[Allard et al 97] B. Allard, H.Morel, Ph.Lautier, and J.M.Retif, Bond graphs for averaged modelling of power electronic converters. Proceeding of the SCS International Conference on Bond Graph Modeling (ICBGM'97). Phoenix, USA, Vol 29, No 1, pp 201-206.

[Allard et al 99] Allard. B,H.Morel, S..Ghedira, A. Ammous, Building advanced averaged models of power converters from switched bond graph representation. Proceeding of ICBGM'99 : 331-337.

[Altas et al 96] I. H. Altas, A novel on-line search algorithm for PV arrays. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 11, No 4 December 1996, pp 748-754.

[Andoulsi et al 94] R.Andoulsi, A. Sellami, H. Ezzaouia, M. Annabi, Système d'acquisition, de commande et de traitement pour un banc de caractérisation des panneaux photovoltaïques. Congrès Maghrébin de Génie Electrique, CMGE Rades, Tunisie. 1994.

[Andoulsi et al 99 a] R.Andoulsi, A. Mami, G. Dauphin-Tanguy, M. Annabi, Bond graph modelling of a photovoltaic generator coupled to a dc motor. Proceeding of ICBGM'99, pp 371-378.

[Andoulsi et al 99 b] R.Andoulsi, A. Mami, G. Dauphin-Tanguy, M. Annabi, Modelling and simulation by bond graph technique of a DC motor fed from a photovoltaic source via MPPT boost converter. Proceeding of CSSC'99, pp4181-4187.

[Anis et al 94] W. Anis, H.M.B. Metwally, Dynamic performance of directly coupled PV pumping system. Solar Energy , Vol 53, No 4, 1994, pp 369-377.

[Antit 92] M. Antit, M. Ben Rejeb, Sur le comportement dynamique de machines électriques alimentées par un générateur photovoltaïque. 12^{ème} journées tunisiennes d'électrotechnique et d'automatique, Tunis, 1992.

[Antit 85] Etude des lois de commandes de convertisseurs statiques associant des récepteurs à des générateurs de puissance finie. Mémoire de DEA, ENSET de Tunis 1985.

[Appelbaum 81] J. Appelbaum, Performance analysis of dc motor-photovoltaic converter system-II. Solar Energy, Vol 27, No 5, pp 421-431.

[Appelbaum 86] J. Appelbaum, Starting and steady-state characteristics of dc motors powered by solar cell generators. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol EC-1, No 1, March 1986, pp 15-25.

[Appelbaum 87] J. Appelbaum, The quality of load matching in a direct-coupling photovoltaic system, IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 2, No 4, December 1987, pp 534-541.

[Appelbaum et al 89] J. Appelbaum, M.S. Sarma, The operation of permanent magnet dc motors powered by a common source of solar cells. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 4, No 4, December 1989, pp 635-642.

[Appelbaum 89] J. Appelbaum, The operation of loads powered by separate sources or by a common source of solar cells. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 4, No 3, September 1989, pp 351-357.

[Altas et al 96] I.H. Altas, A.M. Sharaf, A novel on-line search algorithm for PV Arrays, IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 11, No 4 December 1996, pp 748-754.

[Barlaud 83] M. Barlaud , Etude dynamique du couplage de générateurs de puissance finie à des récepteurs électromagnétiques : Performance dynamiques selon les structures et la valeur des paramètres, Détermination des lois de commandes optimales. Thèse d'Etat, Université de Paris XII 1983.

[Bausière et al 92] R. Bausière, F. Labrique, G. Séguier, Le convertisseur de l'électronique de puissance, vol 3, Technique et documentation – Lavoisier – 1987, nouveau tirage 1992

[Bchini 88] A. Bchini, Etude et réalisation d'un réseau microinformatique destiné à la gestion de l'énergie d'un système multigénérateurs- multirécepteurs. Thèse ENSET de Tunis 1988.

[Ben Hadjbraiek 95] E. Ben Hadjbraiek, Développement de méthodes analytiques pour l'étude et la commande de processus non linéaires. Thèse d'Etat es sciences Génie électrique, ENIT de Tunis 1995.

[Benjamin 87] C.K. Benjamin, Automatic control systems. printice-Hall, Englewood cliffs,N.J.

