



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE CONSTANTINE 1
FACULTE DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

N° de série :
N° d'ordre :

Thèse

Pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : MODELISATION ET COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUE

Présenté par :
BORNI ABDELHALIM
Magistère en Electrotechnique

**ETUDE ET OPTIMISATION D'UN MULTI SYSTEME
HYBRIDE DE CONVERSION D'ENERGIE ELECTRIQUE**

Soutenu le : 12 / 03 / 2015

Devant le jury :

Président :	Bouزيد Aissa	Prof	Université Mentouri Constantine1
Rapporteur :	Chenni Rachid	Prof	Université Mentouri Constantine1
Examineurs:	Azoui Boubaker	Prof	Université de Batna
	Bentounsi Amar	Prof	Ecole Nationale Polytechnique de Constantine
	Labeled Djamel	M.C.A	Université Mentouri Constantine1

Avant propos

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du laboratoire d'électrotechnique du département d'électrotechnique, faculté des sciences de l'ingénieur de l'université de Mentouri Constantine, sous la direction du monsieur **Chenni Rachid**, professeur au département d'électrotechnique de l'université Constantine1, à qui je présente l'expression de ma profonde gratitude pour tous les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigué pendant toute la durée de ce travail.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur **Bouzi Aissa**, professeur au département d'électrotechnique de l'université Constantine1, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant la présidence du jury de cette thèse.

Mes vifs remerciements vont aussi à monsieur **Azoui Boubaker**, professeur au département d'électrotechnique de l'université de Batna, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à monsieur **Bentounsi Amar**, professeur Ecole Nationale Polytechnique de Constantine, pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail en me faisant l'honneur de participer à ce jury.

Je suis très reconnaissant également à monsieur **Labed Djamel**, maître de conférences A au département d'électrotechnique de l'université Constantine1, pour l'intérêt qu'il a bien voulu porter à ce travail en acceptant de siéger dans ce jury.

Je suis très reconnaissant également à monsieur **Zarour Laid**, maître de conférences au département d'électrotechnique de l'université de Mentouri Constantine1 pour l'aide qu'il m'a apporté durant toute la préparation de cette thèse.

Avant propos

A toutes les personnes (dont le nombre est très élevé pour les citer toutes ici), qui ont contribué de près ou de loin, directement ou indirectement à l'aboutissement à ce travail, je les remercie tous, particulièrement ma famille et tous mes amis.

Enfin, je ne pourrais terminer ces remerciements sans une pensée à l'ensemble de mes enseignants qui sont à l'origine de tout mon savoir.

Introduction générale	01
Chapitre I	<i>Etat de l'art des systèmes d'énergies hybride</i>
I.1.Introduction.....	04
I.2.production mondiale d'électricité.....	04
I.3. Systèmes hybrides	07
I.3.1. Définition	07
I.3.2. Classification.....	07
I.3.2.1. Le régime du fonctionnement	07
I.3.2.2. La structure du système hybride	08
I.3.3. Etudes des structures de systèmes hybrides	08
I.3.3.1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle	09
I.3.3.1.1. Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle	09
I.3.3.1.2. Systèmes éolien/source conventionnelle.....	12
I.3.3.1.3. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel	12
I.3.3.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle.....	13
I.3.3.2.1. Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage.....	13
I.3.3.2.2. Système hybride éolien/stockage	13
I.3.3.2.3. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage.....	14
I.3.3.2.4. Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage	15
I.4. Topologies des systèmes électriques hybrides	15
I.4.1. Couplage de bus DC	15
I.4.2. Couplage de bus AC	15
I.5. Modélisation des éléments du système	16
I.5.1 Energie solaire en Algérie.....	17
I.5.2. Les gisements éoliens en Algérie.....	17
I.6. Systèmes de stockage	18
I.6.1. Les Batteries.....	18

I.6.2. Les piles à combustible	19
I.7. Les convertisseur des énergies électrique	20
I.8. Charges	20
I.9. Système de supervision.....	20
I.10. Conclusions.....	22
Chapitre II Modélisations et commandes des sous-systèmes d'énergie hybrides	
II.1. Introduction	23
II.2. Description d'un système hybride	23
II.3.Énergie éolienne	24
II.3.1. Étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne	23
II.3.1.1. Présentation	24
II.3.2. Modélisation du système de conversion de l'énergie éolienne	25
II.3.2.1. Modélisation de la turbine	25
II.3.2.5. Approximation numérique.....	26
II.2.2.2. Modèle du multiplicateur et l'équation dynamique de l'arbre	27
II.3.2.4.Maximisation de la puissance par la vitesse de rotation.....	28
II.3.3. Générateur à aimant permanent.....	29
-Les avantages des générateurs à aimant permanent	29
-Les inconvénients sont les suivants.....	30
II.3.3.1. Modèle de la machine dans le repère de <i>Park</i>	30
II.3.3.2. Le couple électromagnétique.....	31
II.3.4. Redresseur triphasé à diodes.....	31
II.3.5. Model de convertisseur DC-DC avec Algorithme de contrôle.....	32
II .3.5.1. Modèle de convertisseur buck réversible et réglage la tension de bus continu	34
II.3.5.2. Modélisation de l'onduleur triphasé	35
II.3.5.3. Modèle de l'onduleur et modulation de largeur d'impulsion (MLI)	36
II.3.6.Puissance active et réactive dans le repère $d q$	37

II.3.7. Stratégie de contrôle d'onduleur.....	38
II.4. Energie Photovoltaïque.....	40
II.4.1. Le principe de conversion photovoltaïque.....	41
II.4.2. Modèle à paramètres constants	42
II.4.3. Caractéristiques des cellules photovoltaïques	43
II.4.4. Effet de l'éclairement et de la température.....	44
II.5. Energie chimique (Piles à combustible)	44
II.5.1.Principe de fonctionnement	44
II.5.2. Circuit équivalent de la pile à combustible.....	46
II.5.2.1. Potentiel thermodynamique-cellule de tension réversible.....	47
II.5.2.2. Chute de tension d'activation	47
II.5.2.3. Chute de tension ohmique	48
II.5.2.4.Chute de tension de concentration.....	49
II.5.3. La puissance et l'efficacité de la piles à combustible	49
II.5.4. Caractéristiques et modélisation des piles à combustible.....	50
II.5.4.1.Caractéristiques de la piles à combustible	50
II.6. Description du système hybride.....	51
II.6.1. Électronique de puissance et de contrôle.....	52
II.6.1.1. Topologie du circuit d'alimentation	52
II.6.1.2. Le contrôle du hacheur Boost de la bile combustible.....	53
II.7. Résultats de simulation.....	53
A. Générateur éolienne.....	54
B. Générateur photovoltaïque.....	55
C. la pile à combustible	56
D. Coté onduleur réseau	57
II.8. Conclusion	60

Chapitre III

Optimisation du système par logique floue

III.1. Introduction	61
III.2. Principes de la logique floue	61
III.2.1. Variables linguistiques	63
III.2.2. Opérateurs sur les ensembles flous.....	63
<i>Définition 1 : Union (Disjonction)</i>	<i>64</i>
<i>Définition 2 : Intersection (Conjonction)</i>	<i>64</i>
<i>Définition 3 : Complémentation</i>	<i>64</i>
<i>Définition 4 : Produit Cartésien.....</i>	<i>64</i>
<i>Définition 5 : Relation Floue</i>	<i>64</i>
<i>Définition 6 : Composition des Règles Floues</i>	<i>65</i>
III.2.3. Fonctions d'appartenance	65
III.2.4. Propositions floues	66
- <i>Propositions floues élémentaires</i>	<i>66</i>
- <i>Propositions floues générales</i>	<i>66</i>
III.3. Raisonnement en logique floue	66
III.3.1. Implication floue	66
- <i>Implication de Mamdani</i>	<i>66</i>
- <i>Implication de Larsen</i>	<i>66</i>
III.3.2. Modus ponens généralise	67
III.3.3. Modus tolless généralise	67
III.4. Réglage et commande de la logique floue	67
III.5. Configuration interne d'un régulateur par logique floue.....	67
III.5.1. Base des règles	68
III.5.2. Logique de prise de décision (Inférence Floue)	68
- <i>Méthode d'inférence max-min (Méthode de Mamdani).....</i>	<i>69</i>
- <i>Méthode de Sugeno</i>	<i>69</i>

Sommaire

III.5.3. Interface de fuzzification	69
III.5.4. Interface de defuzzification.....	69
- <i>Méthode du maximum</i>	70
- <i>Méthode de la moyenne des maxima</i>	70
- <i>Méthode du centre de gravité</i>	70
- <i>Méthode des hauteurs pondérées</i>	70
III.6. Avantages et inconvénients de la logique floue	71
III.6.1. <i>Les avantages de la commande par logique floue</i>	71
III.6.2. <i>Les inconvénients de la commande par logique floue</i>	71
III.7. Application de la logique floue	72
III.7.1. Optimisation du système d'éolienne	72
III.7.1.1. Synthèse du régulateur floue	72
III.7.1.1.1. Loi de commande	72
III.7.1.2. Synthèse du régulateur floue –PI	73
III.7.1.2.1. Conception d'un RLF - PI	73
III.7.2. Optimisation de puissance à cotée du système photovoltaïque.....	75
III.7.2.1 Optimisation par la technique de logique floue.....	75
III .7.2.2. Synthèse du régulateur	77
III.7.2.3 Loi de commande	78
III.8 Résultats de simulations	79
A. Générateur éolienne.....	79
B. Générateur photovoltaïque.....	80
C. la pile à combustible	81
D. Coté onduleur réseau	82
III.9 Conclusion.....	85

<i>Chapitre IV</i>	<i>Optimisation du système par mode glissant</i>
IV.1.Introduction	86
IV.2. Théorie de la commande par mode de glissement	86
IV.2.1 Systèmes à structure variable	86
IV.3. Conception de la commande par mode de glissement	87
IV.3.1. Choix de la surface de glissement	87
IV.3.2. Conditions de convergence et d'existence	88
IV.3.2 .1. La fonction discrète de commutation.....	88
IV.3.2 .2. La fonction de Lyapunov.....	89
IV.3.3. Calcul de la commande	89
IV.3.4.1. Régime de glissement réel.....	91
IV.3.4.1. Phénomène de Chattering.....	92
IV.3.4.2. Solutions pour atténuer le phénomène de réticence(Chattering)	92
IV.3.4.2.1. Solution de couche limite.....	92
- Commande douce à deux seuils	93
- Commande douce à un seul seuil.....	93
IV.3.4.2.2. Solution par des modes glissants d'ordre supérieur.....	93
IV.4. Application du mode glissant.....	94
IV.4.1. réglage de la vitesse d'éolienne par mode glissement	94
IV.4.2. Conception de mode glissement et algorithm de commande	95
IV.4.3. Modélisation du système hybride raccordée au réseau triphasé	96
IV.4.4. Conception du dispositif de commande intégral en mode glissant	98
IV.5. Maximisation de la puissance de générateur photovoltaïque par mode glissant	100
-Conditions de convergence et d'existence	102
IV.6. Résultat de simulation	104
A. Générateur éolienne.....	104
B. Générateur photovoltaïque.....	105

Sommaire

C. la pile à combustible	106
D. Coté onduleur réseau	107
IV.7. Conclusions	109
Conclusion générale	110
Références	112
Annexe	119

Chapitre I

Etat de l'art des systèmes d'énergies hybride

Figure I.1. La production mondiale nette d'électricité, 2007-2035	04
Figure I.2. La production et la consommation d'énergie électrique totale dans le monde	05
Figure I.3. Installation photovoltaïques raccordée au réseau et hors réseau électrique	06
Figure I.4. Croissance d'éolienne et la capacité installée dans le monde	06
Figure I.5. Classification des systèmes hybrides	08
Figure I.6. Système hybride avec connexion série	09
Figure I.7. Système hybride à commutation	11
Figure I.8. Système hybride à connexion parallèle	11
Figure. I.8. Système hybride avec connexion série.....	16
Figure. I.9. Carte annuelle des irradiations solaire de l'Algérie	17
Figure. I.10. Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol	18
Figure I.11 : Un système d'énergie hybride	20

Chapitre II

Modélisations et commandes des sous-systèmes d'énergie hybrides

Figure II.1. Un multi système d'énergie hybride	24
Figure II.2. Un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable	25
Figure II.3. Schéma de la turbine éolienne.....	25
Figure II.4. Résultats obtenus à partir de l'approximation numérique.....	26
Figure II.5. Schéma bloc du modèle de la turbine.....	28
Figure II.6. Boucle de maximisation de la vitesse	29
Figure II.7. Système de production d'énergie éolienne avec redresseur et hacheur.....	32
Figure II.8. Schéma de hacheur boost	32
Figure II.9. Schéma de contrôle	33
Figure II.10. Hacheur parallèle réversible en courant.....	33
Figure II.11. Schéma d'un onduleur MLI triphasé.....	36
Figure II.12. Signal de porteuse et les signaux de référence	37

Liste des figures

Figure II.13. Tension simple d'une phase à la sortie de l'onduleur	37
Figure II.14. Modèle de réseau dans le repère $d q$	37
Figure II.15. Dispositif de conversion côté réseau	39
Figure II.16. Schéma de la commande entre l'onduleur et le réseau	40
Figure. II.17. Modèle d'une cellule photovoltaïque	42
Figure. II.18. Caractéristique I(V) et P(V) d'un module solaire.....	43
Figure. II.19. Caractéristiques I(V), P (V) pour différents éclairagements et températures	44
Figure II.20. Schéma d'une pile à combustible	45
Figure. II.21 .Circuit équivalent de la pile combustible.....	46
Figure II.22. Simulations des caractéristiques tension-courant de la pile 500 W BCS.....	50
Figure II.23. Caractéristique de puissance-courant simulé de la pile 500 W BCS	51
Figure II.25. Configuration de système d'énergie hybride	52
Figure II.26. Commande du convertisseur de la pile à combustible	53
Figure II.27. Variation du vent GE.....	54
Figure II.28. Variation de la vitesse mécanique GE	54
Figure II.29 .Vitesse électrique GE	54
Figure II.30. Tension de génératrice GE	54
Figure II.31. Courant de Contrôle GE	55
Figure II.32. Couple de Contrôle GE.....	55
Figure II.33. Puissance mécanique GE	55
Figure II.34. Puissance électrique GE	55
Figure II.35 .Variation de l'éclairement	56
Figure II.36.Tension de GPV	56
Figure II.37 .Courant du GPV	56
Figure II.38 .Puissance de GPV	56
Figure II.39. Tension de la pile PC	57

Liste des figures

Figure II.40. Courant de contrôle de la pile PC	57
Figure II.41. La puissance de la pile à combustible	57
Figure II.42. Puissance demandé et compensé.....	58
Figure II.43. Tension de bus	58
Figure II.44. Courant injectée au réseau I_d	58
Figure II.45. Courant injectée au réseau I_q	58
Figure II.46. Courant triphasé de réseau	58
Figure II.47. Tension triphasé de réseau	58
Figure II.48. Zoom du courant triphasé	59
Figure II.49. Zoom de la tension triphasée	59
Chapitre III	
Optimisation du système par logique floue	
Figure III.1 .Classification des humains selon leur âge	62
Figure III.2. Représentation graphique des termes linguistiques	63
Figure III.3 .Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.....	68
Figure III.4. Schéma bloc de synthèses d'un contrôle flou.....	72
Figure III.5. Fonction d'appartenance d'une variable linguistique	73
Figure III.6 .Schéma de contrôleur par la logique floue	74
Figure III.7. Fonction d'appartenance du variable linguistique(E, P_{er}, I_{er})	74
Figure III.8. Schéma global d'un système éolien avec un régulateur floue et floue PI.	75
Figure III.9 .Structure globale de l'optimisation par logique floue	76
Figure III.10. Schéma bloc du contrôleur par la logique floue	77
Figure III.11. Fonction d'appartenance de E, dE et dD	78
Figure III.12. Variation du vent	80
Figure III.13. Variation de la vitesse mécanique GE	80
Figure III.14. Variation du couple GE	80
Figure III.15. Variation de la puissance GE.....	80

Liste des figures

Figure III.16. Variation de l'éclairement	81
Figure III.17. Variation du courant de GPV.....	81
Figure III.18. Variation de la tension de GPV	81
Figure III.19. Variation de la puissance de GPV	81
Figure II.20. Courant de contrôle PC	82
Figure II.21. Tension de la pile PC	82
Figure III.22. La puissance de contrôle de la pile à combustible	82
Figure III.23. Tension de bus	83
Figure III.24. Puissance demandée et compensée	83
Figure III.25. Courant injecté au réseau	83
Figure III.26. Puissance injecté au réseau	83
Figure II.27. Courant triphasé de réseau	84
Figure II.28. Zoom de la tension de réseau	84
Chapitre IV	
Optimisation du système par mode glissant	
Figure IV.1. Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	87
Figure. IV.2. Représentation de la commande discontinue.....	91
Figure. IV.3. Régime glissant réel.....	92
Figure IV.4.a. Commande à deux seuils	93
Figure .IV.4.b. Commande à un seul seuil	93
Figure IV.5. Configuration globale du contrôleur du système.....	97
Figure IV.6. Configuration du contrôleur du système solaire.....	103
Figure IV.7 .Variation du vent	104
Figure IV.8 .Variation de la vitesse mécanique GE	104
Figure IV.9 .Variation du Couple GE	104
Figure IV.10. Variation de la Puissance GE	104
Figure IV.11. Variation de l'éclairement	105

Liste des figures

Figure IV.12. Variation du courant de GPV	105
Figure IV.13. Variation de tension de GPV	105
Figure IV.14. Variation de puissance de GPV	105
Figure IV.15. Courant de contrôle de la pile PC	106
Figure IV.16. Tension de la pile PC	106
Figure IV.17. La puissance de Contrôle de la pile à combustible BC	106
Figure IV.18. Tension du bus	107
Figure IV.19. Puissance demandée et compensée	107
Figure IV.20. Courant injectée au réseau	107
Figure IV.21. Puissance injectée au réseau	107
Figure IV.22. Courant triphasé de réseau	108
Figure IV.23. Zoom de la tension de réseau	108

Introduction Générale

Au début des années soixante-dix, l'environnement est devenu un objet de préoccupation important pour les Etats. Les problèmes d'épuisement des réserves des énergies fossiles dans le futur, du taux de pollution élevé de la planète par les gaz à effet de serre, et de la demande accrue du potentiel énergétique, ont donné de nouvelles orientations pour la production d'énergie électrique dans le monde entier.

La communauté internationale (accord de Kyoto) s'est fixé des orientations pour le développement des énergies renouvelables, avec la libération du marché de l'électricité et l'exploitation de nouvelles énergies propres et durables. Cette libération du marché de l'électricité et le développement de la production décentralisée amènent dans le domaine du génie électrique de nombreux problèmes scientifiques et techniques nouveaux.

Parmi les sources des énergies renouvelables, on, citer l'énergie solaire, l'énergie éolienne et les piles à combustible. Ce sont celles qui ont le potentiel énergétique le plus important en Algérie. Elles sont des énergies durables non polluantes et économiquement viables. Les aides institutionnelles et gouvernementales, conjointement avec ces potentiels énergétiques et le développement des technologies de conversion des énergies ont permis un développement rapide de ces énergies renouvelables.

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité.

Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030. Plusieurs raisons plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelables en Algérie [01]; citons:

- Elles constituent une solution économique fiable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du grand sud,
- Elles permettent un développement durable du fait de leur caractère inépuisable et de leur impact limité sur l'environnement et, de leur contribution à la préservation de nos ressources fossiles,
- La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional, de stabilité de la population et de la création d'emplois.

Dans ce contexte mon étude sera divisée en quatre chapitres qui ont pour but d'injecter une puissance de 5.4kW générateur photovoltaïque et de 5.3kW générateur d'éolienne et de 10kW des piles à combustible au réseau électrique. Pour d'analyser le comportement dynamique du système hybride. Le système complet est simulé pour différentes conditions de fonctionnement des sources d'énergie. Toutes le système hybride est modélisé en utilisant l'outil logiciel de Matlab.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous exposons entre autre la situation énergétique actuelle concernant la production d'électricité dans le monde et dans le cas particulier de l'Algérie. Nous listons ensuite d'une manière brève une présentation de la fonction, la classification et les différentes structures d'un système hybride, puis un état de l'art concernant les différentes topologies de couplage de bus DC et AC ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous donnons enfin une discussion générale sur le stockage, les convertisseurs, la charge et les différents types des systèmes de supervision.

Le second chapitre est consacré à la présentation de notre système hybride ainsi que la modélisation mathématique des différents sous-systèmes qui le constituent. Nous présentons d'une manière brève le principe de conversion éolien et le principe de la méthode de poursuite de puissance maximale et les caractéristiques ($P-W$), ensuite nous abordons l'aérogénérateur. Il en est de même pour les modèles de génératrice électrique (GSAP) utilisée dans un repère à deux axes (d, q). Nous terminons avec les modèles des trois convertisseurs statiques AC-DC, DC-DC et DC-AC avec l'utilisation de la technique de commande MLI.

Une stratégie de la commande vectorielle est appliquée au réseau électrique pour contrôler la puissance active et réactive qui est peut être contrôlée de façon indépendante.

Introduction générale

Après nous présentons l'influence des différents paramètres climatiques (éclairage et température,...) sur les caractéristiques $I-V$ et $P-V$ pour le générateur photovoltaïque et la modélisation du système de la pile à combustible, en utilisant un convertisseur élévateur continu-continu pour le contrôle hybride de l'éolienne, le photovoltaïque et la pile à combustible.

L'éolienne et le photovoltaïque sont utilisés comme sources d'énergie primaire, tandis que la pile à combustible est utilisée en tant que source secondaire ou source auxiliaire. Des résultats de simulation seront présentés pour valider notre système hybride.