[Ben Naceur et al 92] H. Ben Naceur, M. Annabi, étude dynamique du couplage d'un générateur photovoltaïque à un moteur à courant continu. 10^{ème} journées tunisiennes d'électrotechnique et d'automatique Tunis, 1992.

[Ben Naceur et al 94] H. Ben Naceur, R.Dhifaoui, M. Annabi, Compensation par retour d'état de la dynamique d'un système générateur photovoltaïque, convertisseur et moteur à courant continu. CMGE'94 Tunis, 1994, pp 50-57.

[Ben Naceur 99] H. Ben Naceur, Contribution à l'étude des configurations électriques comportant un générateur photovoltaïque, Thèse ENIT de Tunis 1999.

[Ben Slama 86] N. Ben Slama, Gestion optimale de l'énergie de systèmes basés sur les énergies renouvelables, étude et réalisation, Thèse ENSET de Tunis 1986.

[Bertrand et al 1997] Bertrand , J.C. Sueur, G. Dauphin-Tangy. Bond Graph for Modelling and Control Structural Analysis Tools for the design of input output Decoupling State Feedbacks. Proceeding ICBGM'97/ Simul.Series 29 :1.

[Besbes 95] K. Besbes, L'étude et la modélisation comportementale de l'IGBT. Thèse d'Etat es sciences physiques , Faculté des Sciences de Tunis 1995.

[Bhat et al 87] S. R. Bhat, A. Pittet, B. S. Sonde, Performance optimization of induction motor-pump system using photovoltaic energy source, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol IA-23, No 6 November/December 1987, pp 385-394.

[Blaesser 97] G.Blaesser , Using the PM97 scopemeter with a capacitor load for measurements of the I-V characteristics of the PV arrays, Conférence renewable energy, Italy 1997.

[Borne 92] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis. Modélisation et identification des processus. Editions Technip, 1992.

[Braunstein et al 77] A. Braunstein, J. Bany, J. Appelbaum, Determination of solar cell equation parameters from empirical data. Energy conversion Vol 17, pp 1-6, 1977.

[Braunstein et al 81] A. Braunstein, A. Kornfeld, Analysis of solar powered electric water pumps. Solar Energy Vol 27, No 3, 1981, pp 235-240.

[Breedveld 84] P. Breedveld, Essential gyrators and equivalent rules for 3-port junction structure. Journal of Franklin Institute, 1984, Vol 318, No 2, pp 77-89.

[Bryant et al 75] F. J. Bryant, R. W. Glew, Analysis of the current-voltage characteristics of cadmium sulphide solar cells under varying light intensities, Energy Conversion, Vol 14, pp 129-133, 1975.

[Buisson 93] J. Buisson, Analysis and characterisation of hybrid systems with bond-graphs. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 1993, Vol 1, pp 264-269.

[Buisson et al 01] J. Buisson, H. Cormerais, P.Y. Richard, Bond graph modeling of power converters with switches commutating by pairs. Proceeding of ICBGM'01 : 179 - 184.

[Chaari 89] A. Chaari, Sur l'identification et la commande adaptative : application à un groupe moto-alternateur, Thèse ENSET de Tunis 1989.

[Cherif 97] A. Cherif, Modélisation dynamique d'une unité de réfrigération solaire, Thèse Université de Tunis II, ENIT de Tunis 1997.

[Chiang et al 98] S. J. Chiang, C. Y. Yen, Residential photovoltaic energy storage system, IEEE Transaction on Industrial Electronics Vol 45, No 3 December 1998, pp 385-394.

[Chiasson et al 93] J. Chiasson, M. Bodson, Non linear control of shunt DC motor, IEEE Transaction on Automatic Control, Vol 38, No 11 November 1993, pp 1662-1666.

[Chung et al 94] H. S. h. Chung, A. Ioinovici, Fast computed-aided simulation of switching power regulators based on progressive analysis of the switches' state, IEEE Transaction on Power Electronics. Vol 9, No 2, March 1994, pp 206-212

[Dauphin-tanguy et al 89] G. Dauphin-Tanguy, C. Sueur C. Rombaut, Bond graph approach of commutation phenomena, symposium IFAC/IMACS/IFORS, AIPAC89, Nancy, Tome 1, pp 297-301, 1989.