Dans le troisième chapitre, nous présentons la théorie de base de la logique floue et son application pour optimiser la vitesse de l'éolienne et le courant injecté au réseau et optimiser la puissance du générateur photovoltaïque. Nous exposons d'abord les concepts de base de la logique floue liés aux problèmes de commande, puis l'optimisation par régulateur flou est étudiée lorsque les variables d'entrée sont décrites par trois classes. Enfin les résultats obtenus seront présentés et discutés.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons la théorie de base du mode glissant et son application pour optimiser la vitesse de l'éolienne et le courant injecté au réseau et optimiser la puissance du générateur photovoltaïque. Nous exposons d'abord les concepts de base du mode glissant liés aux problèmes de commande. Enfin les résultats obtenus seront présentés et discutés.

I.1. Introduction

Les sources hybrides, combinaison de deux ou plus des sources d'énergie et de puissance, ont été un sujet de recherche depuis les années 90 [2], [3] ainsi que les différentes structures et méthodes de contrôle de systèmes hybrides. Ce chapitre commence par présenter brièvement la production et la croissance mondiale de l'énergie électrique ainsi que la croissance des différentes installations des centrales photovoltaïques et éoliennes raccordées aux réseaux et sur sites isolés. Nous avons étudié aussi les différentes structures, usuelles des systèmes hybrides d'énergie électrique.

I.2. Production mondiale d'électricité

La figure I.1, montre que la production d'électricité repose encore largement sur des sources d'énergie classiques, qui cependant tôt ou tard, vont être épuisés. Cela rend l'avenir dangereusement fragile, alors que la demande de combustibles fossiles va bientôt dépasser la capacité de production même des plus grands fournisseurs, et la production d'énergie nucléaire, autre fois considérée comme une source d'énergie illimitée, est aujourd'hui très impopulaire et inquiétante. En outre, la production d'énergie électrique en basée sur des technologies conventionnelles pendant des décennies a gravement affecté l'environnement. En conséquence, le monde entier est aujourd'hui engagé dans un défi de réduire l'impact négatif de la production d'énergie sur notre planète et découvrir comment produire la quantité nécessaire d'énergie à partir de sources d'énergie propres [04], [05].

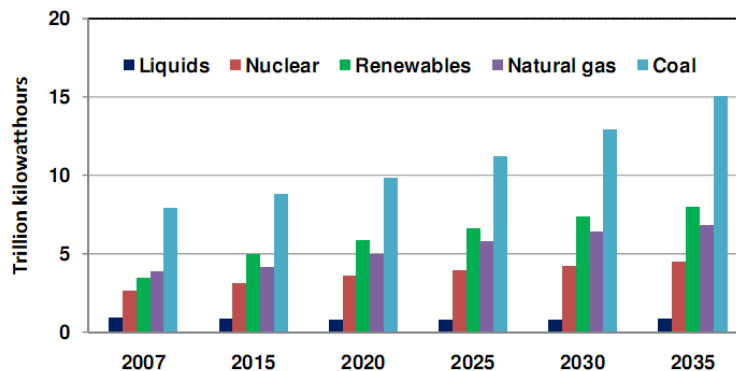


Figure I.1. La production mondiale nette d'électricité, 2007-2035.

La production d'électricité mondiale devrait augmenter rapidement au cours des deux prochaines décennies, la figure I.2 montre la forte croissance de la puissance électrique totale et la consommation totale d'énergie dans le cours des deux dernières décennies et sa projection au cours des deux prochaines décennies.

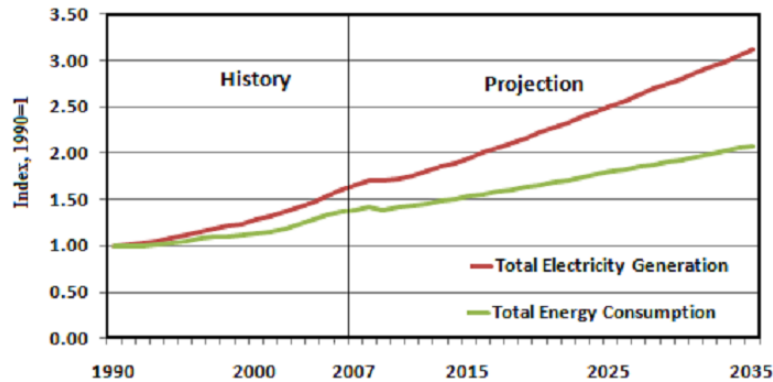


Figure I.2. La production et la consommation d'énergie électrique totale dans le monde.

La part de l'énergie électrique dans la demande énergétique totale augmente et croît plus vite que ceux des combustibles liquides, gaz naturel, charbon et dans tous les secteurs d'utilisation finale, sauf le transport.

Cela augmente la consommation totale d'énergie, le réchauffement climatique et les inquiétudes au sujet de la pénurie de carburants conventionnels, l'alimentation d'un grand intérêt sur la génération à grande échelle à partir des sources des énergies renouvelables (SER) comme une solution viable au problème énergétique.

Les énergies renouvelables sont un segment en croissance rapide comme le montre la figure I.1. La production totale d'électricité à partir des SER augmente de 3,0 % par an, et la part des énergies renouvelables pour la production d'électricité mondiale va croître de 18 % en 2007 à 23 % en 2035. Il est bon de mentionner que près de 80 % de l'augmentation est de l'énergie hydroélectrique et éolienne [04], [05].

Parmi les technologies des énergies renouvelables, le photovoltaïque (PV) et les éoliennes (E) sont en effet les plus populaires, même si leur diffusion a été entravée par des coûts élevés et des problèmes technologiques. Toutefois, dans les deux dernières décennies, l'efficacité et la fiabilité des générateurs photovoltaïques et éoliennes ont été remarquablement améliorées et les coûts en capital abaissés.

L'énergie solaire envoyée à la surface de la terre en une heure est d'environ la même que celle consommée par toutes les activités humaines en un an. L'électricité peut être générée à partir de la lumière du soleil à travers le photovoltaïque (PV). L'énergie photovoltaïque sera discutée tout au long de cette thèse.

Il ya deux principales applications pour les systèmes photovoltaïques comme indiqué dans [04], [05]:

- Système PV autonome.
- Système PV raccordé au réseau électrique.

La figure I.3 montre la puissance installée cumulée raccordée au réseau et hors réseau électrique dans les pays collaborant avec l'agence de l'énergie internationale IEA-PVPST1-21, environ 6,2 GW de capacité PV ont été installés dans les pays de IEA-PVPST1-21 en 2012, alors que la capacité totale du PV installée dans le monde en 2011 est estimée à un peu plus de 7 GW [06].

À peu près, la même somme a été installée l'année précédente, cela est considéré comme un bon indicateur de taux de croissance au sein du marché de l'énergie photovoltaïque en dépit du ralentissement économique mondial.

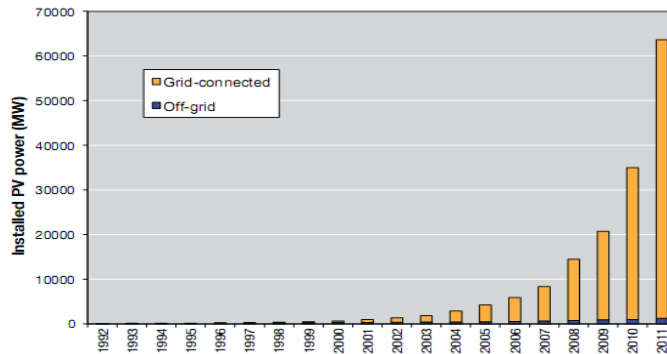


Figure I.3. Installations photovoltaïques raccordée au réseau et hors réseau électrique.

L'énergie éolienne est une source d'énergie propre qui contribue de plus en plus à réduire la dépendance des combustibles fossiles, en grande partie par la réduction progressive des coûts des éoliennes à une époque où le coût des combustibles traditionnels augmente [07]. Selon la Figure I.4 publiée par le Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) en 2012, la production d'énergie éolienne a connu une croissance exponentielle au cours des deux dernières décennies.

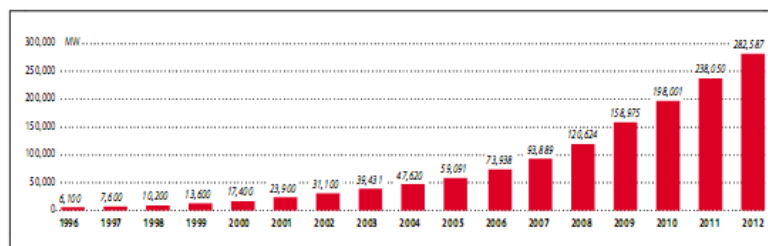


Figure I.4. Croissance de l'énergie éolienne et la capacité installée dans le monde.

La technologie des piles à combustible est choisie pour compenser la discontinuité de certaines sources d'énergie renouvelables telles que l'irradiation solaire et éolienne, cette technologie donne un rendement élevé et constitue une réponse rapide de charge [05]. La pile à combustible est un dispositif électrochimique qui génère de l'électricité directement à partir de l'énergie chimique d'un combustible, généralement de l'hydrogène ou un hydrocarbure.

La quantité annuelle des demandes annuelles de brevets liées à la technologie de la P à C dépasse aujourd'hui 3500 brevets [05], ce qui reflète un progrès technologique rapide, conduisant à une introduction massive de systèmes P à C sur le marché dans un avenir proche.

Le système de génération hybride et autonome est constitué d'un générateur d'énergie éolienne (GEE) et d'un générateur d'énergie photovoltaïque (GPV) avec la méthodologie de contrôle adéquat. Pour fournir une quantité d'énergie plus fiable pour les clients, nous devons monter une configuration de systèmes basée sur les deux sources primaires.

La troisième source de l'énergie renouvelable utilisée est la pile à combustible (P à C) servant à compenser la discontinuité de l'irradiation solaire et éolienne, et augmentant le rendement et l'efficacité.

La question posée est de trouver la configuration optimale du système pour (GEE/GPV /GPC). Le système multi hybride sera d'abord abordé le long de ce travail. Certaines interfaces des électroniques de puissance et les techniques de gestion de l'alimentation seront examinées et discutées en détail.

I.3. Systèmes hybrides

I.3.1. Définition

Le problème avec la puissance variable et non garantie produite par les sources d'énergie renouvelables, peut être résolu par un couplage des sources d'approvisionnement et la formation d'un système dit hybride (SH). Un système hybride à source d'énergie renouvelable (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie, parmi lesquelles une au moins est renouvelable. Le système hybride peut comprendre un dispositif de stockage. D'un point de vue plus global, le système énergétique d'un pays donné peut être considéré comme un système hybride. [08], [9], [10].

I.3.2. Classification des systèmes hybrides

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi. Dans la suite du chapitre, seront présentées les classifications les plus répandues.

I.3.2.1. Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, on trouve le *système hybride travaillant en parallèle avec le réseau électrique* dit aussi connecté au réseau. Ce système contribue à satisfaire la charge du système électrique du pays. Les systèmes hybrides du deuxième groupe *fonctionnent en régime isolé* ou en mode autonome. Ils doivent répondre aux besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique, le cas d'un refuge de montagne, îles, villages isolés, panneaux de signalisation routière etc... [05], [08], [11], [12].

I.3.2.2. La structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système. *Le premier critère est la présence ou non d'une source d'énergie classique.* Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, et dans le cas d'une étude du réseau électrique complète, une centrale entière.

Un second critère possible est la présence ou non d'un dispositif de stockage: la présence d'un stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant la période d'absence d'une ressource primaire convertie en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoir à hydrogène, des volants d'inertie, etc.

La dernière classification possible est celle relative au type de la source d'énergie renouvelable utilisée, la structure du système peut contenir *un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur hydraulique (une centrale hydroélectrique, l'utilisation des vagues ou bien une combinaison de ces deux sources).* Un critère important pour la sélection de la source utilise le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit de l'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est le consommateur électrique alimenté, son importance détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et ou d'une source conventionnelle, etc... [08], [09], [15].

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la figure I.5.

I.3.3. Etude des structures du système hybride

Au vu de ces nombreux critères, il est aisé d'imaginer la diversité des études sur les systèmes hybrides disponibles. Une synthèse non exhaustive des études réalisées est présentée dans ce paragraphe [08].

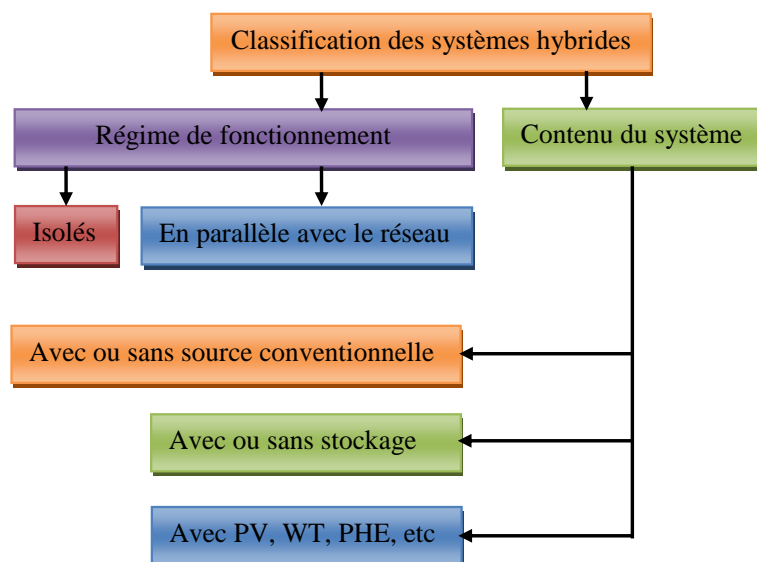


Figure I.5. Classification des systèmes hybrides.

I.3.3.1. Système hybride avec source d'énergie conventionnelle

I.3.3.1.1. Système photovoltaïque/source conventionnelle

Ce type de système hybride est utilisé le plus souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud comme par exemple l'Algérie et l'Arabie saoudite, etc. où le potentiel solaire est important. L'objectif de ces systèmes lorsqu'ils travaillent en mode autonome, est d'alimenter sans interruption une maison, un bâtiment de logements ou administratif ou un village. D'autres systèmes alimentent des centres de recherche qui sont également connectés au réseau électrique. Les systèmes autonomes contiennent souvent des batteries mais aussi d'autres dispositifs de stockage. Les batteries et le champ photovoltaïque produisent du courant continu. Par contre, les moteurs diesels peuvent entraîner des générateurs continus ou alternatifs. Le plus souvent, les consommateurs demandent du courant alternatif; on distingue alors différentes structures de systèmes selon le type de la machine électrique couplée avec le moteur diesel. Ces structures ont été décrites et classifiées selon le type de flux énergétiques. Chaque configuration, ses avantages et ses inconvénients sont cités en ci-dessous [08], [09], [10], [13].

La première configuration est la connexion série. Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus courant continu. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. L'installation photovoltaïque et la batterie sont aussi liées à ce bus. Le consommateur est alimenté par un onduleur. Le schéma de principe d'un système hybride avec une telle configuration est présenté sur la Figure I.6.

Dans cette configuration, le générateur diesel peut alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou charger la batterie. D'après la stratégie de gestion du système hybride, l'énergie produite par l'installation photovoltaïque peut directement alimenter la charge ou passer par la batterie. Cette dernière a pour rôle de fixer la tension de bus continu et diminuer le recours au générateur diesel (minimiser le coût du diesel). [08], [13], [14].

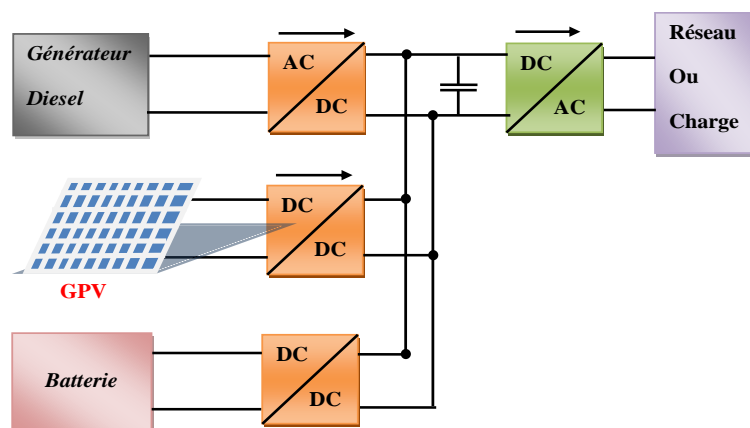


Figure I.6. Système hybride avec connexion série.

Les avantages de cette structure de système sont :

- Un dimensionnement facile du générateur diesel ;
- Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif ;
- La mise en marche du générateur diesel n'est pas liée avec une interruption de l'alimentation électrique ;
- Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension, dont la forme du signal, la valeur et la fréquence sont convenables.

Les inconvénients sont :

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière qu'il puisse couvrir la charge maximale possible.
- La batterie doit avoir un grand volume.
- Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif, parce que la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur.
- Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique.

La deuxième configuration possible est à commutation. Elle est souvent utilisée malgré quelques inconvénients. Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur. L'alimentation par les deux simultanément n'est pas possible. Le générateur diesel peut charger la batterie par l'intermédiaire d'un redresseur. La gestion du système doit être automatique à cause de la complexité du système hybride. Le schéma du système est présenté sur la Figure I.7 [08], [10].

Les avantages de cette configuration sont :

- Le système possède un rendement plus haut, parce que le générateur diesel peut alimenter directement la charge, d'où une baisse de la consommation de fuel
- L'onduleur peut assurer au consommateur la tension demandée en forme et valeur.
- Une avarie de l'onduleur n'engendrera pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel.

Les inconvénients :

- L'apparition d'une coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation des sources ;
- Le générateur et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système. De cette façon, ils fonctionnent avec un moindre rendement lors des périodes de faible charge ;
- Une construction complexe.

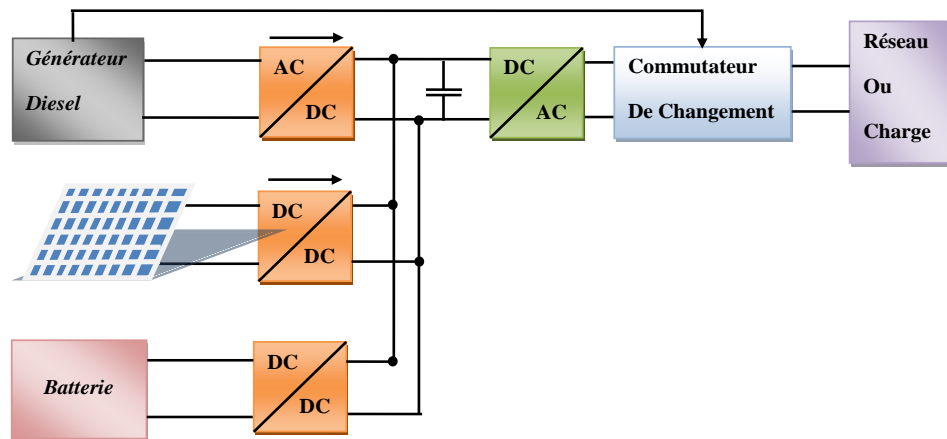


Figure I.7. Système hybride à commutation.

La dernière configuration d'un système hybride photovoltaïque/source conventionnelle est à connexion parallèle. Ici le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel. Il peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. De cette façon, la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la Figure I.8 [08], [10], [13].

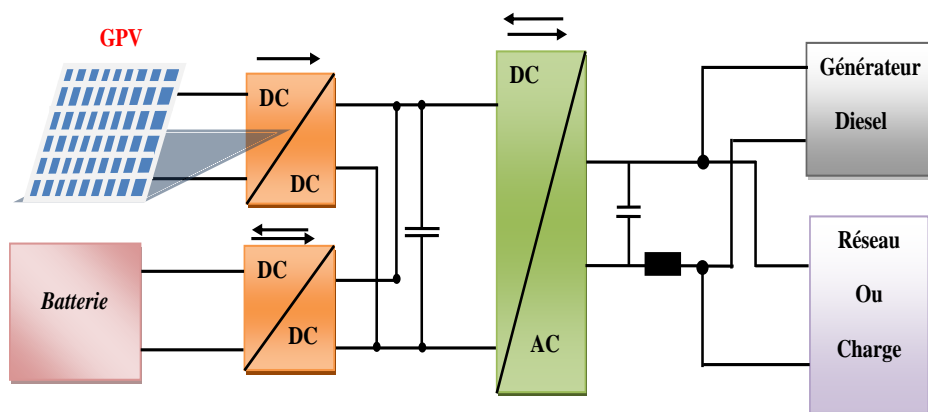


Figure I.8. Système hybride à connexion parallèle.

Les avantages de cette configuration sont

- Les composants du système ne doivent pas être dimensionnés pour la charge totale, parce que le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps ;
- Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus il n'y a pas une conversion de l'énergie produite par le générateur diesel.

- Une Diminution du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride.
- Une avarie du convertisseur électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

Les inconvénients de la configuration sont :

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système.
- Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- Le personnel, qui s'occupe du fonctionnement correct du système, doit être qualifié.
- Les batteries vieillissent rapidement (pas de chargeur).
- Le bus continu est plus difficile à contrôler.

I.3.3.1.2. Systèmes éolien/source conventionnelle

Les recherches sur les systèmes hybrides éolien/diesel se distinguent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïques car les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui produit par le générateur diesel. De cette façon il n'y a pas une grande diversité des configurations du système hybride.

Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité. Des études ont été réalisées sur des systèmes installés sur des îles de diverses tailles petites comme les îles Canari, en passant par des îles moyennes comme la Corse (France, 2001), jusqu'aux grandes îles comme L'Angleterre (Bowen et al, 2001) [08], [09], [14], [15].

I.3.3.1.3. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel

La mise en place d'un tel système a pour objectif de diversifier les sources d'énergie renouvelables. On recherche ainsi une diminution plus significative de la quantité de fuel consommé puisque les sources renouvelables peuvent se compléter et fournir une plus grande quantité d'énergie. Une partie des travaux est orientée vers des systèmes installés ou vers la conception de nouveaux systèmes. On trouve aussi des études d'interconnexion de systèmes dans le réseau électrique, dans l'état de New York ou en Arabie saoudite. D'autres auteurs optimisent la configuration du système selon divers critères : probabilité de perte de charge, combinaison d'un coût minimal du système et d'une quantité minimale d'émissions nuisibles auxquels s'ajoute la charge non satisfaite minimale. Pour trouver le système optimal on utilise des algorithmes de Pareto, des algorithmes génétiques et évolutifs ou de la logique floue. Ces systèmes alimentent des maisons et des refuges ou des villages. Ils peuvent être autonomes ou interconnectés avec le système électrique du pays.

Le stockage peut être sous forme de batteries, de réservoir d'hydrogène avec électrolyseur et pile à combustible ou d'une combinaison des deux. Rothert et Wollny (2006) développent une stratégie optimale de gestion du dispositif de stockage.

I.3.3.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où l'approvisionnement en carburant diesel ou le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Dans la suite de ce paragraphe, quatre configurations de système hybride avec ou sans stockage, seront présentées.

I.3.3.2.1. Système hybride photovoltaïque/stockage

L'installation photovoltaïque doit être raccordée avec une autre source d'énergie, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux.

Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages. Certains travaux traitent de modélisation et d'analyse, d'autres de dimensionnement optimisé des composants du système. Le critère d'optimisation le plus souvent utilisé est la probabilité de perte d'alimentation. Ils présentent des résultats de 6 systèmes d'une puissance totale de 6,3 kW et des résultats de systèmes hybrides implantés dans des centres de recherche. La stratégie de gestion de l'énergie a été étudiée par des algorithmes pour le suivi du point de puissance maximale qui ont été développés à partir de la logique floue. La production photovoltaïque d'hydrogène est également étudiée par électrolyseur pour différentes technologies par Conibeera et Richards [08], [10].

Le stockage est parfois idéal (Mulder et al, 2010), un banc de batteries, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de deux dispositifs de stockage différents comme électrolyseur et batterie (Islam et Belmans, 2004) ou électrolyseur et super condensateur (Uzunoglu et al, 2009). L'utilisation de super condensateurs est de conception très récente et, ils sont utilisés pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en terme de quantité stockée mais plus lent (Thounthong et al, 2009). Mulder et al (2010) étudie un système hybride alimentant un ensemble d'habitations en parallèle avec le réseau électrique. Il surmonte ainsi les surtensions en bout de lignes électriques et les manques d'alimentation lors des coupures du réseau. Différents logiciels ont été utilisés dans les études: Matlab (Islam et Belmans, 2004; El H Shatter et al, 2002; Uzunoglu et al, 2009) et ESRA (Fragaki et Markvart, 2008) [08], [10].

I.3.3.2.2. Système hybride éolien/stockage

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau

électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne, soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation du consommateur lors des périodes de faible vitesse du vent. Le réseau électrique peut être de grande taille, cas des Etats-Unis (Denholm, 2006), ou de faible taille (réseau insulaire). Les recherches se distinguent aussi par l'intervalle de temps considéré. Dans le cas d'étude de processus à variation lente, les auteurs (Korpaas et al, 2003; Nouni et al, 2007) s'intéressent à l'énergie obtenue par chacune des sources. D'autres études sont réalisées sur les processus de courte durée (Iqbal, 2003a; Shi et al, 2008).

Comme pour les autres systèmes précédemment présentés, ils peuvent alimenter soit un ménage, soit un bâtiment (hôtel) et même un village. Les modes de stockage étudiés peuvent être une batterie, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène, une combinaison des deux, un stockage par air comprimé, des aimants supraconducteurs ou une combinaison d'un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène et un super condensateur.

Lorsque le système opère en parallèle avec le réseau électrique, la stratégie de gestion de la puissance joue un rôle important.

Sur le plan économique, certains auteurs se contentent de donner les prix des divers organes du système, d'autres approfondissent l'analyse économique en calculant le prix du kilowatt heure produit [08].

I.3.3.2.3. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

L'inconvénient majeur des deux systèmes hybrides précédemment décrits est le manque de diversité de l'alimentation parce que la ressource primaire utilisée est unique. Cela induit plusieurs inconvénients comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix du kilowatt heure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie. Les études concernent des systèmes existants, des bancs d'essais ou des travaux théoriques. Dans ce dernier cas, on étudie l'influence de l'ajout d'une seconde source d'énergie dans un système déjà existant où on élabore un nouveau système hybride. La plupart des travaux concerne l'optimisation de la configuration du système hybride selon divers critères : probabilité minimale de perte de charge, coût minimal du kilowatt heure produit, ou la combinaison de ces deux critères combine plusieurs critères d'optimisation tels que la minimisation de la probabilité de manque d'alimentation, de l'énergie produite non utilisée et du coût du kilowatt heure produit.

Comme pour les autres systèmes hybrides, ils peuvent assurer l'alimentation des cellules 3G d'opérateurs mobiles, des ménages ou des villages. Ils sont installés sur tous les continents : en

Afrique : Algérie, Asie : Syrie, Malaisie ; au Brésil ; et en Amérique du Nord : Canada. Ces systèmes fonctionnent le plus souvent en régime autonome, mais il existe des travaux sur des systèmes connectés au réseau électrique [08].

Les dispositifs des stockages sont le plus souvent des batteries, parfois un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de batterie et stockage d'hydrogène.

Les modèles de comportement ont pour paramètres d'entrée les valeurs du rayonnement solaire et les vitesses du vent horaires, les valeurs moyennes mensuelles ou une distribution statistique de Weibull.

I.3.3.2.4. Système hybride photovoltaïque/éolien sans stockage

Ce type de système hybride est très rare, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation, il manque soit une source conventionnelle soit un dispositif de stockage. Pour cette raison, les recherches sur ces systèmes sont rares. On a pu trouver des travaux sur un système existant utilisé dans un but éducatif en Northern Iowa, Etats-Unis ; un projet de système hybride pour le réseau électrique d'une île Croate (Urli et Kamenski, 1998); une estimation des performances (Tina et al, 2006). Urli et Kamenski (1998) se basant sur l'hypothèse d'une complémentarité des énergies du vent et du soleil. De cette façon, le système fournira toujours de la puissance dans le réseau électrique insulaire. Son argumentation est d'ordre économique. L'étude théorique de Tina utilise la convolution probabiliste [08].

I.4. Topologies des systèmes électriques hybrides

Il existe différentes topologies de systèmes hybrides selon le couplage de générateurs d'énergie renouvelable, qui peut être continu ou alternatif.

I.4.1. Couplage de bus DC

Un système hybride couplé au bus continu, est un système dans lequel les différentes sources sont raccordées avec la charge de consommation à l'aide des capacités.

I.4.2. Couplage de bus AC

Un système hybride couplé au bus AC, est un système dans lequel les différents générateurs d'alimentation sont directement reliés à un réseau de courant alternatif ou à des charges de consommation à courant alternatif. Les tableaux I.1 et 2 résument les avantages et les inconvénients de chaque système de couplage [05].

Couplage du bus	Avantages	Inconvénients
DC	1. Synchronisme n'est pas nécessaire. 2. Moins de pertes de transmission 3. Connexion à un seul câble	1. Des problèmes de compatibilité de tension 2. Problèmes de corrosion avec les

		électrodes DC. 3. Connexion non standard nécessite des coûts élevés dans l'installation et la maintenance
--	--	--

Tableau I.1. Les avantages et les inconvénients de bus DC.

Couplage du bus	Avantages	Inconvénients
AC	1. Il peut être facilement isolé à partir du système en cas où des sources tombent en panne. 2. Connexion au réseau facile. 3. Interface standard et la structure modulaire. 4. Multi-tension facile. 5. Bien d'établir dans le coté économique.	1. Synchronisme nécessaire. 2. Le facteur de puissance et le facteur des harmoniques de distorsion sont nécessaires. 3. Les pertes de transmission sont plus élevées. (Spécialement pour les longues distances)

Tableau I.2. Les avantages et les inconvénients de bus AC.

I.5. Modélisation des éléments du système

Les études des différentes structures des systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelable sont réalisées sur la base de divers modèles en fonction de l'objectif recherché. Ces modèles ont en commun l'utilisation des données météorologiques comme variables d'entrée. Ces données doivent refléter l'apport d'énergie effectivement reçue, ce qui impose que les données le plus souvent disponibles soient converties en données utilisables. De telles conversions sont présentées par Prasad et Nataeajan [08]. Dans la suite de ce paragraphe, des modèles des deux convertisseurs photovoltaïques et éoliens et du convertisseur électronique sont brièvement décrits, (Figure I.8).

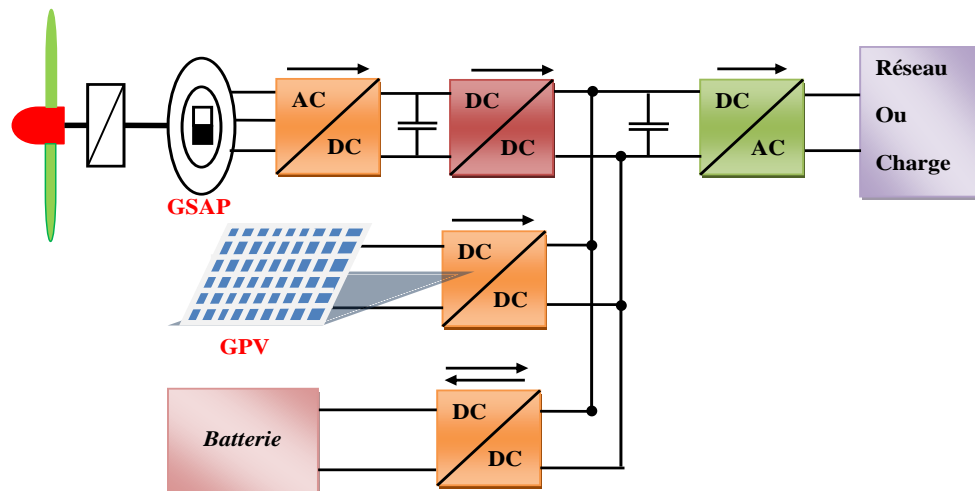


Figure I.8. Système hybride avec connexion série.

I.5.1 Energie solaire en Algérie

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre (150×10^6 km). La puissance émise par le soleil sous forme de rayonnement est estimée à 90×10^{15} GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que 180×10^6 GW. Avant d'arriver à la terre, le rayonnement solaire subit de considérables modifications, dues principalement aux phénomènes d'absorption et de diffusion. Aussi, on introduit la notion de l'éclairement qui est la densité de puissance reçue par une surface soumise à un flux lumineux, dans les conditions atmosphériques optimales. Cette densité de puissance atteint 1 kW/m^2 pour un site situé au niveau de la mer [16], [17].

Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et ce, malgré une atténuation importante à la traversée de l'atmosphère ; la quantité qui reste est encore assez importante, quand elle arrive au sol. Elle peut atteindre ainsi les 1000 W/m^2 crête dans les zones tempérées lorsque l'atmosphère est faiblement polluée.

L'Algérie dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires, (Figure I.9) [18],[17].

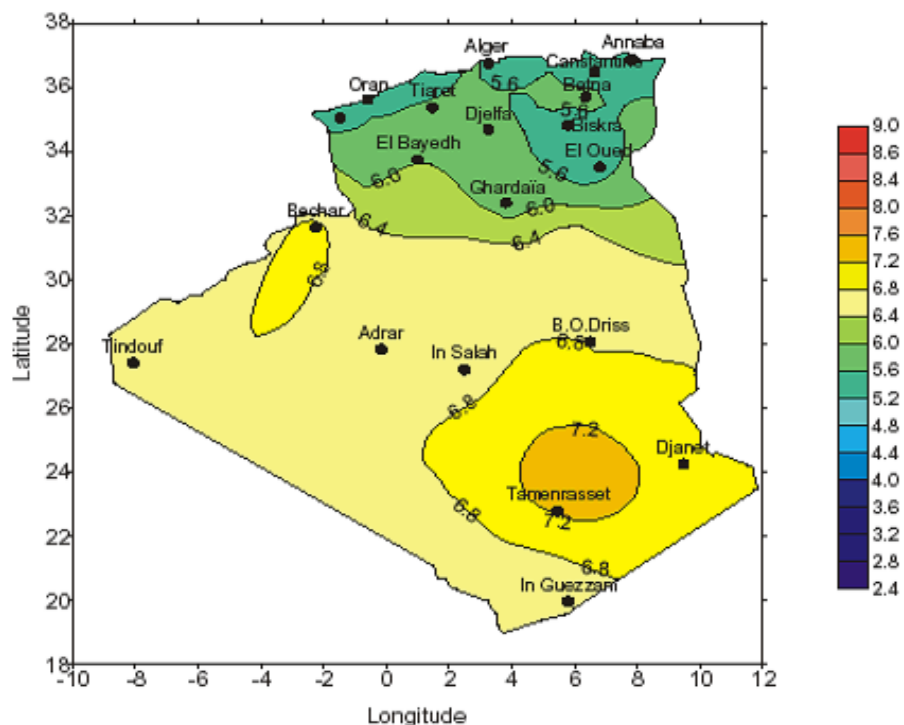


Figure I.9. Carte annuelle des irradiations solaires de l'Algérie.

1.5.2. Les gisements éoliens en Algérie

Pour établir une carte du vent de l'Algérie (Atlas du vent), un programme de traitement de données des mesures de la vitesse du vent a été élaboré par l'Office Nationale de la Métrologie et le Centre

de Développement des Energies Renouvelable (CDER) qui permet de déterminer la vitesse moyenne annuelle du vent.

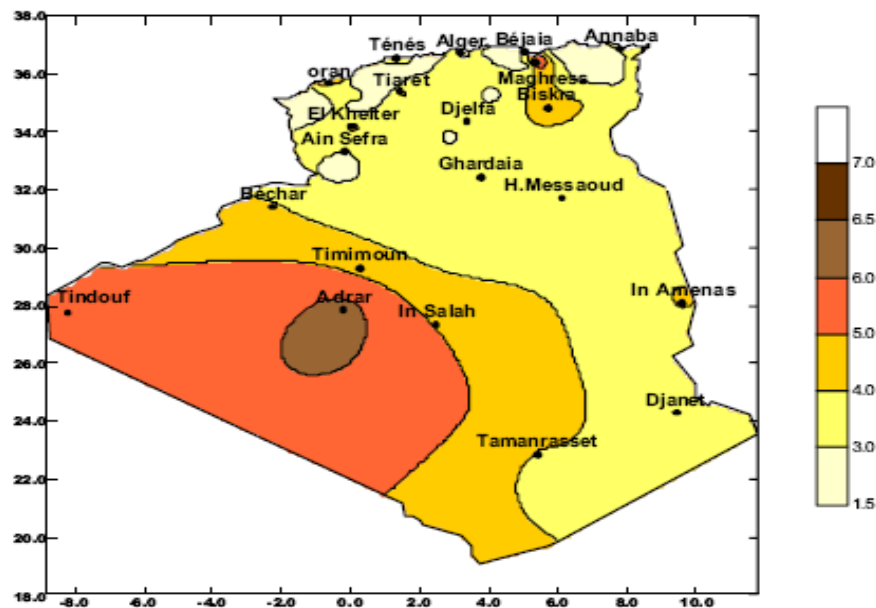


Figure I.10. Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol.

- On remarque au centre du Sahara de l'Algérie une ellipse entourant les sites d'Adrar, In Salah et Timimoune, où les vitesses enregistrées sont supérieures ou égales à 6 m/s. Cette ellipse est entourée par une large bande, qui domine le territoire, englobant l'essentiel du sud du pays et en particulier les régions d'Adrar et Tindouf.
- Par ailleurs, on distingue un couloir présentant des vitesses variant de 4 à 5 m/s, allant de Tamanrasset jusqu'à Béchar.
- On remarque aussi, un micro climat, où la vitesse est supérieure à 5 m/s, autour de la région de Tiaret et s'étirant jusqu'à Ténès.

Enfin, on constate que les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, In Salah et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent seules un potentiel économique approchant les 24 TWh par an [19]. Mais l'exploitation du potentiel éolien de ces régions se heurte souvent à de fortes contraintes d'ordre technique et économique citant entre autres l'éloignement et l'absence de connexion avec le réseau électrique national ce qui entraînerait un investissement plus lourd [19].

I.6. Les Systèmes de stockage

I.6.1 Les Batteries

Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides afin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est

parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés, dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [11].

Le stockage d'énergie est généralement réalisé grâce aux batteries. Les batteries sont, d'habitude, du type plomb-acide. Les batteries nickel-cadmium sont rarement utilisées. Il y a d'autres formes de stockage, mais peu utilisées, comme le pompage de l'eau, les volants d'inertie et le stockage de l'hydrogène.

I.6.2. Les piles à combustible

L'intérêt accru dans le monde entier à la technologie PC rend relativement énormes, centrales, fixes de 200W à 2 MW. Ces piles sont disponibles dans le commerce, avec des rendements allant de 30 à 50% [02].

La pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie statique électrochimique qui produit un courant continu à travers la réaction d'hydrogène et de l'oxygène en présence d'un électrolyte, une électrode positive (cathode) et une électrode négative (anode). L'électrolyte porte des charges électriques par une électrode à l'autre. Un catalyseur est habituellement exploité pour accélérer la réaction aux électrodes. Il existe plusieurs types de piles à combustible, le plus souvent classés selon le type d'électrolyte sont résumées dans le tableau I.3.

Acronyme	Nom	Température de fonctionnement	Electrolyte
PEMFC	Polymere Electrolyte Membrane Fuel Cell	50-80°C	Polymère
HT-PEMFC	High Temperature PEMFC	120-180°C	Polymère
DMFC	Direct Methanol Fuel cell	25-50°C	Polymère
DCFC	Direct Ethanol Fuel Cell	25-50°C	Polymère
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	700-1000°C	Céramique
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	650°C	Liquide
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	150-200°C	Liquide
AFC	Alkaline Fuel Cell	60-120°C	Liquide

Tableau I.3. Les différents types de PC

I.7. Les convertisseurs d'énergie électrique

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le DC en AC et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Les redresseurs réalisent la conversion AC/DC. Dans les SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à courant alternatif. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement. Les onduleurs convertissent le courant continu en courant alternatif. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à courant alternatif ou en parallèle avec des sources à courant alternatif. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil. Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC, par exemple, pour adapter la tension entre deux sources.

I.8. Charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et de courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

I.9. Système de supervision

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Les chargeurs des batteries, par exemple, incluent souvent un système de commande pour empêcher la surcharge des batteries ou que leur état de charge baisse trop. Les réseaux multi-Piles peuvent utiliser des méthodes relativement sophistiquées pour gérer les générateurs des piles et régler le flux de puissance.

Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Quelques exemples de commandes intégrées sont le gouverneur de vitesse sur l'éolienne, le régulateur de tension sur le générateur synchrone ou la commande de l'éolienne.

Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants. Ce système de surveillance est d'habitude automatique.

Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

Les travaux de recherche récents dans le domaine des énergies renouvelables s'orientent vers la conception des algorithmes de la supervision des fermes SEH dans le but de répartir les références des puissances active et réactive sur les différentes sources. Dans ce contexte, plusieurs algorithmes ont été proposés [12], [20], [21], [22] et peuvent être classés principalement en trois catégories :

- 1- Les algorithmes de supervision basés sur des régulateurs Proportionnel Intégral PI,
- 2- Les algorithmes de supervision basés sur la distribution proportionnelle,
- 3- Les algorithmes de supervision basés sur l'optimisation d'une fonction objective.

Le schéma suivant représente un système hybride qui sera étudié dans le chapitre suivant

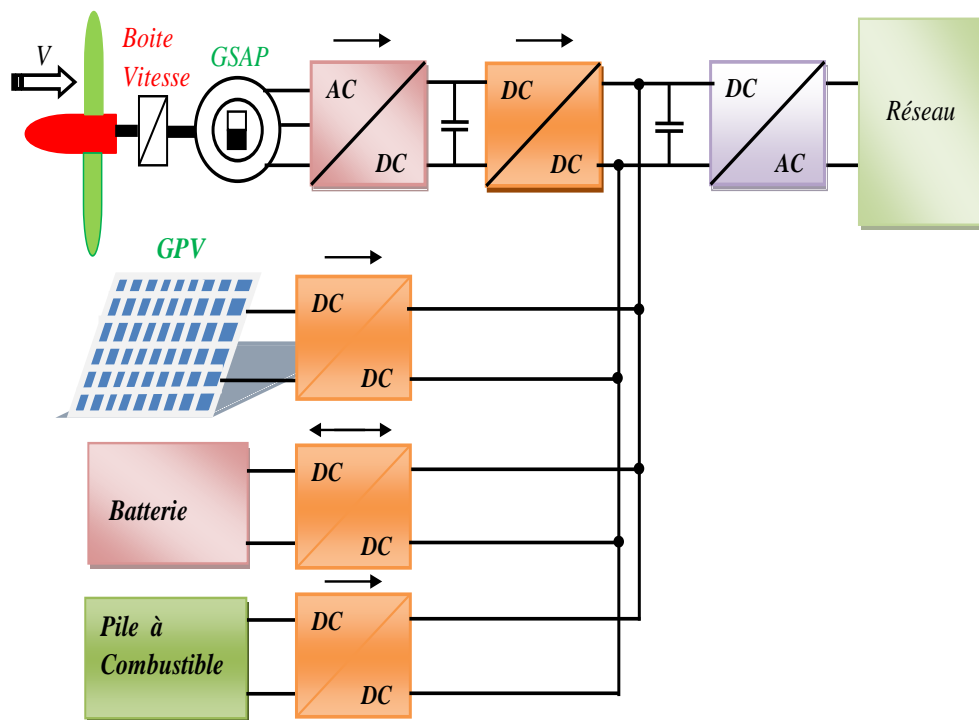


Figure I.11. Un système d'énergie hybride.