[Dauphin-tanguy et al 93] G. Dauphin-Tanguy, C. Rombaut, Why a unique causality in the elementary commutation cell bond graph model of a power electronics converter. Proceeding IEE SMC Conference, Vol. 1. pp. 257-263, Le Touquet 1993.

[Dauphin-Tanguy et al 95] G. Dauphin-Tanguy, Lj.T. Grujic, 1995, Asymptotic stability via energy and power. Part II: bond graph bridging for non linear systems, IFAC System,Structure and Control, Nantes (France), pp 96-101.

[Dauphin-Tanguy et al 00] Les bond graphs , ouvrage dirigé par G.Dauphin-Tanguy. Paris Hermès Science Publications, 2000.

[Descusse 93] J. Descusse, Systèmes non linéaires, commande, la linéarisation entrées-sorties par difféomorphisme et bouclage , pp 45-69, ouvrage collectif réalisé dans le cadre du groupe non linéaire DRET/AFCEC, coordonné par A. Fossard et D.Normand-Cyrot, Editions MASSON, 1993

[Dijk et al 95] E. V. Dijk, H. J.N. Spruijt, D. M. O'Sullivan, J. Ben klaassens, PWM-Switch modeling of DC-DC converters. IEEE Transaction on Power Electronics. Vol 10, No 6, November 1995, pp 659-664.

[Ducreux 94] J.P. Ducreux, Modélisation des associations convertisseurs - Machines pour le calcul des pertes électromagnétiques dans les moteurs à grande vitesse, Thèse USTL , 1994.

[Faldella et al 91] E. Faldella, G.C. Cardinali, P.U. Calzolari, Architectural an design issues on optimal management of photovoltaic pumping systems, IEEE Transaction on Industrial Electronics Vol 38, No 5 October 1991, pp 385-392.

[Fam et al 88] W.Z. Fam, Dynamic performance of a DC shunt motor connected to a photovoltaic array. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 3, No 3, Septembre 1988, pp 613-617.

[Fotsu Ngwomp et al 97] R. Fotsu Ngwomp, S. Scavarda, D. Thomasset,' Structural invertibility and minimal inversion of multivariable linear systems. A bond graph approach'. Proceeding of ICBGM'97, pp 109-114.

[Garcia-Gomez 97] Garcia-Gomez 97, Approche bond graph pour la modélisation des effets thermiques dans les composant de commutation en électronique de puissance, Thèse USTL , 1997.

[Garcia-Gomez et al 97a] J. Garcia-Gomez, G. Dauphin-Tanguy, C.Rombaut, A bond graph approach for modelling switching losses of power semiconductor devices. Proceeding of ICBGM'97, pp 207-211.

[Garcia-Gomez et al 97b] J. Garcia-Gomez, S. Rimaux, M. Degado, Use of bond graphs to determine a passivity-based model for the boost converter. Proceeding of ESS97, pp 142-146 october 1997 Germany.

[Garcia-Gomez et al 99] J. Garcia-Gomez, G. Dauphin-Tanguy, C.Rombaut, Averaged bond graph models of dc/dc power converters. Proceeding of ICBGM'99, pp 338-343.

[Gawthrop 95] P.Gawthrop, Bicausal Bond graphs, Proceeding of ICBGM'95, pp 83-88.

[Gawthrop et al 96] P.Gawthrop, L. SMITH, Metamodelling: bond graphs and dynamic systems, 1996, Printice-Hall.

[Gupta et al 95] S. Hupta, M.Chandrashekar, A unified approach to modelling photovoltaic powered systems. Solar Energy , Vol 55, No 4, 1995, pp 267-285.

[Hamdi 91] L. Hamdi, Onduleur autonome triphasé compact asservi pour des générateurs de puissance finie, Thèse AIX-Marseille III, 1991.

[Herrmann et al 87] B. Herrmann, H.Karl, E.Kopf, G.Lehner., Realistic indoor testing of photovoltaic water pumping systems. Solar Energy , Vol 38, No 4, 1987, pp 275-279.

[Holderbaum 99] W. Holderbaum, Commande des systèmes à entrées booléennes, Thèse USTL , 1999.

[Hua et al 98] C. Hua, J. Lin, C. Shen, Implementation of DSP controlled photovoltaic system with peak power tracking, IEEE Transactions on Industrial Electronics Vol 45, No 1 February 1998, pp 99-107.