I.10. Conclusions

Dans ce chapitre, les principales notions liées à la technologie utilisée dans les SEH ont été données. Notre travail portant sur un SEH composé d'une éolienne, des panneaux photovoltaïques, les batteries de stockage et les piles à combustibles. Une attention particulière a été consacrée à ce type de sources et de stockage. Les différents types d'architectures existants, les outils de dimensionnement, ainsi que les problèmes et les stratégies de commande habituelles des SEH ont également été présentés.

II.1. Introduction

La demande sans cesse croissante sur les sources d'énergies conventionnelles comme le charbon, le gaz naturel et le pétrole brut, fait que la recherche de notre société se dirige vers le développement des sources d'énergies alternatives. Beaucoup de sources d'énergie renouvelable comme l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque sont maintenant bien développées, rentables et sont largement utilisés pour l'investissement dans ce domaine, tandis que d'autres sources, comme les piles à combustible sont à leur stade de développement avancé. Ces sources d'énergie sont préférées car elles sont respectueuses de l'environnement.

La combinaison de ces sources d'énergies pour former un système hybride est une excellente option pour la production d'énergie distribuée. La figure II.1 présente un système hybride typique qui comprend une source éolienne, une source photovoltaïque, une pile à combustible, et un module de batterie [23].

II.2. Description d'un système hybride

Ce chapitre aborde un système hybride de trois sources de production renouvelables, éolienne, photovoltaïque et pile à combustible. L'éolienne et le photovoltaïque sont utilisés comme sources d'énergie primaire, tandis que la pile à combustible est utilisée comme source d'énergie secondaire ou de secours. Le système étudié ici est composé d'un générateur éolien de 5,3 kW, un générateur photovoltaïque de 5,4 kW et une pile à combustible de 10 kW. Le schéma général d'un système hybride peut être représenté par la figure II.1.

Il est constitué principalement par :

- Un générateur photovoltaïque et un générateur éolien,
- Une génératrice synchrone à aimant permanent. (GSAP),
- Un convertisseur statique DC-DC pour adapter la charge au générateur éolien et un convertisseur DC-AC pour coupler au réseau et au photovoltaïque.
- Un redresseur à diodes permettant la transformation AC-DC, et un hacheur pour adapter la charge au générateur éolien et un convertisseur DC-AC et un transformateur pour coupler au réseau.
- Deux convertisseurs statiques, DC-DC pour adapter la batterie et la pile à combustible au réseau.

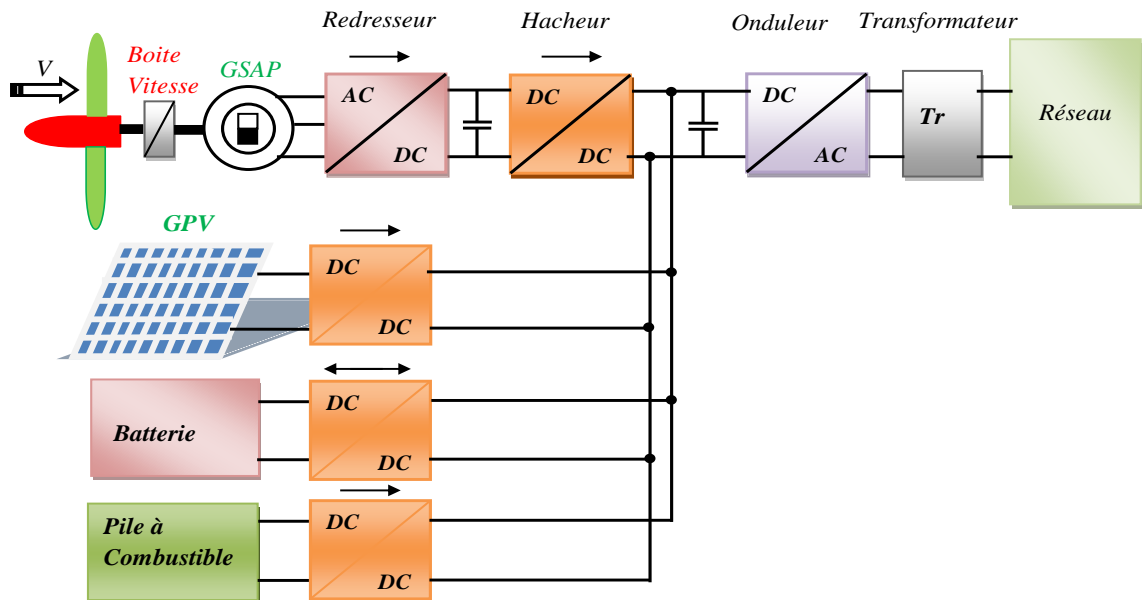


Figure II.1. Un multi système d'énergie hybride.

II.3.Énergie éolienne

Dans le chapitre précédent, les systèmes d'alimentation hybrides peuvent être une bonne solution pour l'intégration des énergies renouvelables connectées aux smart grid. Dans ce chapitre, nous présentons, une étude d'un système de conversion d'énergie éolienne classique, ainsi que la conception, le contrôle et les stratégies d'équilibrage de puissance. Ce système de conversion d'énergie permet à l'éolienne de délivrer le maximum de puissance en ajustant sa vitesse de rotation. La puissance électrique obtenue doit être adaptée avant d'être envoyée au réseau. La stratégie d'équilibrage de puissance utilisée, fonctionne avec un suivi du point de puissance maximale (MPPT). Ensuite, la tension du bus continu est régulée par rapport à la tension du réseau.

Afin de remédier au problème de discontinuité d'énergie, on ajoute des batteries pour construire un premier système d'alimentation hybride. La stabilité de la tension du bus continu est régulée par les batteries.

II.3.1. Étude d'un système de conversion de l'énergie éolienne

II.3.1.1. Présentation

Un système de conversion de l'énergie éolienne classique se compose d'une turbine à trois pales, une boîte de vitesses, une machine électrique à aimant permanent, un redresseur triphasé à diodes, un hacheur, un condensateur de circuit intermédiaire, un onduleur triphasé et des filtres de ligne qui sont connectés au réseau à travers un transformateur (Figure. II-2).

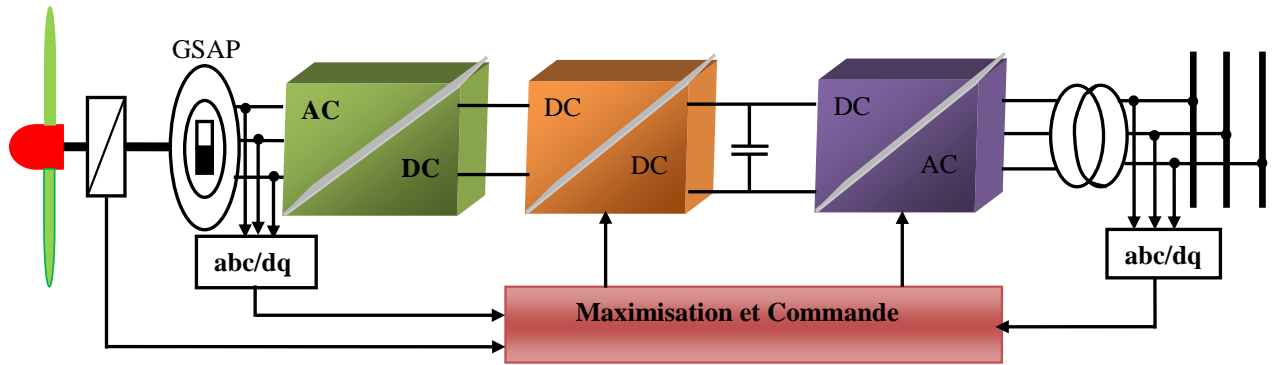


Figure II.2. Un système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable.

II.3.2. Modélisation du système de conversion de l'énergie éolienne

II.3.2.1. Modélisation de la turbine

Un système éolien transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique de la turbine.

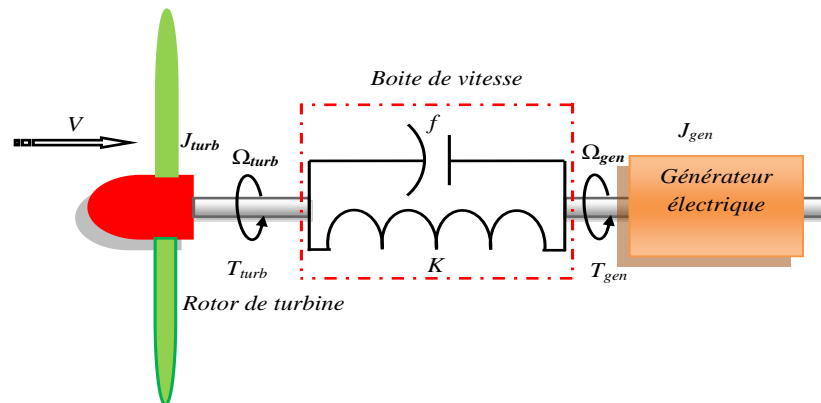


Figure II.3. Schéma de la turbine éolienne

Le système étudié est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain K (figure II.3). L'équation (II.1) donne la valeur du couple créé sur les pales de l'éolienne, par la masse d'air ayant une vitesse V_v [10], [19] [23], [24].

$$T_{turb} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot C_T(\lambda) \cdot V_v^2 \tag{II.1}$$

Dans la pratique, ce couple éolien n'est pas égal au couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine à cause de l'inertie conséquente J , et dans une moindre mesure, des frottements mécaniques

f. Il est donc impossible de considérer la turbine vue de l'arbre mécanique comme une source de couple liée directement à la vitesse du vent.

II.3.2.5. Approximation numérique

Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour calculer le coefficient C_p qui est donnée par l'expression suivant [25], [26], [27]:

$$C_p = 0,73 \cdot \left[\left(\frac{151}{\lambda'} \right) - 0,58\beta - 0,002\beta^{2,14} - 13,2 \right] \exp\left(\frac{-18,4}{\lambda'} \right) \tag{II.2}$$

Avec :

$$\lambda' = 1 / \left(\frac{1}{\lambda - 0,02\beta} - \frac{0,003}{\beta^3 + 1} \right)$$

Généralement les constructeurs présentent le coefficient C_p par des graphiques. Ce coefficient C_p est différent d'une turbine à l'autre. En effet, les courbes du coefficient de puissance des turbines d'éolienne commercialisées sont fournies dans la documentation (datasheet) produite par le fabricant et peuvent être utilisées pour définir une approximation mathématique de la courbe de puissance à l'aide des méthodes d'optimisation numériques.

On suppose que la vitesse de la turbine n'est pas réglable et l'angle de calage variable. Nous allons donc prendre en compte l'approximation définie par l'équation II.2. Dans ce sens nous présentons la courbe de variation du coefficient de puissance C_p et celle de la puissance mécanique P_m , en fonction de λ (rapport de vitesse spécifique) et ce pour différentes valeurs de l'angle d'attaque de l'éolienne.

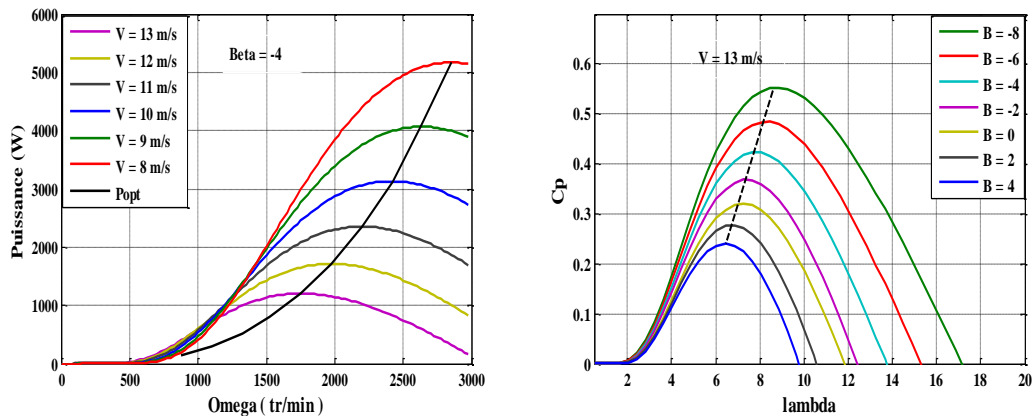


Figure II.4. Résultats obtenus à partir de l'approximation numérique.

Nous constatons d'après ces courbes que le coefficient de puissance C_p et la puissance mécanique à la sortie de la turbine diminuent quand l'angle (β) augmente et vice versa.

L'objectif de la régulation de cette grandeur mécanique (β) est de limiter la puissance mécanique et d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts.

On fixe (β), l'augmentation de la vitesse du vent engendre une augmentation de la puissance et du couple mécanique et vice versa.

II.3.2.2. Modèle du multiplicateur et équation dynamique de l'arbre

Le multiplicateur est modélisé mathématiquement par les expressions suivantes :

$$\begin{aligned} T_{gen} &= \frac{T_{turb}}{K} \\ \Omega_{mec} &= K \cdot \Omega_{turb} \end{aligned} \quad (II.3)$$

Avec Ω_{mec} la vitesse de la génératrice.

Le moment d'inertie est : [19], [23], [24].

$$J = \frac{J_{turb}}{K^2} + J_{gen} \quad (II.4)$$

L'équation mécanique est représentée comme suit :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = T_{mec} \quad (II.5)$$

Avec :

$$T_{mec} = T_{gen} - T_{em} - T_{vis} \quad (II.6)$$

$$T_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.7)$$

Où J est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

T_{mec} : Le couple mécanique appliqué au rotor.

T_{em} : Le couple électromagnétique.

T_{vis} : le couple de frottement.

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit des équations précédentes et est représenté sur la figure II.5.

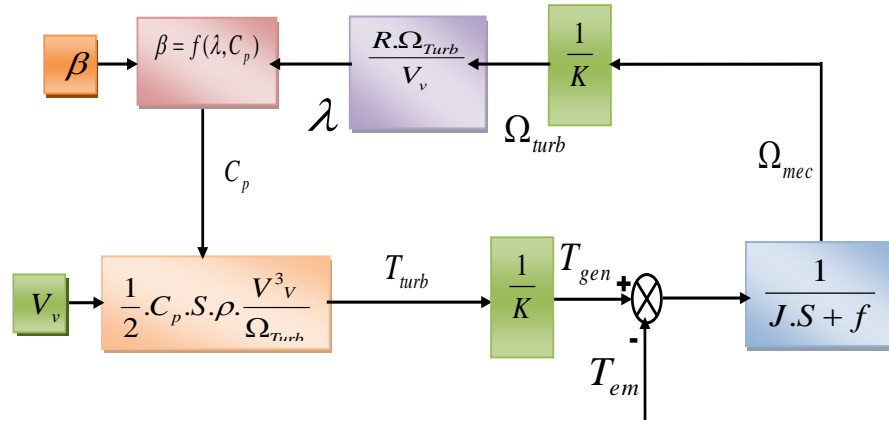


Figure II.5. Schéma bloc du modèle de la turbine

Le schéma bloc montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- Le couple électromagnétique de la génératrice.
- La vitesse du vent.

L'angle d'orientation de la pale, est considéré comme une entrée perturbatrice de ce système.

II.3.2.4. Maximisation de la puissance par la vitesse de rotation

En regroupant l'action des trois couples (T_g , T_{em} , T_{vis}) on peut écrire [19], [26].

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f \cdot \Omega_{mec} = T_{gen} - T_{em} \tag{II.8}$$

D'après cette équation, la commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine T_{turb} de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un asservissement de vitesse est indispensable. Alors le couple électromagnétique de référence T_{em_ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique égale à la vitesse de référence Ω_{mec_ref} , qui est basé sur la relation suivante:

$$T_{em_ref} = F(S)(\Omega_{mec_ref} - \Omega_{mec}) \tag{II.9}$$

$$F(S) = \frac{T(S)}{1+T(S)} ; T(S) = (K_p + \frac{K_I}{S}) \frac{1}{J.S + f} \tag{II.10}$$

$T(s)$: Fonction de transfert du régulateur de vitesse en boucle ouverte.

$F(s)$: Fonction de transfert du régulateur de vitesse en boucle fermée.

Cette vitesse de référence Ω_{mec_ref} dépend de la vitesse de la turbine à fixer Ω_{turb} pour maximiser la puissance extraite. La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle de la valeur optimale

du rapport de vitesse λ_{opt} (β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale de C_{opt} . Alors on peut écrire [19], [23], [24], [26]:

$$\Omega_{mec_ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \tag{II.11}$$

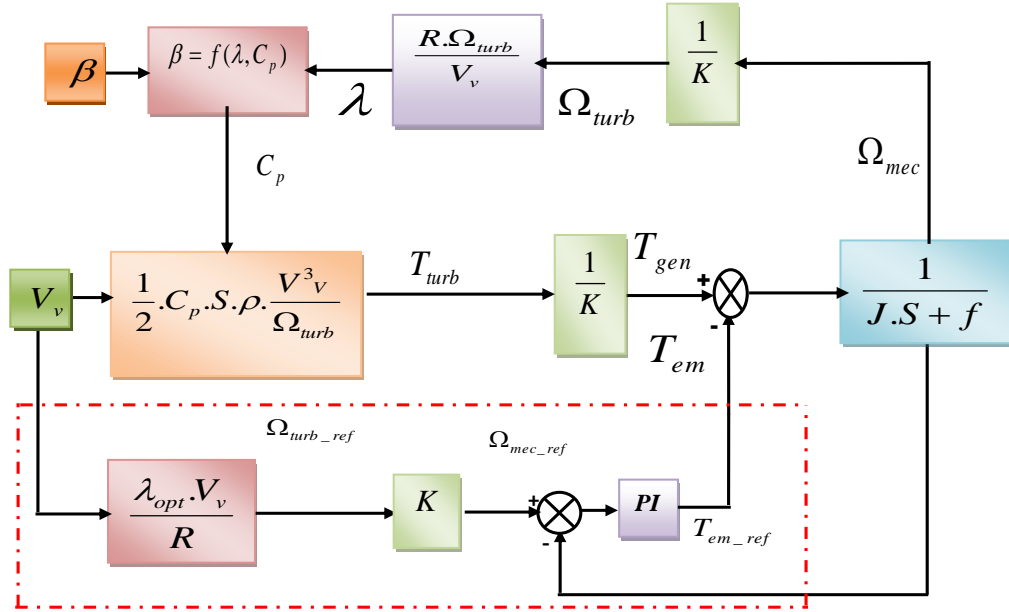


Figure II.6. Boucle de maximisation de la vitesse.

II.3.3. Générateur à aimant permanent

Le développement de la technologie des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Ce type de machines a un grand nombre de pôles, et est capable d'augmenter les couples mécaniques considérablement. Il existe plusieurs concepts des machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes telles que les machines de construction standard (aimantation radiale) au génératrices discoïdes (champ axial), ou encore à rotor extérieur [26].

Les avantages des générateurs à aimant permanent [28]

- Haute densité de puissance, et faible d'inertie du rotor.
- Simplicité et robustesse dans la construction du rotor.
- Faible niveau de bruit acoustique qui est en raison de la configuration d'entraînement direct, le système de turbine n'a pas besoin d'une boîte de vitesses à cause de fort nombre de pôles magnétiques.
- Auto-excitation par rapport aux autres machines.
- Fonctionnement à haut facteur de puissance et de rendement grâce à l'auto-excitation.

Les inconvénients sont les suivants [28]

- Le coût élevé des matériaux magnétiques et les difficultés à gérer dans le secteur manufacturier.
- Le fonctionnement synchrone, ce qui provoque un rendement très rigide dans le cas des court-circuits externes, et lorsque la vitesse du vent est instable, ce qui peut conduire à l'instabilité.
- Les pertes de souplesse du champ qui arrivent du contrôle de flux et d'éventuel effet de démagnétisation, aucun moyen de contrôler l'intensité du champ magnétique et par conséquent, la puissance réactive.
- L'utilisation de ces machines, pour des gammes de faible puissance (<100 kW).
- Machine synchrone à aimants permanents fonctionnant à vent a vitesse variable limité [28].

II.3.3.1. Modèle de la machine dans le repère de Park

Les variables du système ABC peuvent être transformées pour les deux axes d et q tournant à l'aide d'une transformation de matrice variant dans le temps donné en (II.12)[29], [23],[24],[26],[27],[28].

$$[T(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_o \end{bmatrix} = T(\theta) \cdot \begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$\begin{bmatrix} f_A \\ f_B \\ f_C \end{bmatrix} = T^{-1}(\theta) \cdot \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \\ f_o \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

En (II, 13) et (II, 14), les variables "f" peuvent être définies comme un ensemble de tensions ou de courants. En outre, dans un système triphasé équilibré f_o est la composante homopolaire et est toujours égal à zéro.

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant et dont l'orientation est a priori arbitraire. Ce modèle est

obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en machine diphasée équivalente [28], [29], [30], [31].