[Isidori 89] A. Isidori, Non-linear control system- An introduction, 2nd edit, springer verlag, New York, 1989.

[Isidori 00] A. Isidori, A tool for semiglobal stabilization of uncertain non-minimum-phase nonlinear systems via output feedback. IEEE Transaction on Automatic control Vol 45, No 10 October 2000, pp 1817-1827.

[Johan et al 97] H. Johan, R. Enslin, Integrated photovoltaic maximum power point tracking converter, IEEE Transaction on Industrial Electronics Vol 44, No 6 December 1991, pp 769-773.

[Jraidi 93] M. Jraidi, Contribution à la caractérisation et à la modélisation des systèmes photovoltaïques, DEA ENIT de Tunis 1993.

[Junco 1993] Junco. Sergio, Stability Analysis and Stabilizing Control Synthesis via Lyapunov's second Method Directly on Bond Graph. Proceeding of IECON'99, pp. 2065-2069, Maui, HI, Nov, 17-20.

[Junco 00] Junco. Sergio, Linéarisation exacte entrée-sortie et stabilité de la dynamique des zéros directement sur bond graph des systèmes non linéaires. Actes de CIFA 2000, Première conférence Internationale Francophone d'automatique, 4-7 juillet 2000, Lille, France.

[Junco 01_a] Junco. Sergio, A bond graph approach to control systems synthesis,. Proceeding of ICBGM'01, 2001, pp 125-130.

[Junco 01_b] Junco. Sergio, Lyapunov's Second Method and feedback Stabilization Directly on Bond Graphs,. Proceeding of ICBGM'01, 2001, pp 137-142.

[Karnopp 77] D. Karnopp, Power and energy in Linearised physical systems, Journal of Frankline institute, 1977, Vol 303, No 1, 86-98.

[Karnopp et al 90] D.Karnopp, D. Margolis, R.C. Rosenberg, Systems dynamics : a unified Approach, 2nd ed. John Wiley and son,1990.

[Khouzam et al 91] K. Khouzam, L. Khouzam, P. Groumpos, Optimum matching of ohmic loads to the photovoltaic array, Solar Energy Vol 46, No 2, 1991, pp 101-108.

[Khouzam.K et al 93] K. khouzam, L. Khouzam, Optimum matching of direct-coupled electromechanical loads to a photovoltaic generator. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 8, No 3, September 1993, pp 343-349.

[Kravaris 88] C. kravaris, Input/Output linearization: A nonlinear analog of placing poles at process zeros, AICHE Journal Vol 34, No 11, November 1988, pp 1803-1812.

[Kravaris et al 90] C. kravaris, M. Soroush, Synthesis of multivariable nonlinear controllers by Input/Output linearization. AICHE Journal Vol 36, No 2, February 1990, pp 249-264.

[Laugier et al 81] A. Laugier, J. A. Roger, Les photopiles solaires : du matériau au dispositif du dispositif aux applications. Technique et documentation. Paris Cedex 08, 1981.

[Levine 93] J. Levine, Systèmes non linéaires, commande, la linéarisation entrées-sorties par difféomorphisme et bouclage , pp 70-109, ouvrage collectif réalisé dans le cadre du groupe non linéaire DRET/AFCEC, coordonné par A. Fossard et D.Normand-Cyrot, Editions MASSON, 1993

[Loxsom 94] F. Loxsom, P. Durongkaverroj, Estimating the performance of photovoltaic pumping system. Solar Energy Vol 52, No 2, 1994, pp 215-219.

[Madansure 95] V.N. Madansure, S. Banerjee, A. Mukherjee, P.K. Chattopadhyay, Modelling and simulation of PV powered intermittent load systems by bond graph technique. Solar Energy , Vol 55, No 5, pp 367-375.

[Madansure 97] V.N. Madansure, S. Banerjee, A. Mukherjee, P.K. Chattopadhyay, Bond graph modelling and simulation of spice-pounding machines fed from a photovoltaic source. International Journal of energy research, Vol 21, pp 683-694.

[Mami 92] A. Mami, Etude d'un bilan-mètre portable pour le test in-situ d'installations photovoltaïques, Thèse AIX-Marseille III, 1992.