Le modèle de la machine dans le repère de Park est décrit par les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \omega \frac{L_q}{L_d} i_q - \frac{V_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = -\omega \frac{L_d}{L_q} i_d - \frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{V_q - \omega \phi_e}{L_q} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

II.3.3.2. Couple électromagnétique

L'expression de couple électromagnétique est donnée par :

$$T_{em} = P \frac{3}{2} \cdot \left((L_d - L_q) i_d + \phi_e \right) i_q \quad (\text{II.16})$$

$$L_d = L_q = L$$

$$T_{em} = P \frac{3}{2} \phi_e i_q \quad (\text{II.17})$$

II.3.4. Redresseur triphasé à diodes

Dans le cadre de cette étude, on utilise un redresseur à diodes. Les diodes sont supposées idéales et par conséquent, leur conduction correspond à un court-circuit et leur blocage correspond à un circuit ouvert. Dans ces conditions, les deux diodes qui conduisent à chaque séquence, correspondent à la phase ayant la tension la plus positive pour la diode du demi-pont supérieur et à la phase ayant la tension la plus négative pour la diode du demi-pont inférieur. La tension et le courant redressés sont reliés aux tensions et courants de phases [28], [32], [33].

Nous utilisons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tensions sinusoïdales triphasées. Deux diodes d'un même bras ne peuvent pas conduire simultanément.

Lorsque D_1 conduit l'une des deux diodes D'_2 et D'_3 conduit également ; il en vient que D_1 conduit lorsque V_1 est supérieur à V_2 et V_3 .

Pendant chaque séquence de conduction, la tension V_d à la sortie de redresseur est :

$$V_d = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j); \quad j=1, 2, 3.$$

La figure II.7 montre la topologie du circuit proposé pour un système de production d'énergie éolienne. Ce système comprend une turbine éolienne, un générateur à aimant permanent, un pont redresseur à diodes triphasé, un convertisseur DC-DC élévateur de tension, et une capacité pour réguler la tension d'entrée d'onduleur PWM (section II.3.5.2).

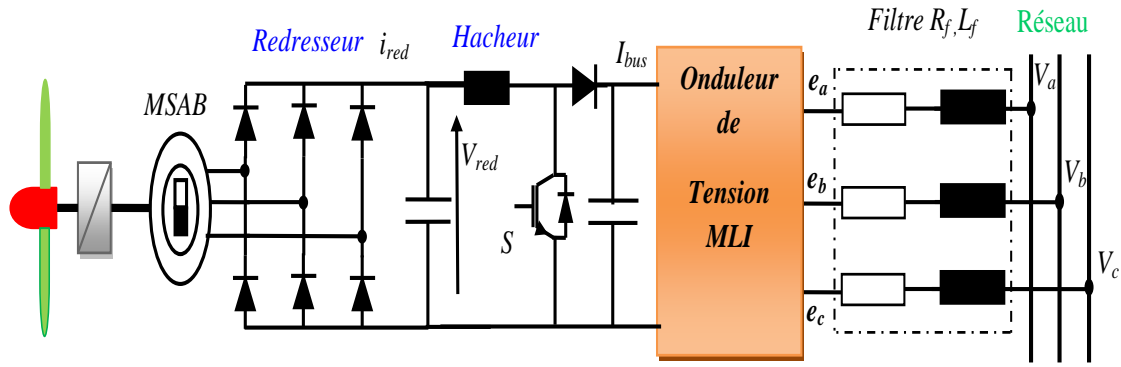


Figure II.7. Système de production d'énergie éolienne avec redresseur et hacheur

II.3.5. Modèle du convertisseur DC-DC avec Algorithme de contrôle

La structure de base et la topologie de commande du convertisseur survolteur est représentée sur la Figure II.8. L'équation d'état décrivant le convertisseur élévateur de tension continu-continu est donné par (II.18) [33], [34].

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_d - ri_L - (1 - D)V_{bus} \\ C \frac{dV_{bus}}{dt} = (1 - D)i_L - \frac{V_{bus}}{R} - i_{bus} \end{cases} \quad (II.18)$$

L, C : L'inductance et le condensateur de bus continu

V_{bus} : La tension du bus continu

i_{bus} : Le courant de bus continu

R, r : La résistance de charge et l'inductance du hacheur

D : Le rapport cyclique du hacheur.

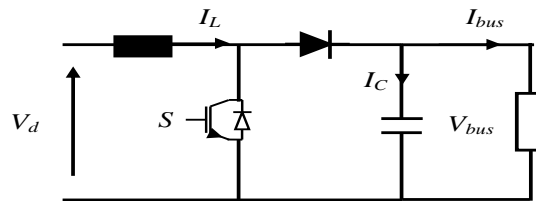


Figure II.8. Schéma du hacheur Boost

Pour le réglage de la boucle de courant nous commençons avec le système des équations II.18 qui est transformé dans le domaine de Laplace :

$$L.S.i_L(s) = V_d - ri_L(s) - (1 - D)V_{bus} \quad (II.19)$$

Comme c'est D qui régule le courant, on considère l'équation reliant D avec i , Soit

$$\frac{i_L(s)}{D(s)} = T(s) = \frac{V_{bus}}{r.(1 + \tau.S)} \tag{II.20}$$

$T(s)$: est la fonction de transfert de courant en boucle ouvert

La fonction $C_{PI}(s)$ de transfert d'un correcteur PI est de la forme

$$C_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{S} = \frac{K_i.(1 + \frac{K_p}{K_i} \frac{1}{S})}{S} \tag{II.21}$$

Par une compensation pole/zéro et en imposant $\frac{K_p}{K_i} = \tau = \frac{L}{r}$ on arrive à la fonction de transfert en

boucle fermée :

$$F(s) = \frac{T(s).C_{PI}(s)}{1 + T(s).C_{PI}(s)} = \frac{1}{(1 + T.S)} \tag{II.22}$$

$$T = \frac{r}{V_{bus} \cdot K_i}$$

On déduit les expressions de K_p et K_i .

$$K_i = \frac{r}{T.V_{bus}}, K_p = K_i \frac{L}{r} \tag{II.23}$$

Le courant inducteur est commandé sur la base de l'erreur de vitesse de la turbine, comme illustré à la Figure II.9. L'erreur de vitesse est la différence entre la vitesse commandée (à partir de l'algorithme d'extraction du maximum de puissance) et la vitesse réelle. Cette erreur est introduite dans un régulateur de type PI et est utilisée pour commander le convertisseur continu-continu.

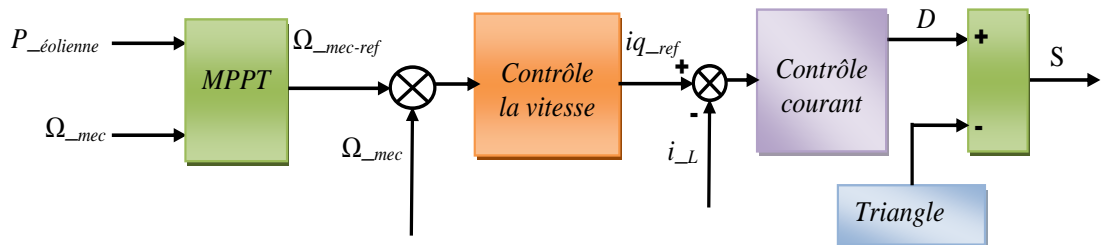


Figure II.9. Schéma de contrôle.

II.3.5.1. Modèle du convertisseur Buck réversible et réglage de la tension de bus continu

Pour maintenir la tension du bus continu fixée à la valeur désirée exigée par le réseau, il faut lui adjoindre un système de stockage d'énergie (super capacité, batteries) avant l'onduleur. Un modèle simplifié de batterie LFP (LiFePO4) a été élaboré. Ce modèle calcule la tension aux bornes de la batterie, son état de charge SOC (State Of Charge) et les pertes. On suppose que les pertes sont purement ohmiques [33], [34].

L'équation pour le calcul de la tension de la batterie est la suivante :

$$V_{Batt} = E_0 - i.R_{in} - K \cdot \frac{Q}{Q - Q_{act}} + A \cdot \frac{Q - Q_{act}}{Q} \tag{II.24}$$

Pour simplifier le calcul on met :

$$V_{Batt} = E_0 - i.R_{in} \tag{II.25}$$

Pour régler la tension du bus continu, on choisit un hacheur buck réversible

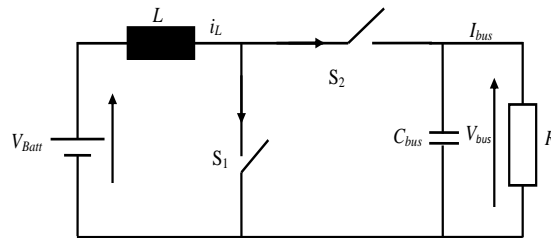


Figure II.10. Hacheur parallèle réversible en courant

Le système des équations du hacheur Buck réversible est donnée par :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = V_{Batt} - D \cdot V_{bus} \\ C \frac{dV_{bus}}{dt} = D \cdot i_L - \frac{V_{bus}}{R} - i_{bus} \end{cases} \tag{II.26}$$

Les boucles de courants ainsi que des tensions sont contrôlées via des contrôleurs du type PI. Par l'introduction de l'équation de courant dans l'équation de tension, on trouve l'équation dynamique pour le réglage de la tension du bus DC :

$$C \frac{dV_{bus}}{dt} = i_L \cdot \frac{V_{Batt}}{V_{bus}} - \frac{V_{bus}}{R} - I_{bus} \tag{II.27}$$

$$D = \frac{V_{Batt}}{V_{bus}} \quad (II.28)$$

Comme cette équation n'est pas linéaire, nous allons la linéariser par un changement de variables :

$$X = (V_{bus})^2 \quad (II.29)$$

$$\frac{dX}{dt} = 2 \cdot V_{bus} \frac{dV_{bus}}{dt} \Rightarrow \frac{dV_{bus}}{dt} = \frac{1}{2 \cdot V_{bus}} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (II.30)$$

On obtient la relation linéaire suivante :

$$C \frac{dX}{dt} = 2 \cdot i_L \cdot V_{Batt} - 2 \cdot \frac{X}{R} - 2 \cdot I_{bus} \cdot V_{bus} \quad (II.31)$$

Ce qui donne dans le domaine de Laplace la fonction de transfert de notre système :

$$\frac{X(s)}{i_L(s)} = T_x(s) = \frac{V_{Batt} \cdot R}{(1 + \frac{R \cdot C}{2} \cdot s)} \quad (II.32)$$

Avec un correcteur PI de la forme $C(s) = K_p + K_i/s$, et compensation de pôle, on trouve la fonction de transfert en boucle fermée :

$$F(s) = \frac{T_x(s) \cdot C(s)}{1 + T(s) \cdot C_{PI}(s)} = \frac{1}{(1 + \frac{1}{K_i \cdot V_{Batt} \cdot R} \cdot s)} = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (II.33)$$

$$t_r = 3 \cdot \tau \Rightarrow K_i = \frac{3}{t_r \cdot R \cdot V_{Batt}} \quad (II.34)$$

$$\frac{K_p}{K_i} = \frac{R \cdot C}{2} \Rightarrow K_p = K_i \cdot \frac{R \cdot C}{2} \quad (II.35)$$

II.3.5.2. Modélisation de l'onduleur triphasé

Nous nous intéressons à la modélisation du convertisseur de puissance dans le repère triphasé, puis dans le repère diphasé de *Park*.

L'onduleur de tension à Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI) est un convertisseur statique DC-AC constitué des cellules de commutation généralement à transistors IGBT ou à thyristors GTO pour les grandes puissances. Il permet, après redressement, d'imposer soit à la

machine soit au réseau des ondes de tension à amplitudes et fréquences variables à partir d'une tension continue [28], [32], [33].

Le convertisseur considéré dans notre étude est celui relié soit au réseau par l'intermédiaire d'un filtre (R_f, L_f), soit au stator de la machine à aimant permanent.

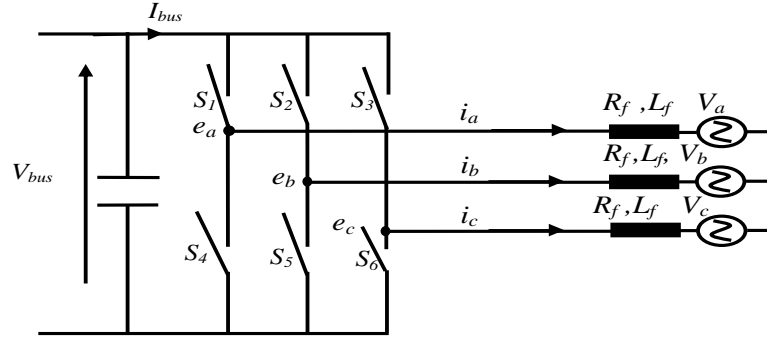


Figure II.11. Schéma d'un onduleur MLI triphasé.

Les interrupteurs ($S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6$) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part.

II.3.5.3. Modèle de l'onduleur et modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Le vecteur des tensions simples à la sortie de l'onduleur s'écrit sous forme matricielle comme suite :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{bus} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (II.36)$$

Si i_a, i_b, i_c sont les courants à la partie alternative, le courant dans la partie continue peut être obtenu à partir de la loi de conservation de puissance. En utilisant l'expression de celle-ci ($P = V_{bus} \cdot I_{bus}$) :

$$I_{bus} = f_1(s_1, s_4) \cdot i_a + f_2(s_2, s_5) \cdot i_b + f_3(s_3, s_6) \cdot i_c \quad (II.37)$$

Les figures (II. 12.13) représentent le signal de porteuse et les signaux de référence et la tension d'une phase à la sortie de l'onduleur.

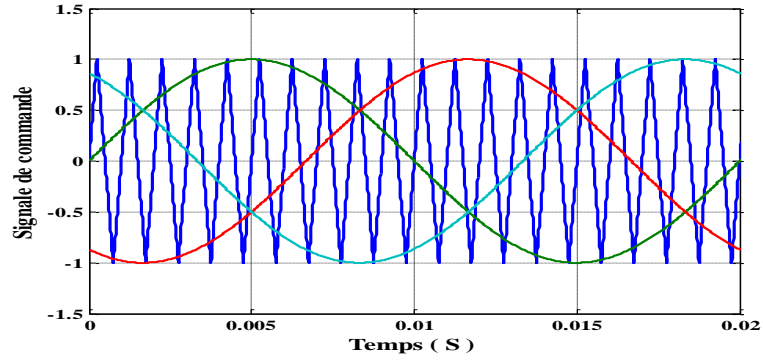


Figure II.12. Signal de porteuse et les signaux de référence.

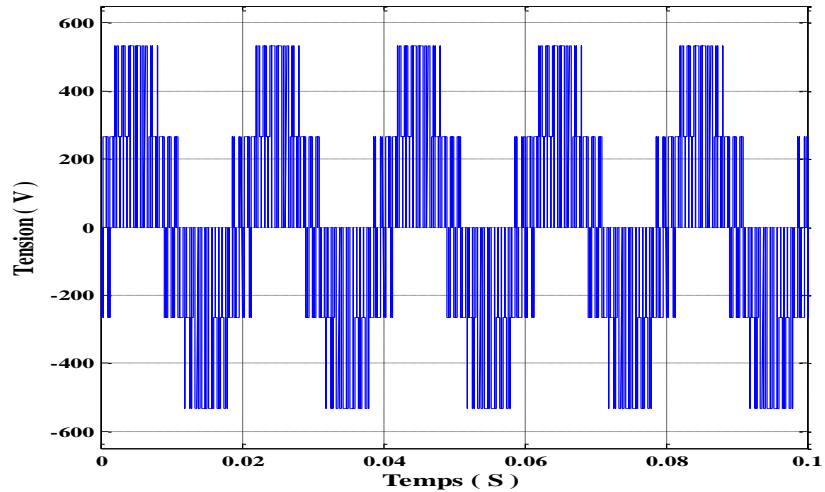


Figure II.13. Tension simple d'une phase à la sortie de l'onduleur.

II.3.6. Puissance active et réactive dans le repère dq

La figure II.14 montre la représentation vectorielle d'un système triphasé équilibré et leurs vecteurs équivalents pour le repère dq tournant.

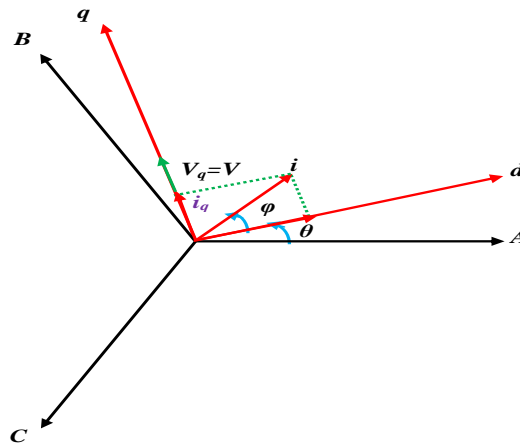


Figure II.14. Modèle du réseau dans le repère dq .

La puissance instantanée dans un système à trois phases est donnée par:

$$P = [V_a \quad V_b \quad V_c] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

En utilisant la matrice de transformation de Park (II.12) et son remplacement par les vecteurs de tension et de courant à partir de (II.13) dans (II.14) se traduit par [19], [23], [24], [28] :

$$\begin{aligned} P &= \frac{3}{2} (V_d \cdot i_d + V_q \cdot i_q) \\ Q &= \frac{3}{2} (V_q \cdot i_d - V_d \cdot i_q) \end{aligned} \quad (\text{II.39})$$

Dans la figure II.14, l'orientation du repère tournant sert à obtenir un contrôle séparé (découplé) de la puissance active et réactive. Comme on peut le voir sur la figure II.14,

$V_q = V$ et $V_d = 0$, de sorte que l'équation de la puissance active et réactive peut être simplifiée dans le référentiel tournant comme :

$$P = \frac{3}{2} (V_q \cdot i_q) \quad (\text{II.40})$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_q \cdot i_d) \quad (\text{II.41})$$

II.3.7. Stratégie de contrôle d'onduleur

Les courants de sortie, du côté AC de l'onduleur, sont contrôlés à l'aide d'une commande vectorielle qui nous assure le contrôle indépendant du flux de puissance active et réactive entre l'onduleur et le réseau et par conséquent, le courant injecté dans le réseau a une faible distorsion qui est pratiquement en phase avec la tension du réseau. En d'autres termes, le convertisseur contrôle le flux d'énergie vers le bus alternatif de telle sorte à maintenir la tension du bus continu constante, ainsi que le facteur de puissance de sortie à proximité de l'unité.

La figure II.15 montre une représentation simplifiée du convertisseur côté réseau qui comprend un condensateur à courant continu, un onduleur MLI de trois phases, et les impédances séries qui s'interfaçent à la sortie du convertisseur et à l'entrée du réseau.

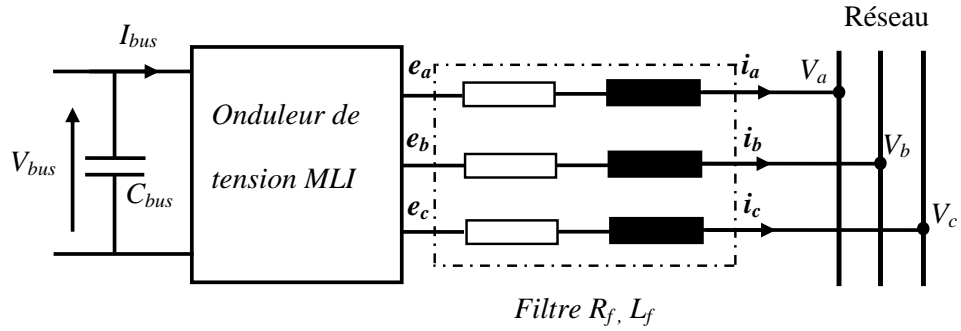


Figure II.15. Dispositif de conversion côté réseau.

Les équations de tension dans la figure II.15 peuvent être écrites en utilisant la loi de Kirchhoff :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_f & 0 & 0 \\ 0 & -R_f & 0 \\ 0 & 0 & -R_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a - V_a \\ e_b - V_b \\ e_c - V_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

La transformation des équations de tensions dans la référenciel dq par les matrices de Park données en (II.12), (II.13) et (II.42):

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_f & L_f \cdot \omega \\ -L_f \cdot \omega & -R_f \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d - V_d \\ e_q - V_q \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

Pour assurer un contrôle découplé de la puissance active et la puissance réactive, ou qui est sur la base (II, 43), la tension de sortie de l'onduleur dans le repère de référence dq doit être [19], [23], [24], [25] [26], [28].

$$\begin{aligned} e_d &= L_f (e_{d_ref} - \omega \cdot i_q) + V_d \\ e_q &= L_f (e_{q_ref} + \omega \cdot i_d) + V_q \end{aligned} \quad (\text{II.44})$$

En substituant (II, 44) dans (II.43), les équations découplées du système peuvent être réécrite comme suit :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{d_ref} \\ e_{q_ref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.45})$$

Comme on peut le voir à partir de (II.40) et (II.41), la puissance active et la puissance réactive pourraient être contrôlées respectivement par i_d et i_q . Par conséquent, les règles de contrôle de (II.44) peuvent être complétées par la définition des boucles fermées comme suit [19], [23], [24], [25] [26], [28] :

$$e_{d_ref} = (K_{p1} + \frac{K_{i1}}{S}) \cdot (i_{d_ref} - i_{d_mes})$$

$$e_{q_ref} = (K_{p2} + \frac{K_{i2}}{S}) \cdot (i_{q_ref} - i_{q_mes})$$
(II.46)

La Figure II.16 montre le schéma de commande de l'onduleur connecté au réseau basé sur l'algorithme de commande vectorielle.