[Mansouri 99] M.N. Mansouri, Contribution à la commande automatisée d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau, Thèse Université de Tunis II , ENIT de Tunis 1999.

[Mehta et al 98] S.Mehta, J. Chiasson, Non linear control of a series DC motor : Theory and experiment, IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol, 45, No 1 February 1998, pp 134-141.

[Michel et al 95] P. Michel, B. Masckke, G. Manesse, Bond graph enumeration of the configuration of power static converters. Proceeding of ICBGM'95 : 251-256.

[Miliias-Argitis et al 98] J. Miliias-Argitis, Th.Zacharias, Transient phenomena of RLC circuits-the photovoltaic input, Solar Energy Materials and solar cells no 55, 1998, pp 363-378.

[Muljadi 97] E.Muljadi, PV water pumping with a peak-power tracker using a simple six-step square-wave inverter, IEEE Transaction on Industry Applications Vol 33, No 3 May / June 1991, pp 714-721.

[Narat 87] P. Narat, Contrôle et observation d'état d'une machine asynchrone associée à un convertisseur statique . Application à un groupe motopompe alimenté par un générateur photovoltaïque, Thèse INPT, 1987.

[Osman et al 97] M.G.Osman, M.E. El-Alami, A non linear simulation technique for designing photovoltaic water pumping, Al-Azhar engineering fifth international conference, Egypt, December 19-22, 1997.

[Olorunfemi 91] O. Olorunfemi, Analysis of current source induction motor drive fed from photovoltaic energy source. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 6, No 6, March 1991, pp 99-106 .

[Payenter 1961], M. Payenter Analysis and design of engineering system, MIT Press, 1961.

[Pulfrey et al 87].D.L Pulfrey, P.R.B.Ward, W.G. Dunford, A photovoltaic -powered system for medium-head pumping. Solar Energy, 1987, Vol 38, No 4, pp 255-265.

[Quaschnig 96] Quaschnig.V, R. Hanitsch, Numerical simulation of current-voltage characteristics of photovoltaic systems with shaded solar cells. Solar Energy, 1996, Vol 56, No 6, pp 513-520.

[Rahmani 93] A.Rahmani, Etude structurelles de systèmes physiques lineaires l'approche bond graph, Thèse USTL 1993, France.

[Rahmani 94] A. Rahmani, C. Sueur, G. Dauphin-Tanguy , Pole assignement for systems modelled by bond graph, J of Franklin Institute, 1994, 331B(3), pp.299-312.

[Raharijaona 91] J. Raharijaona, Etude du fonctionnement et commande numérique en langage C d'un groupe de pompage photovoltaïque sans balais, Thèse INPT, 1991.

[Rimaux 95] S.Rimaux, Etude des propriétés structurelles de certaines classes de systèmes physiques non lineaires modélisés par bond graph, Thèse USTL 1995, France.

[R0 98 et al] K. Ro, S. Rahman, Tow-loop controller for maximizing performance of a grid connected photovoltaic-fuel cell hybrid power plant. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 13, No 3, September 1988, pp 276-281.

[Rosenberg 83 et al] R.C. Rosenberg, D.Karnopp, Introduction to physical system dynamics. Series in mechanical engineering, Mac Graw Hill, 1983.

[Saied 88] M.M. Saied, Matching of dc motors to photovoltaic generators for maximum daily gross mechanical energy. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 3, No 3, September 1988, pp 465-471.

[Saied et al 89] M.M. Saied, M.G. Jaboori., Optimal solar array configuration and dc motor field parameters for maximum annual output mechanical energy. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 4, No 3, September 1989, pp 459-464.

[Saied et al 91] M.M. Saied, A.A. Hanafy, M.A.El-Gabaly, A.M. Sharaf. Optimal design parameters for a PV array coupled to a dc motor via a dc-dc transformer. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 6, No 4, December 1991, pp 593-598.

[Saïd 86] N. Saïd, Influence de la température sur les paramètres électrique, caractéristique des photopiles au silicium polycristallin : modélisation et analyse par thermographie infrarouge, Thèse AIX-Marseille III, 1986, France.

[Salameh et al 90] Z. Salameh, D. Taylor, Step-up maximum power point tracker for photovoltaic arrays. Solar Energy, 1990, Vol 44, No 1, pp 57-61.