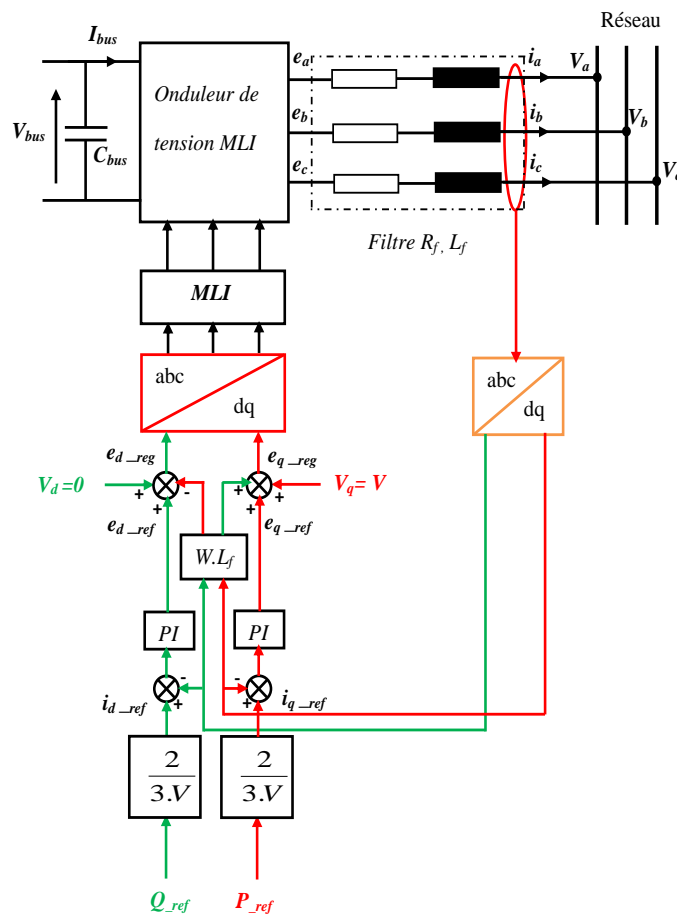


Figure II.16. Schéma de la commande entre l'onduleur et le réseau.

II.4. Energie Photovoltaïque

Le soleil libère une énorme quantité d'énergie dans l'univers. La quantité de cette énergie qui atteint la terre est définie comme "constante de l'énergie solaire". La constante d'énergie solaire (S)

est définie comme la quantité de rayonnement solaire qui atteint la haute atmosphère de la terre, sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil [23]. Une partie de cette énergie solaire incidente est diffusée, cette énergie est absorbée par : les molécules d'air, couverture nuageuse, l'atmosphère, etc.

Le reste du rayonnement qui n'est pas dispersée et absorbée qui atteint la surface de la terre est estimé à environ 1000W/m^2 à midi par ciel clair [35], [36]. Le rayonnement qui vient directement du soleil sans être réfléchi ou diffusée, est appelé rayonnement direct et le rayonnement qui est réfléchi et diffusé est appelé rayonnement diffus. Le rayonnement global est le terme utilisé pour définir le rayonnement total (direct et diffus) [35], [36], [37].

II.4.1. Le principe de conversion photovoltaïque

Les cellules solaires sont l'élément le plus fondamental du système photovoltaïque, elles convertissent l'énergie solaire en énergie électrique. Elles sont très similaires à la plupart des appareils électroniques à semi-conducteurs couramment utilisés tels que les diodes, et les transistors.

La cellule solaire se compose essentiellement d'une jonction PN formée par un matériau semi-conducteur. Lorsque la lumière tombe sur les cellules solaires une paire électron-trou est générée par l'énergie de la lumière (photons). Le champ électrique créé à la jonction provoque la paire électron-trou pour séparer les électrons dérivant vers la zone N et les trous vers la région P. D'où une tension électrique est générée à la sortie. Le photo- courant (I_{ph}) circulera à travers la charge connectée aux bornes de sortie d'une cellule photovoltaïque. Le circuit équivalent d'une cellule solaire est montré dans la figure II.17. Il se compose d'une source de courant en parallèle avec une diode. Dans le cas idéal, l'équation de tension-courant de la cellule solaire est donnée par l'équation(II.47) [35], [36], [37], [38].

$$I = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V + I \cdot R_s)}{\gamma \cdot K \cdot T_c}\right) - 1 \right] \tag{II.47}$$

Où :

I, V: Le courant et la tension de sortie du générateur.

I_L et I_0 représentent respectivement le courant photonique et le courant de saturation inverse, R_s, γ : le facteur de qualité et la résistance série.

K, q : Constante de Boltzmann, $K = 1.3854 \cdot 10^{-23}$ [J/K] et Constante de charge d'électron, $q = 1.602 \cdot 10^{-19}$ C.

Les différentes équations décrivant ce modèle seront détaillées par la suite.

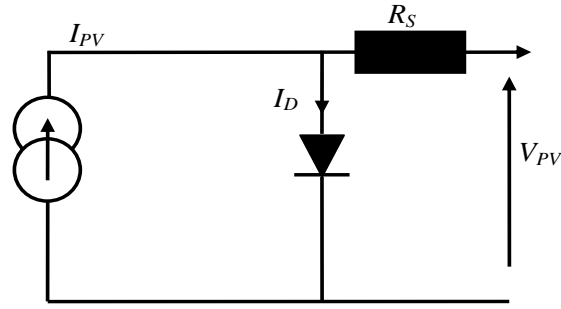


Figure. II.17 . Modèle d'une cellule photovoltaïque.

II.4.2. Modèle à paramètres constants

Les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique I - V sont le courant photonique I_L , la résistance série R_s et les deux caractéristiques de la diode (I_0 et γ). Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations I - V pour différents points de fonctionnement (donnés par le fabricant).

Une méthode a été proposée par Duffie et Beckmann (1991) [19], [34], [35], [36], [37];: puisqu'il y a quatre paramètres inconnus, quatre états de courant (I) sont nécessaires.

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{sc,ref} = I_{L,ref} - I_{0,ref} \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot R_s \cdot I_{sc,ref}}{\gamma \cdot K \cdot T_{c,ref}}\right) - 1 \right] \\ I_{L,ref} = I_{0,ref} \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc,ref}}{\gamma \cdot K \cdot T_{c,ref}}\right) - 1 \right] \\ I_{mp,ref} = I_{L,ref} - I_{0,ref} \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V_{mp,ref} + R_s \cdot I_{mp,ref})}{\gamma \cdot K \cdot T_{c,ref}}\right) - 1 \right] \\ \gamma = \frac{q \cdot (V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_s - V_{oc,ref})}{K \cdot T_{c,ref} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{sc,ref}}\right)} \end{array} \right. \quad (II.48)$$

Cependant les fabricants fournissent habituellement I et V seulement à trois conditions : le circuit ouvert, le court-circuit et le point de puissance de maximum. Le premier vient de la connaissance de μ_{oc} , μ_{Isc} , le coefficient de la température, de la tension de circuit ouvert V_{oc} et du courant de court-circuit I_{sc} , respectivement.

Les indices (oc , sc , mp et ref) se rapportent respectivement au circuit ouvert, au court-circuit, à la puissance maximale et aux conditions de référence.

Le fabricant fournit généralement les grandeurs suivantes ($V_{oc,ref}$, $I_{sc,ref}$, $V_{mp,ref}$, $I_{mp,ref}$). Le procédé à suivre pour les trois paramètres $I_{0,ref}$, $I_{L,ref}$ et γ_{ref} est de forcer le passage de la courbe (I - V) par ces trois points avec l'estimation de la résistance série qui permet de réaliser cette condition.

Les différents paramètres de la cellule changent avec l'éclairement et la température ambiante et peuvent être estimés par le système d'équations suivant.

$$\begin{cases} I_L = \left(\frac{G}{G_{ref}}\right) \cdot (I_{L,ref} + \mu_{Isc} \cdot (T_C - T_{C,ref})) \\ I_0 = I_{0,ref} \cdot \left(\frac{T_C}{T_{C,ref}}\right)^3 \exp\left[\left(\frac{q \cdot \zeta_G}{K \cdot A}\right) \left(\frac{1}{T_{C,ref}} - \frac{1}{T_C}\right)\right] \\ \gamma = \gamma_{ref} \cdot \left(\frac{T_C}{T_{C,ref}}\right) \end{cases} \quad (II.49)$$

$I_{L,ref}$: courant photonique sous condition de référence [A].

G, G_{ref} : éclairement réel et éclairement à la condition de référence [W/m²].

$T, T_{C,ref}$: température de cellule, réelle et à la condition de référence [degré Kelvin]

μ_{Isc}, μ_{oc} : coefficient de température de la tension et du courant de court-circuit respectivement [V/°C], [A/°C]

$\gamma = A \cdot N_{cs} \cdot N_s$, avec N_{cs} et N_s , le nombre de cellules et le nombre de modules en série.

II.4.3. Caractéristiques des cellules photovoltaïques

La caractéristique courant-tension $I(V)$ simulée d'un module PV est représenté dans la figure II.18. La caractéristique est obtenue à un niveau constant de l'éclairement énergétique et par le maintien d'une température constante des cellules.

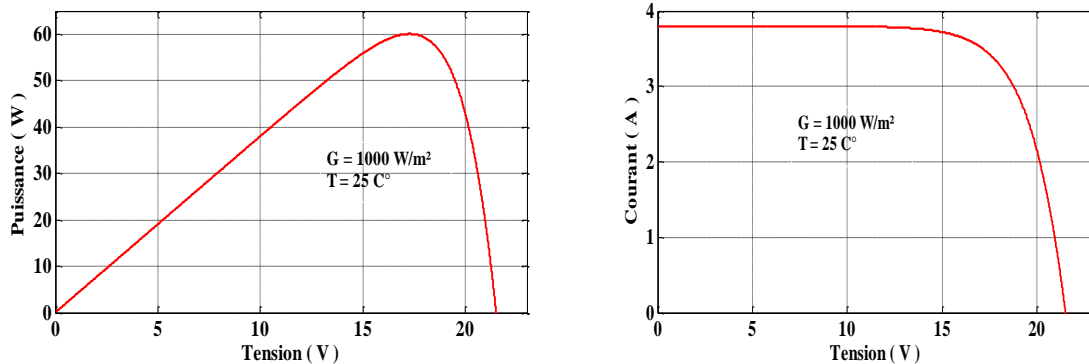


Figure II.18. Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ d'un module solaire.

Les deux points les plus importants sur cette caractéristique sont le courant de court-circuit (I_{sc}) et la tension du circuit ouvert (V_{oc}). Le courant de court-circuit (I_{sc}) est le courant maximal produit lorsque la cellule est court-circuitée et la tension à ces bornes est zéro, correspondant à une charge nulle. La tension en circuit ouvert (V_{oc}) est la tension aux bornes de la cellule dans des conditions de circuit ouvert, quand le courant est nul, ce qui correspond à une résistance proche de l'infini aux bornes de la cellule.

La figure II.18 représente les caractéristiques puissance-tension $P(V)$ simulées des modules photovoltaïques. Afin d'extraire le maximum d'efficacité d'une cellule solaire, il est nécessaire de faire fonctionner la cellule à l'endroit où la cellule permet une puissance maximale. Cette méthode d'exploitation est connue comme le point de puissance maximale (MPP).

II.4.4. Effet de l'éclairement et de la température

Les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ du générateur solaire varient selon les niveaux d'éclairement. Le niveau d'éclairement est défini comme la constatation de la densité de l'énergie solaire qui est exprimé en W/m^2 sur la surface d'une zone et selon l'orientation. La variation dans les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ avec des niveaux d'éclairement et de températures sont simulés et les résultats sont présentés sur les figures II .19.

Le courant généré par générateur PV est proportionnel au flux lumineux [34] et donc avec l'augmentation du niveau d'éclairement, le courant du générateur augmente, par conséquent le courant de court-circuit (I_{sc}) est proportionnel à la température. La tension en circuit ouvert (V_{oc}) ne varie pas significativement avec le changement de niveau d'éclairement mais avec le changement de la température des cellules, une augmentation de la température entraîne une augmentation du courant de court-circuit et une diminution nette de la tension de circuit ouvert ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

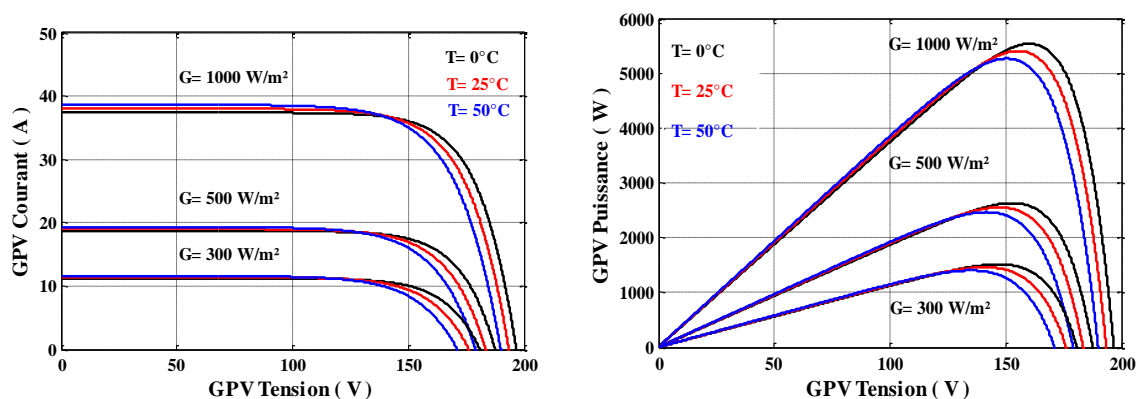


Figure II.19. Caractéristiques $I(V)$, $P(V)$ pour différents éclairements et températures.

II.5. Energie chimique (Piles à combustible)

II.5.1. Principe de fonctionnement

La représentation schématique de la pile à combustible est montrée à la figure II.20. Elle se compose d'une couche d'électrolyte et deux électrodes recouvertes d'un catalyseur (cathode et

anode). Les électrodes sont composées d'un matériau poreux situés de chaque côté de la couche électrolytique [28], [39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46].

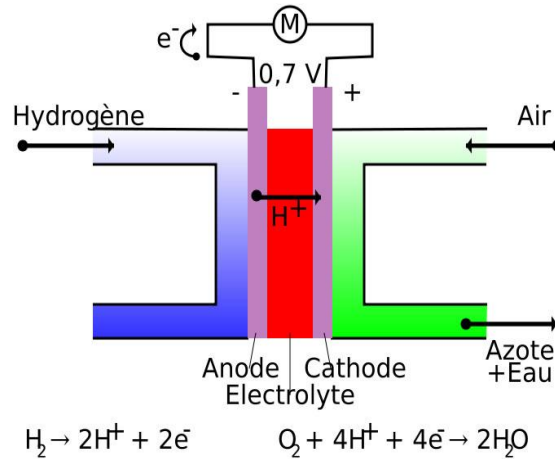


Figure II.20. Schéma d'une pile à combustible.

Les combustibles gazeux sont alimentés en continu à l'anode (électrode négative) et l'oxydant (par exemple l'oxygène de l'air) est amené à la cathode (électrode positive). Le combustible gazeux est généralement de l'hydrogène dans la plupart des piles à combustible. Ainsi, lorsque l'hydrogène est amené à l'anode, le catalyseur dans l'électrode sépare les électrons chargés négativement de l'hydrogène à partir des ions chargés positivement. La réaction à l'anode est la suivante [41], [42] [43], [44], [45], [46] :



Les ions hydrogène passent à travers la couche d'électrolyte à l'axe de la pile à combustible et se combinent avec l'oxygène et les électrons à la cathode à l'aide d'un catalyseur sous forme d'eau. La réaction à la cathode est la suivante:



L'équation générale est donnée par:



Les électrons ne peuvent pas passer à travers la couche d'électrolyte, le débit de l'anode à la cathode se fait par l'intermédiaire du circuit externe. Ce mouvement d'électrons donne naissance à un courant électrique. La quantité d'énergie qui est produite par une pile à combustible dépend de nombreux paramètres (le type, la taille, la température et la pression).

II.5.2. Circuit équivalent de la pile à combustible

Le but principal de créer un modèle de pile à combustible est d'obtenir la tension de sortie, la puissance et l'efficacité en fonction du courant de charge réel. La tension de sortie d'une pile à combustible unique est donnée par l'équation (II.53) [28], [46]:

$$V_{FC} = E_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohmic} - V_{Con} \quad (II.53)$$

Où:

E_{Nernst} : Potentiel thermodynamique de la cellule représentant la tension réversible.

V_{Act} : Chute de tension due à l'activation de l'anode et de la cathode. Il s'agit d'une mesure de la chute de tension associée aux électrodes.

V_{Ohmic} : Chute de tension ohmique résultant des résistances de conduction de protons à travers l'électrolyte solide et les électrons à travers son chemin d'accès.

V_{Con} : Chute de tension résultant de la réduction de la concentration des réactifs de gaz ou, en variante, par le transport de masse de l'oxygène et un atome d'hydrogène.

Le potentiel thermodynamique (E_{Nernst}) représente la tension en circuit ouvert de la pile à combustible, les autres trois tensions, la chute de tension d'activation (V_{act}), la chute de tension ohmique (V_{Ohmic}), et la chute de tension de concentration (V_{Con}) représentent des réductions de cette tension pour fournir la tension utile pour les électrodes de la cellule, V_{FC} , comme fonction de l'exploitation de courant.

Le schéma équivalent de la pile à combustible est représenté à la figure II .21:

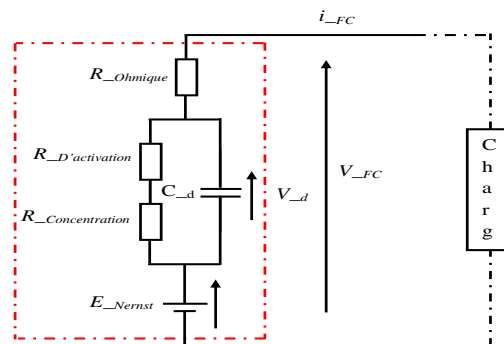


Figure II.21 .Circuit équivalent de la pile à combustible.

II.5.2.1. Potentiel thermodynamique-cellule de tension réversible

E_{Nernst} est calculée à partir d'une version modifiée de l'équation de *Nernst*, avec un terme supplémentaire à prendre en compte les changements de température par rapport à la nouvelle norme température [28], [46] et il est donné par (II.54)

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2.F} + \frac{\Delta S}{2.F} (T - T_{ref}) + \frac{R.T}{2.F} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (II.54)$$

Où:

ΔG : changement dans l'énergie libre de Gibbs (J / mol).

F : constante de Faraday (96,487 C).

ΔS : Changement de l'entropie (J / mol).

R : constante universelle des gaz (8.314 J / kmol).

P_{H_2} : pressions partielles d'hydrogène (atm).

P_{O_2} : pressions partielles d'oxygène (atm).

T : température de fonctionnement (K).

T_{ref} : température de référence (K).

Utilisant les valeurs standards de pression et de température (SPT), les valeurs de Δg , ΔS et T_{ref} (II.53) peuvent être simplifiée à (II.55) [28], [46].

$$E_{Nernst} = 1.229 - 0.85 \cdot 10^{-5} (T - 298.15) + 4.31 \cdot 10^{-5} \left[\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (II.55)$$

II.5.2.2. Chute de tension d'activation

La chute de tension d'activation, qui prend en compte à la fois l'anode et la cathode de surtension, est donnée par (II.56) [28], [46]:

$$V_{Act} = -\left[\xi_1 + \xi_2 \cdot T + \xi_3 \cdot T \cdot \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T \cdot \ln(i_{FC}) \right] \quad (II.56)$$

Où:

I_{FC} : courant de fonctionnement de la cellule (A).

ξ : coefficient de chaque modèle paramétrique de la cellule, qui est calculée sur la base des équations théoriques avec des fondations cinétiques, thermodynamiques et électrochimiques.

C_{O_2} : Concentration d'oxygène dans l'interface de catalyseur de la cathode (mol/cm³). C_{O_2} peut être déterminé par (II.57).

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \cdot 10^6 \cdot e^{\frac{-498}{T}}} \quad (II.57)$$

II.5.2.3. Chute de tension ohmique

La chute de tension ohmique résulte de la résistance de transfert d'électrons à travers la collecte des plaques et des électrodes de carbone, plus la résistance au transfert de protons dans la membrane de polymère solide [28], [46]. Cette chute de tension peut être représentée en utilisant la loi d'Ohm et elle est donnée par (II.58).

$$V_{Ohmic} = i_{FC} \cdot (R_C + R_M) \quad (II.58)$$

Où:

R_C : Résistance à la circulation des électrons, qui est habituellement considérée comme constante sur une plage de température relativement étroite de polymère électrolytique à membrane (PEM) le fonctionnement des piles à combustible [46].

R_M : résistance à l'écoulement de protons, qui est donnée par (II.59).

$$R_M = \frac{\rho_m \cdot l}{A} \quad (II.59)$$

Où:

ρ_m : Membrane résistivité spécifique au flux de protons hydratés (Ohm.cm),

l : épaisseur de la membrane polymère (cm),

A : surface de la cellule de la zone active (cm²).

Dans ce modèle PEMFC particulier, les membranes de type *Nafion* sont considérées, ce qui est une marque déposée de Dupont et largement utilisés dans les piles à combustible PEM.

L'expression numérique de la résistivité de la membrane *Nafion* donnée par (II.60) est utilisée [28], [44].

$$\rho_m = \frac{181.6 \cdot \left[1 + 0.03 \cdot \left(\frac{i_{FC}}{A} \right)^2 + 0.062 \cdot \left(\frac{T}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{i_{FC}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[\psi - 0.634 - 3 \cdot \left(\frac{i_{FC}}{A} \right) \right] \cdot e^{4.18 \cdot \left(\frac{T-303}{T} \right)}} \quad (II.60)$$

Où:

$181,6 / (\psi - 0,634)$: résistivité spécifique à aucun courant et à 30°C ($\Omega \cdot \text{cm}$).

$\exp(4,18((T-303)/T))$: Facteur de correction, si la température de la cellule n'est pas à 30°C.