[Salameh et al 90] Z. Salameh, A.K. Mulpur, F. Dagher, Two-stage electrical array reconfiguration controller for PV-powered water pump. Solar Energy Vol 44, No 1, 1990, pp 51-56.

[Salameh et al 91] Z. Salameh, A.K. Mulpur, F. Dagher, W.A. Lynch, Step-down maximum power point tracker for photovoltaic systems. Solar Energy Vol 46, No 5, 1991, pp 279-282.

[Sellami et al 97] A. Sellami,. A. Karoui, H. Ezzaouia, 15 th IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and applied Mathématiques, Berlin (Germany).1997, Vol. 5, p.749-754.

[Sellami et al 98] A. Sellami,. F.Ghodbane, R. Andoulsi, An electrical tester for PV Modules Revue: Renewable Energy, vol 15-16/4003, pp.1717-1719, September 1998

[Singer et al 93] S. Singer, J. Appelbaum, Starting characteristics of direct currents motors powered by solar cells. IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 8, No 1, March 1993, pp 47-53.

[Sira-Ramirez et al 1996] H. Sira-Ramirez , M. Delgado de Nieto, A lagrangian Approach to Average Modelling of Pulsewidth-Modulation Controlled DC to DC Power Converters. Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental theory and Applications. Vol 43, N°5, may 1996. pp. 427-430. 1996.

[Slama-Belkhodja 97] I. Slama-Belkhodja 97, Commande d'un variateur de vitesse avec machine asynchrone, Thèse d'état , ENIT, 1997.

[Slotine et al 91] J. J. E.Slotine, W.Li, Applied nonlinear control, printice-hall international editions, Englewood Cliffs, New Jersey 1991.

[Soroush et al 92] M. Soroush ,C. kravaris, nonlinear control of a batch polymerisation reactor: an experimental study. AICHE Journal Vol 38, No 9, September 1992, pp 1429-1448.

[Suehrcke et al 97] Suehrcke.H, J.Appelbaum, B. Reshef, Modelling a permanent magnet DV motor / centrifugal pump assembly in a photovoltaic energy system. Solar Energy , Vol 59, No 1-3, 1997, pp 37-42.

[Sueur 89] C. Sueur, Structural controllability/observability of linear systems represented by bond graph, J of Franklin Institute,1989, 326(6), pp.869-883.

[Sueur 90] C. Sueur, Contribution à la modélisation et l'analyse des systèmes dynamiques par une approche Bond-Graph. Application aux systèmes polyarticulés plans à segments flexibles, Thèse USTL, 1990.

[Sueur 91] C. Sueur, G. Dauphin-Tanguy, Bond graph approach for Structural Analysis of MIMO linear systems, , J of Franklin Institute, 1991, 328(1), pp.55-70.

[Sun et al 94] X.D. Sun, T. Clarke , Advanced aircraft flight control using nonlinear inverse dynamics , IEE Proc, control Theory Appl, vol 141, No 6 November 1994, pp 418-426.

[Takashi et al 95] H. Takashi, K. Shinichi, I. Tomofumi, Evaluation of neural network based real time maximum power tracking controller for PV system, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol 10, No 3 September 1995, pp 543-548.

[Takashi et al 97] H. Takashi, K. Ken, Neural Network based estimation of maximum power generation from PV module using environmental Information, IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 12, No 3 September 1997, pp 241-247.

[Teng et al 89] K.F. Teng, P. Wu, PV module characterization using Q-R decomposition based on the least square method. IEEE Transaction on Industrials electronics Vol 36, No 1, February 1989, pp 71-75.

[Thoma 91] J.U. Thoma, Simulation by bond graph. Springer Verlag, 1991.

[Wasynezuk 83] O. Wasynezuk, Dynamic behaviour of a class of photovoltaic power systems. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol 9, 1983, pp 3031-3037.

[Xia et al 99] X. Xia , S. Scavarda,' Calculation of the transfer function between two internal variables of a linear and time invariant SISO system in bond graph representation, 'Proceeding of ICBGM'99, pp 123-128.

[Yao et al 94] Y. Yao, P. Bustamante, R. S. Ramshaw, Improvement of induction motor drive systems supplied by photovoltaic arrays with frequency control, IEEE Transaction on Energy Conversion Vol 9, No 2, June 1994, pp 256-262.