ψ : paramètre réglable avec une valeur allant de 14 à 100% d'humidité relative conditions et 22-23% sous les conditions ultra saturés.

II.5.2.4. Chute de tension de concentration [28], [46]

Le transport de masse affecte les concentrations d'hydrogène et d'oxygène. Cela permet de réduire les pressions partielles de ces gaz. La réduction des pressions de l'oxygène et de l'hydrogène dépend du courant électrique et des caractéristiques physiques du système. Pour déterminer la chute de tension de concentration, la densité de courant maximale (J_{max}) est définie, selon lequel le carburant est utilisé à la même vitesse de la vitesse d'alimentation maximum. La densité de courant ne peut pas dépasser cette limite parce que le carburant ne peut pas être fourni à un débit plus important. Des valeurs typiques pour J_{max} sont dans la gamme de 500 à 1500 mA/cm². La chute de tension de concentration est donnée par:

$$V_{Con} = -B \cdot \ln\left(1 - \frac{J}{J_{Max}}\right) \quad (\text{II.61})$$

Où:

B : coefficient paramétrique (V),

J : densité de courant (A/cm²),

J_{Max} : densité de courant maximale (A/cm²).

II.5.3. La puissance et l'efficacité de la pile à combustible

La puissance électrique instantanée et l'efficacité de chaque pile à combustible sont données par les équations (II.61) et (II.62), respectivement [28], [46]:

$$P_{FC} = V_{FC} \cdot i_{FC} \quad (\text{II.62})$$

Où:

i_{FC} : courant de fonctionnement de la cellule (A),

V_{FC} : Tension de sortie de la pile à combustible (V),

P_{FC} : Puissance de sortie de chaque pile à combustible (W).

$$\eta = \mu_f \cdot \frac{V_{FC}}{1.48} \quad (\text{II.63})$$

Où:

μ_f : coefficient d'utilisation de carburant, généralement de l'ordre de 95%.
1.48: tension maximale qui peut être obtenue en utilisant la valeur calorifique supérieure, (VCS) de l'enthalpie de l'hydrogène.

II.5.4. Caractéristiques et modélisation des piles à combustible

En utilisant les équations (II.52) à (II.61) et la fiche de données de la pile à combustible BCS 500W obtenu à partir de [28], le modèle est simulé. La pile à combustible utilisée dans la présente simulation est la PEM cellule 500 W de carburant fabriqué par BCS Technologies. Les paramètres de cette pile à combustible sont donnés (l'annexe).

II.5.4.1. Caractéristiques de la pile à combustible

Les caractéristiques de la pile à combustible tension-courant $V(I)$ et puissance-courant $P(I)$ obtenues à partir de la simulation sont présentées dans les figures II.23 et II.24 respectivement. Comme on peut le voir sur ces figures, ces caractéristiques correspondent bien avec les données du fabricant pour toute la partie de la courbe, sauf à la fin de la simulation. Cela est dû à l'absence de la détermination de l'ensemble des paramètres appropriés pour l'empilement des piles à combustible.

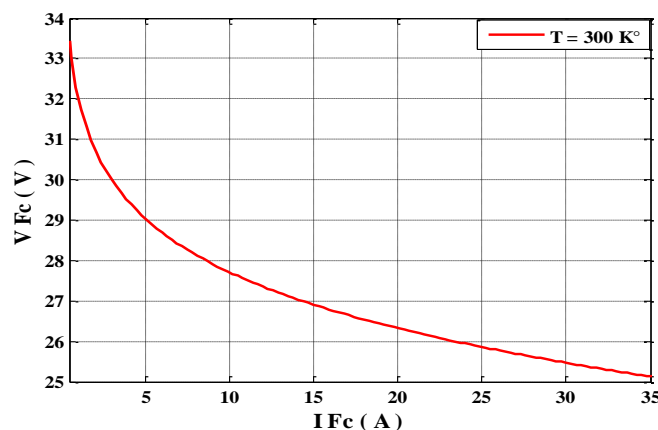


Figure II.22. Simulations des caractéristiques tension-courant de la pile 500 W BCS.

Il peut être vu à partir des caractéristiques que la tension de la pile à combustible, et donc l'efficacité (l'efficacité est directement proportionnelle à la tension référée à l'équation (II.62)) est plus élevée pour les faibles valeurs du courant de la pile et faible pour les valeurs élevées de courant de la pile. Par conséquent, il est enclin au concepteur de choisir le point de fonctionnement le plus approprié pour la pile à combustible. L'utilisation de la pile à combustible à des courants plus

élevés permettra une plus petite taille de la cellule et par conséquent le coût inférieur pour l'empilement de cellules, mais il permettra de réduire l'efficacité due à la réduction de la tension comme indiqué précédemment [46].

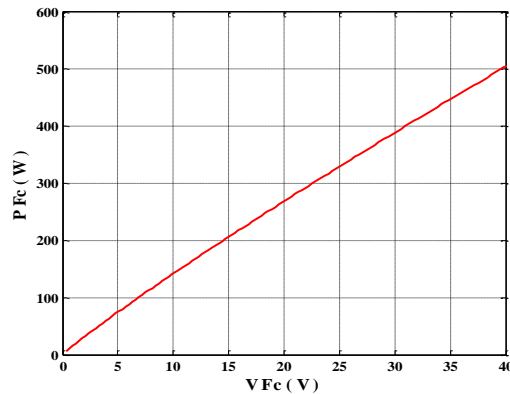


Figure II.23. Caractéristique de puissance-tension simulé de la pile 500 W BCS.

Dans le même temps, on ne peut pas travailler avec une tension très élevée et donc à un rendement très élevé car la puissance de sortie de la pile à combustible sera grandement réduite à ces points. Bien que le point de fonctionnement le plus logique serait à la puissance maximale, qui est obtenu à très fort courant de la pile, il faut noter que les opérations de la puissance crête entraînent une instabilité de commande parce que le système aura tendance à osciller entre des courants plus élevés et plus faibles à proximité de la pointe [46].

C'est une pratique habituelle pour faire fonctionner la pile à combustible à la gauche de la puissance crête à un point qui donne un compromis entre le coût d'exploitation faible c'est à dire une grande efficacité qui se produit à haute tension / faible courant et faible coût [28].

II.6. Description du système hybride

Le système hybride proposé est composé d'un générateur éolien de 5.3 kW, un générateur photovoltaïque de 5.4 kW et une pile à combustible de 10 kW. Un convertisseur continu-continu est utilisé pour contrôler chacune des trois sources. Les convertisseurs DC-DC individuels sont à leur tour connectés à un seul onduleur de source de tension MLI, qui maintient la sortie des tensions de tous les convertisseurs à une valeur fixe en équilibrant la puissance à l'entrée et la sortie. Toutes les sources d'énergie sont modélisées en utilisant l'outil logiciel Matlab pour analyser leur comportement dynamique. Le système hybride complet est simulé pour différentes conditions d'exploitation des sources d'énergie.

II.6.1. Électronique de puissance et de contrôle

La mise en œuvre réussie d'un tel système d'énergie hybride est grandement dépendante de la conception de l'électronique de puissance appropriée et de leur contrôle. L'électronique de puissance aidera à améliorer l'efficacité du système et aussi le rendre plus fiable. Dans les sections suivantes, la topologie de circuit de puissance et le contrôle des sources d'énergie individuelles sont expliqués.

II.6.1.1. Topologie du circuit d'alimentation

La configuration du système hybride proposé est constituée par une turbine éolienne et un générateur photovoltaïque comme source d'énergie primaire et la pile à combustible comme source d'énergie de secours, figure II.25. Les trois sources d'énergie sont connectées en parallèle à une source de tension, un convertisseur MLI commun à travers des convertisseurs individuels DC-DC.

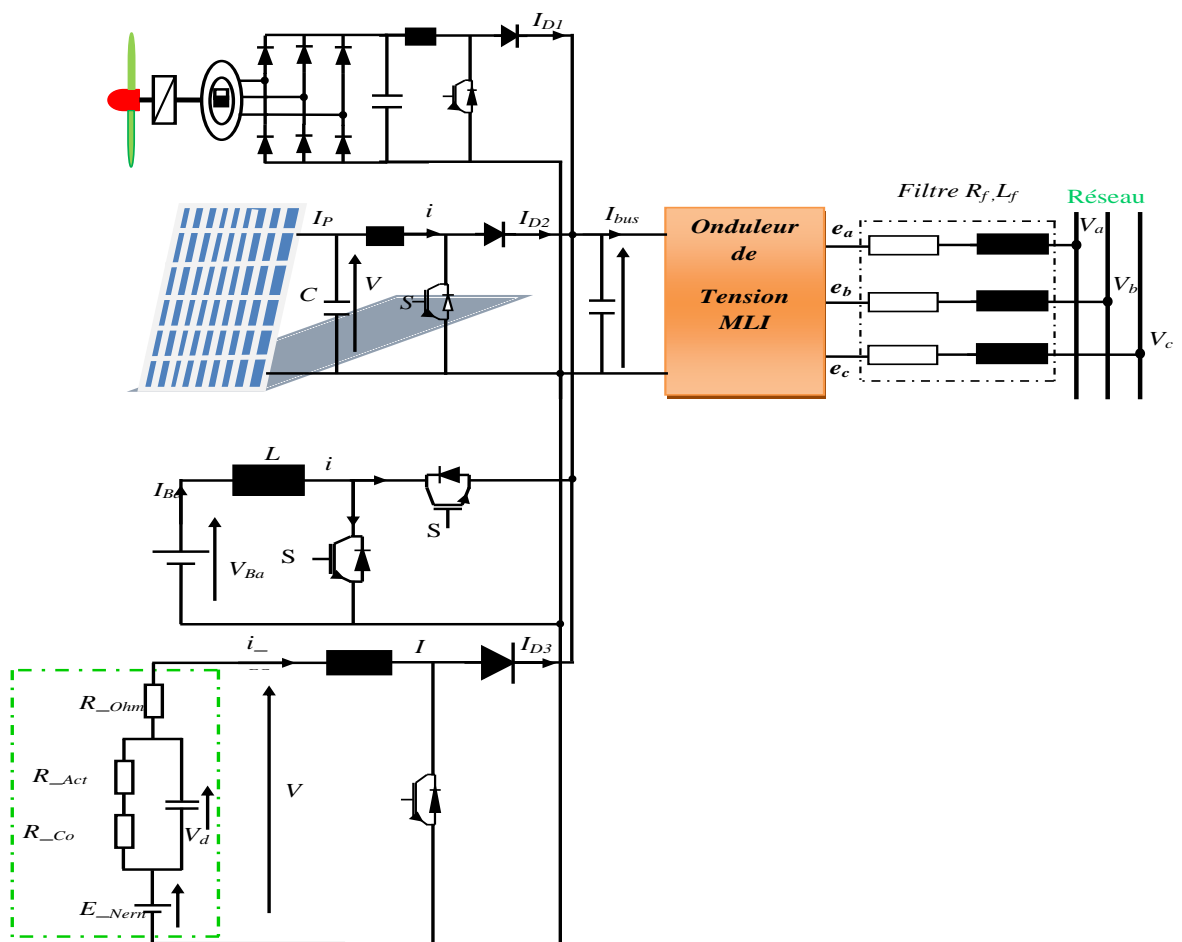


Figure II.25. Configuration de système d'énergie hybride.

Dans ce système, chaque source a son contrôle individuel, coté onduleur, toutes les trois unités de production peuvent être remplacées par une unité globale ayant un courant total égal à $I_{D1} + I_{D2} + I_{D3}$. Pour expliquer le principal avantage de cette topologie de circuit, concentrons-nous sur la

figure II.25, les diodes D_1 , D_2 , D_3 jouent un rôle clé dans le système. Les diodes permettent seulement un écoulement unidirectionnel de puissance, c'est à dire à partir des sources de la liaison DC au réseau électrique. Par conséquent, en cas de mauvais fonctionnement de l'une des sources d'énergie, la diode anti-retour se déconnecte automatiquement de l'ensemble de la source du système.

II.6.1.2. Contrôle du hacheur Boost de la pile combustible

Les structures de contrôle et du convertisseur Boost DC-DC sont représentées dans les figures II.8 et II.9, qui ont été discutées en détail dans le paragraphe (II.2.5).

Pour le système de pile à combustible, on utilise un superviseur pour calculer le courant de référence i_{FC} . L'entrée du superviseur correspond à la différence entre la puissance demandée (référence) et la somme de la puissance éolienne et la puissance photovoltaïque, cette différence représente le déficit de la puissance qu'il faut obtenir à partir de la pile à combustible.

La différence entre le courant de référence et le courant d'inductance mesurée est contrôlée par un régulateur PI pour minimiser l'erreur, figure II.26.

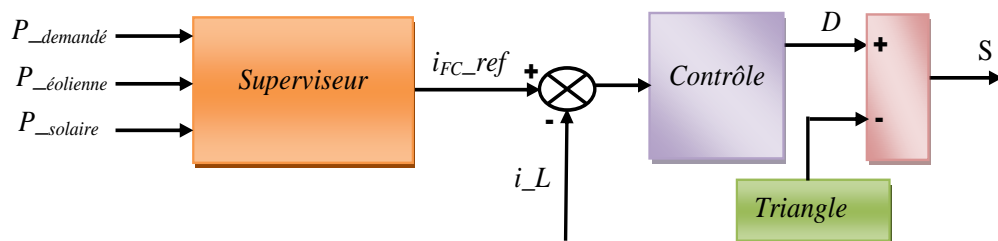


Figure II.26. Commande du convertisseur de la pile à combustible.

Etant donné que ce système ne permet pas un écoulement de retour de puissance, en raison de hacheur boost.

II.7. Résultats de simulation

Pour prouver la conception de système hybride proposé avec contrôle individuel, le système complet est simulé en utilisant MATLAB Simulink. Les trois sources d'énergie sont modélisées afin de prédire leurs caractéristiques réelles. Les figures II.28 et II.29 illustrent les variations de vitesse mécanique et électrique correspondant à la variation du vent.

Selon les résultats de simulation présentés ci-dessous, toutes les grandeurs à réguler, la vitesse mécanique, le courant I_q et le couple du générateur convergent bien vers leurs références après des temps de réponse acceptables égaux à 0.5s, 0.35s et 0.4s respectivement, relativement à la

dynamique lente du profil de la source primaire (vent). Mais, il existe des pics de courants, conséquence des inductances machine et des switchs des convertisseurs (ouverture et fermeture).

Au premier instant, La puissance de la turbine est 1.73 kW. Après 5s, elle augmente jusqu'au environ 5.3 kW, puis elle diminue à 3 kW en raison des changements de la vitesse du vent comme on le voit dans les figures II.33 et II.34

A. Générateur éolien

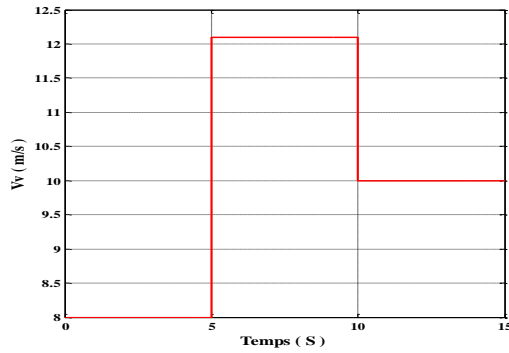


Figure II.27. Variation du vent GE.

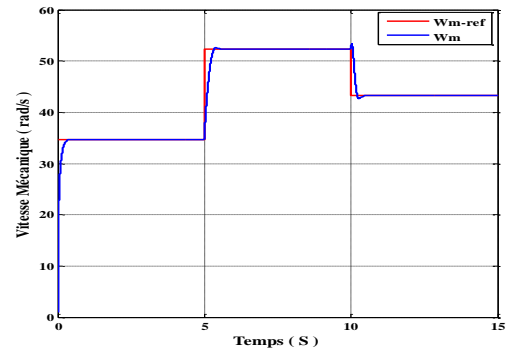


Figure II.28. Variation de la vitesse mécanique GE.

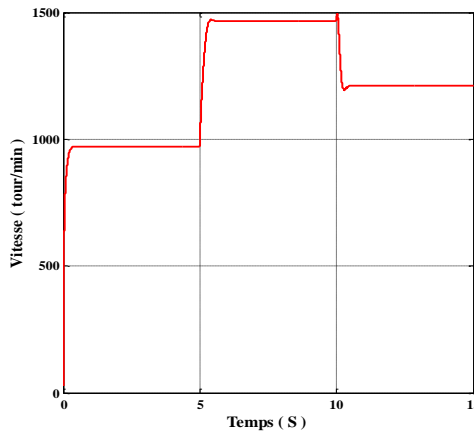


Figure II.29 .Vitesse électrique GE.

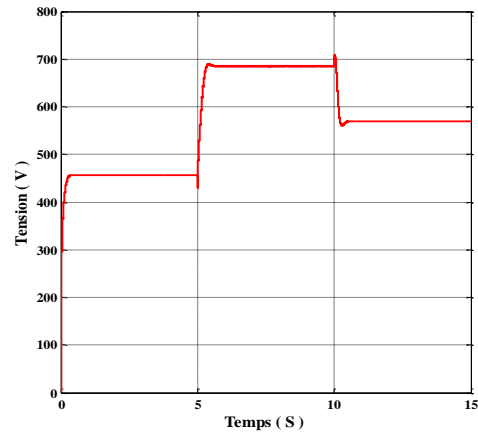


Figure II.30. Tension de génératrice GE.

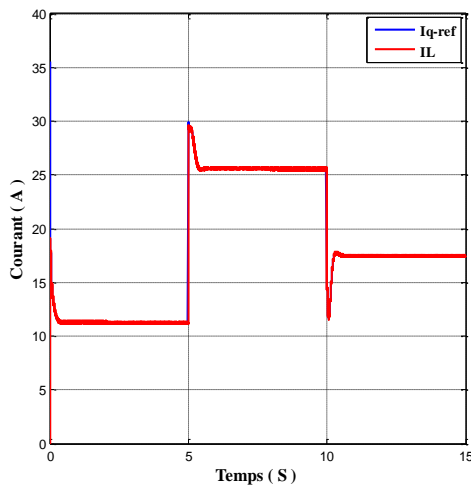


Figure II.31. Courant de Contrôle GE.

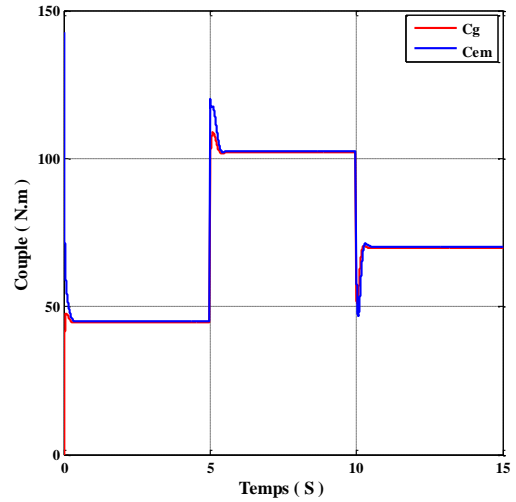


Figure II.32. Couple de Contrôle GE.

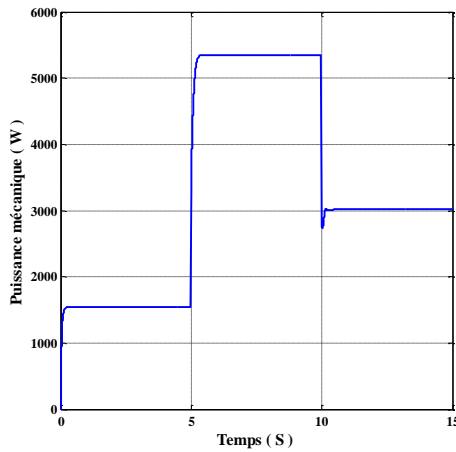


Figure II.33. Puissance mécanique GE.

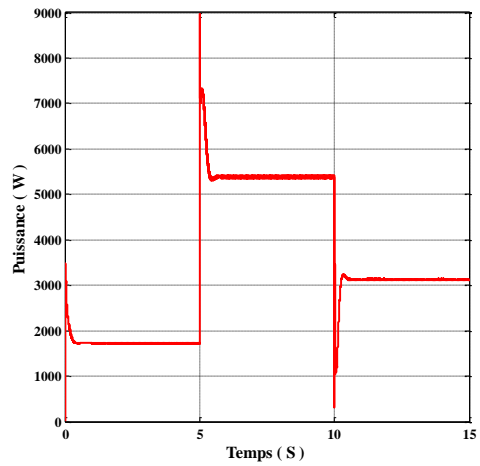


Figure II.34. Puissance électrique GE.

B. Générateur photovoltaïque

De même manière que le générateur éolien, selon les résultats de simulation présentés ci-dessous, toutes les grandeurs à optimiser la tension, le courant et la puissance du générateur photovoltaïque convergent bien vers leurs références après un temps de réponse acceptable égale 0.01s relativement à la dynamique lente du profil de la source primaire (éclairage).

Au premier instant, La puissance du générateur photovoltaïque est 1.46 kW. Après 5s, elle augmente jusqu'à environ 5.4 kW, puis elle diminue à 2.55 kW en raison des changements de l'éclairage, comme on le voit dans la figure II.38.

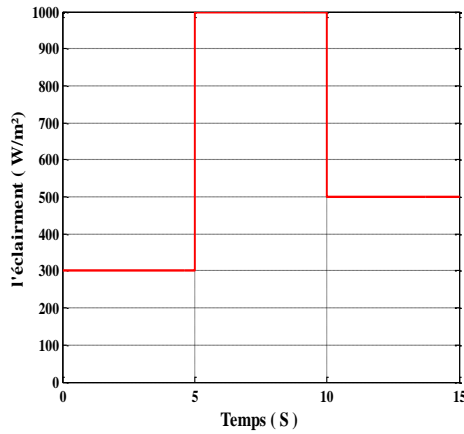


Figure II.35 .Variation de l'éclairement.

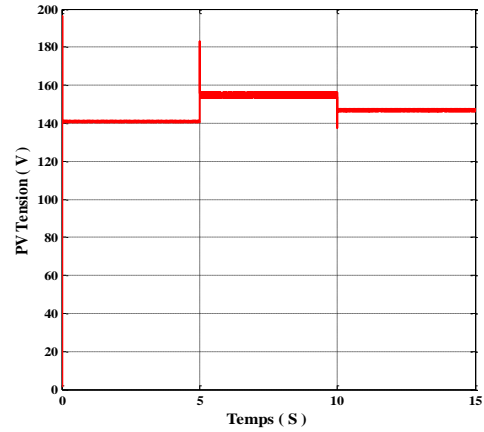


Figure II.36.Tension de GPV.

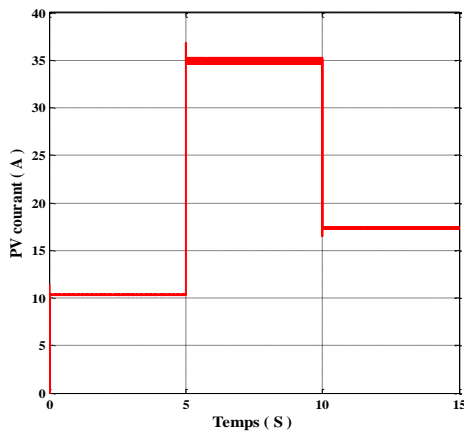


Figure II.37 .Courant du GPV.

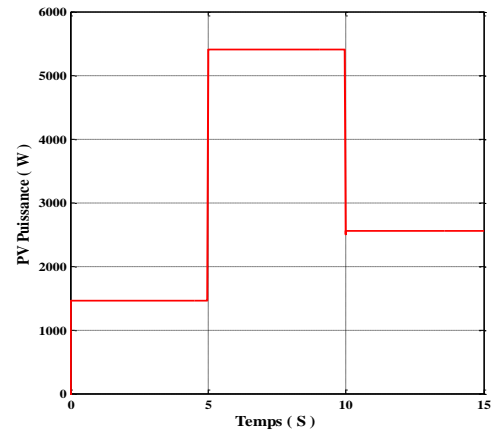


Figure II.38 .Puissance de GPV.

C. La pile à combustible

Selon les résultats de simulation présentés ci-dessous, la variation de la puissance de la pile à combustible est obtenue à partir de la puissance demandée par le réseau, au cas où la somme des puissances des deux générateurs éolien et solaire est insuffisante. Les trois figures II.39-41 montrent bien l'état de variation et le fonctionnement de la pile à combustible ainsi que les phases où le générateur éolien et solaire sont suffisants et insuffisants.

La figure II.40 montre que le courant converge vers la référence de la pile à combustible après un temps de réponse de 0.35s

La puissance de la pile à combustible est 0 kW (la puissance du générateur éolien et solaire est suffisante). Après 5s, elle augmente jusqu'à environ 4.1 kW, puis elle augmente encore à 4.3 kW (la puissance des générateurs éolien et solaire est insuffisante).

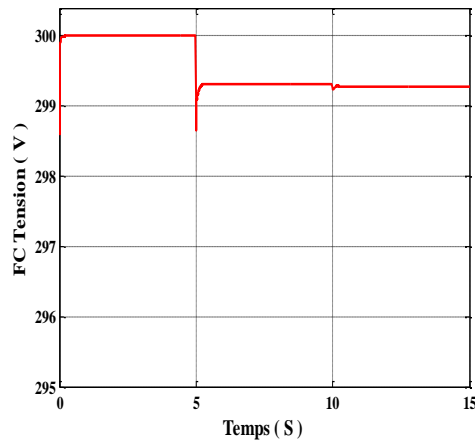


Figure II.39. Tension PC.

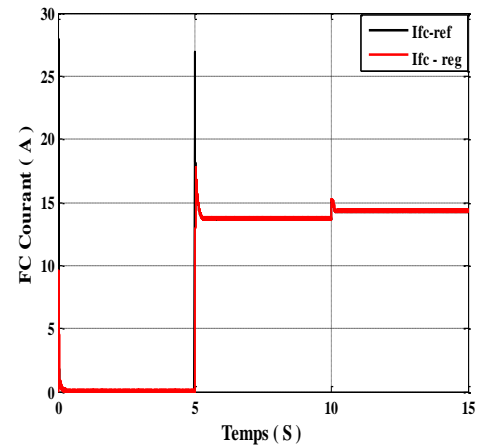


Figure II.40. Courant de contrôle PC.

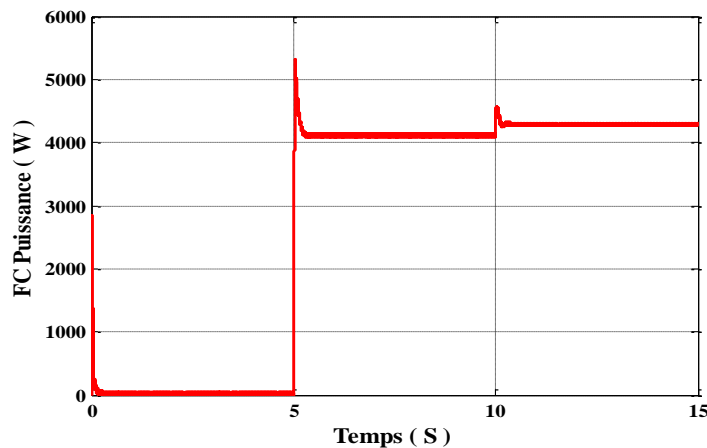


Figure II.41. La puissance de la pile à combustible.

D. Coté onduleur réseau

D'après la figure II.42, on voit que la puissance compensée converge vers la référence (puissance demandé).

Dans l'intervalle [0 5], la puissance éolienne et solaire est suffisante, mais dans l'autre intervalle [5 10], la puissance des deux sources principales est insuffisante.

La tension de bus est conservée à la tension de référence quelque soit la variation des sources puisque les batteries conservent cette valeur ($V = 800$ V), figure II .43.

Selon les résultats de simulation présentés ci-dessous, toutes les grandeurs à optimiser entre autre le courant de commande injecté au réseau convergent bien vers leurs références après un temps de réponse acceptable plus court relativement à la dynamique lente du profil de la source primaire (éclairage, vent, pile à combustible).

Le courant injecté au onduleur I_q est 9.6 A. Après un temps de réponse acceptable 5s, il augmente jusqu'à environ 48 A, puis il diminue à 31.75 A, en raison des changements des sources primaires (éclairage, vent et pile à combustible) et le courant injecté dans l'onduleur I_d est nul quel que soit la variation de puissance, figures II.44 et II.45.

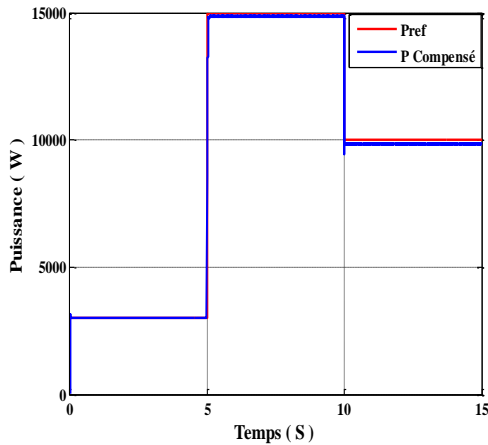


Figure II.42. Puissance demandé et compensé.

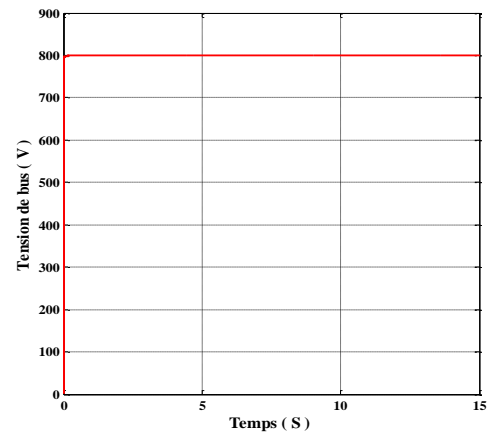


Figure II.43. Tension de bus.

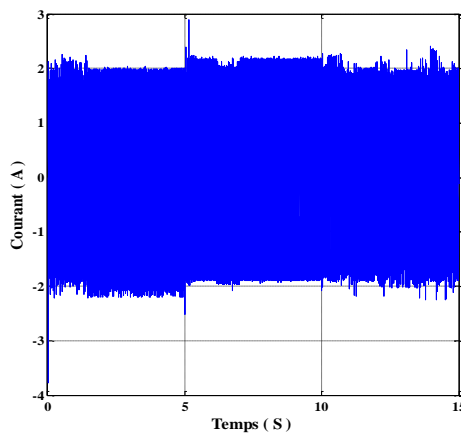


Figure II.44. Courant injectée au réseau I_d .

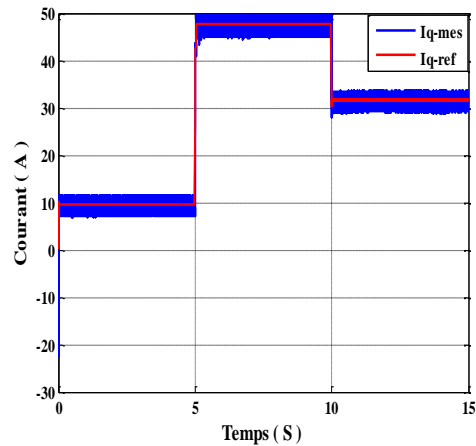


Figure II.45. Courant injectée au réseau I_q .

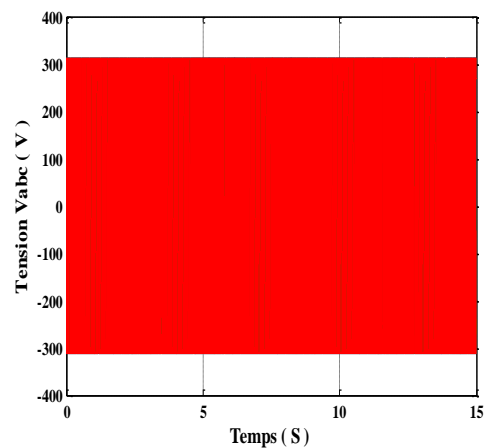
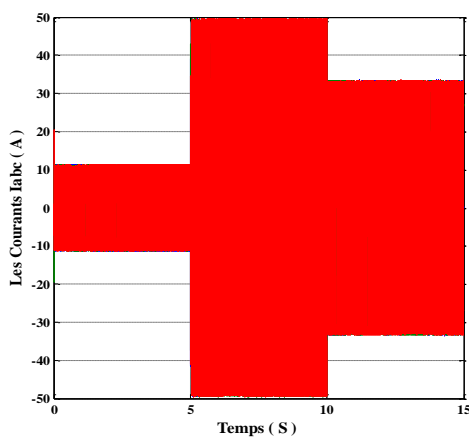


Figure II.46. Courant triphasé de réseau.

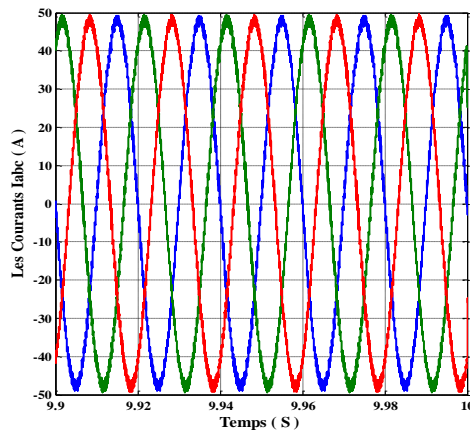


Figure II.47. Tension triphasé de réseau.

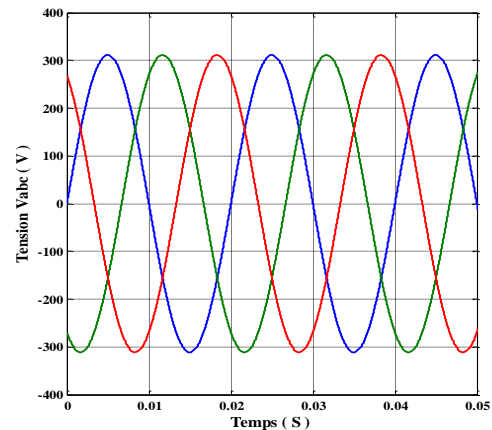


Figure II.48. Zoom du courant triphasé.

Figure II.49. Zoom de la tension triphasée.

La pile à combustible est contrôlée de manière à maintenir un niveau de puissance minimum de 10 kW. Les résultats de la simulation montrent que :

- Les convertisseurs DC-DC sont très efficaces dans le suivi de la puissance maximale de l'éolienne et de générateur photovoltaïque.
- Le dispositif de commande de la pile à combustible répond efficacement aux exigences de la puissance déficitaire (insuffisante).
- Les deux systèmes, l'éolienne et le photovoltaïque fonctionnent à leur capacité nominale, le système peut produire de l'énergie aussi élevée que l'énergie demandée par le réseau, et la pile à combustible n'a pas besoin d'être utilisée.
- Le système est capable de fournir une puissance minimale de 10 kW à la charge, même dans les mauvaises conditions climatiques, l'énergie éolienne et photovoltaïque est totalement absente.

II.8. Conclusion

Ce chapitre montre le comportement d'un système d'énergie hybride qui se compose d'une éolienne, d'un système photovoltaïque et d'une pile à combustible. Dans un premier temps, nous avons modélisé chaque source de production individuellement, nous avons présenté les caractéristiques de chaque source face aux changements climatiques (le rayonnement solaire, la température et la vitesse du vent), puis la modélisation de la partie d'électronique de puissance (redresseur, hacheurs et onduleur de tension) et pour finir, la modélisation du réseau complet choisi.

Notre système hybride est conçu pour générer une puissance continue, indépendamment des sorties de puissance intermittentes à partir des sources d'énergie éolienne et photovoltaïque. Les systèmes éoliens et photovoltaïques sont contrôlés pour fonctionner à leur point de puissance maximale sous différentes conditions.

III.1. Introduction

La logique floue (fuzzy logic) est un domaine de recherche actuel. En réalité elle existait déjà depuis longtemps [47]. Ce sont les paradoxes logiques et les principes de l'incertitude d'Heisenberg qui ont conduit au développement de la "logique à valeurs multiples" ou "logique floue" dans les années 1920 jusqu'au 1930. En 1937, le philosophe Max Black a appliqué la logique continue, qui se base sur l'échelle des valeurs réel $\{0, 1/2, 1\}$, pour classer les éléments et symboles.

Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lofti Zadeh dans son article "Fuzzy Set" [48]. À cette époque, la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux. En effet, les ordinateurs, avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 ou 0), ont commencé à se répandre sur une grande échelle. Par contre, la logique floue permettait de traiter des variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0.

Initialement, cette théorie a été appliquée dans des domaines non-techniques, comme le commerce, la jurisprudence ou la médecine, dans le but de compléter les systèmes experts et afin de leur donner l'aptitude de prise de décision.

Dès 1975, on trouve les premières applications au niveau des systèmes de réglage. À partir de 1985 environ, ce sont les japonais qui commencent à utiliser la logique floue dans des produits industriels pour résoudre des problèmes de réglage et de commande, tout récemment, en Europe et en Amérique du nord, une intense activité de recherche a débuté afin d'introduire le principe du réglage par logique floue [48], [49].

Le but de ce chapitre est de présenter brièvement un rappel sur les ensembles flous et un aperçu général sur la logique floue, ainsi que son application pour la commande de systèmes photovoltaïques. Nous introduisons quelques notions de la logique floue et ses propriétés essentielles, puis la technique de réglage appliquée aux systèmes.

III.2. Principes de la logique floue

Dans la théorie des ensembles conventionnels, une chose appartient ou n'appartient pas à un certain ensemble. Toutefois, dans la réalité, il est rare de rencontrer des choses dont le statut est précisément défini. Par exemple, où est exactement la différence entre une personne grande et une autre de grandeur moyenne? C'est à partir de ce genre de constatation que Zadeh a développé sa théorie. Il a défini les ensembles flous comme étant des termes linguistiques du genre: zéro, grand,

négatif, petit ... Ces termes existent aussi dans les ensembles conventionnels. Cependant, ce qui différencie ces deux théories sur les ensembles provient des limites des ensembles.

Dans les ensembles flous, il est permis qu'une chose appartienne partiellement à un certain ensemble; ceci s'appelle le degré d'appartenance. Dans les ensembles conventionnels, le degré d'appartenance est 0 ou 1 alors que dans la théorie des ensembles flous, le degré d'appartenance peut varier entre 0 et 1 (on parle alors de fonction d'appartenance μ). Un exemple simple d'ensembles flous est la classification des personnes selon leur âge en trois ensembles : jeune, moyen et vieux. La façon d'établir cette classification est présentée à la figure III.1 [50].

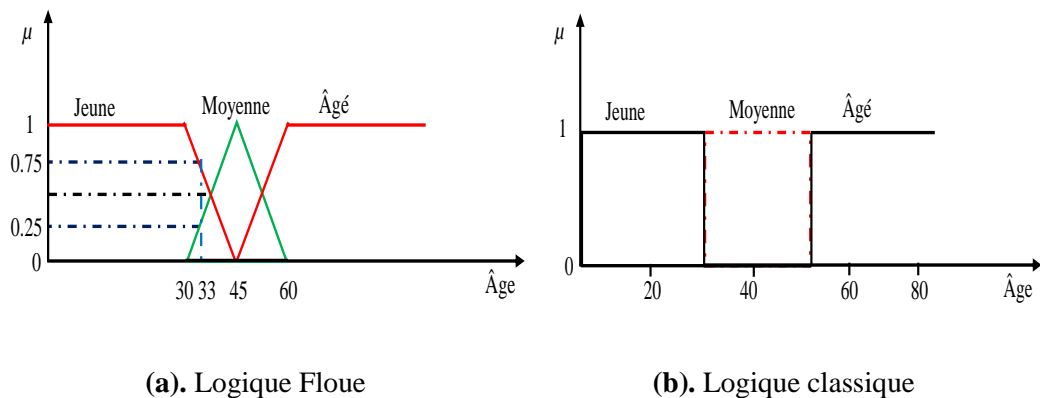


Figure III.1 : Classification des humains selon leur âge.

Cette figure montre que les limites entre ces trois groupes ne varient pas soudainement, mais progressivement. Par exemple, une personne de 33 ans appartient à l'ensemble "jeune" avec une valeur $\mu = 0.75$ de la fonction d'appartenance et à l'ensemble "moyens" avec une valeur $\mu = 0.25$. La figure III.1 donne donc le degré d'appartenance d'une personne, selon son âge, à un certain ensemble flou. Pour cette raison, ce type de figure s'appelle une fonction d'appartenance. On peut ainsi résumer la terminologie dans l'illustration suivante [50] :

- Variable linguistique : Âge
- Valeur d'une variable linguistique : Jeune, Moyen, Vieux,
- Ensembles flous : "jeune", "moyen", "Vieux",
- Plage de valeurs : (0, 30, 45, 60, ...)
- Fonction d'appartenance : $\mu_E(x) = a \quad (0 \leq a \leq 1)$
- Degré d'appartenance : a

III.2.1. Variables linguistiques

La description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des expressions floues comme [50],[51],[52]:

- quelque, beaucoup, souvent.
- chaud, froid, rapide, lent.
- grand, petit, etc....

Les expressions de ce genre forment les valeurs des variables linguistiques de la logique floue.

Une variable linguistique est représentée par un triplet (V, X, T_V) , dans lequel V est une variable (la vitesse, la température...) définie sur un ensemble de référence X ; sa valeur peut être n'importe quel élément de X . Nous désignons par $T_V(A_1, A_2, A_3, \dots)$ un ensemble, fini ou infini, de sous ensembles flous de X , qui sont utilisés pour caractériser V . Afin de permettre un traitement numérique, il est indispensable de les soumettre à une définition à l'aide de fonctions d'appartenance [51],[52],[53]. Par exemple, si la vitesse est interprétée comme une variable linguistique, alors son ensemble de termes est $T_{(VITESSE)} = \{\text{lente, moyenne, rapide...}\}$ où chaque terme est caractérisé par un ensemble flou.

Ces termes peuvent être définis comme des ensembles flous dont les fonctions d'appartenance sont montrées sur la figure III.2 :

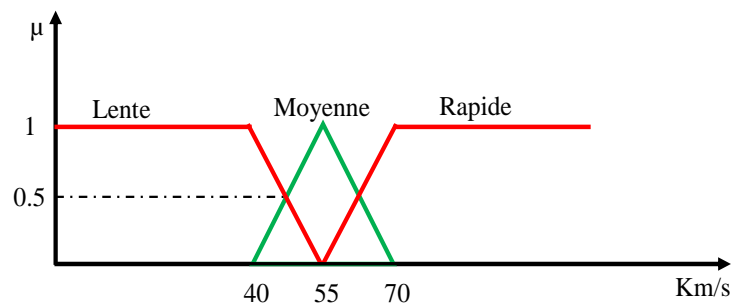


Figure III.2 . Représentation graphique des termes linguistiques.

III.2.2. Opérateurs sur les ensembles flous

Puisque les fonctions caractéristiques des ensembles flous sont graduelles, l'extension de certaines variables floues définies sur les ensembles classiques aux cas des ensembles flous pose certaines difficultés. Donc, il n'est pas possible d'appliquer directement la logique proportionnelle qui manipule des ensembles à fonctions caractéristiques binaires (0 ou 1). Pour pallier à ce

problème, nous introduisons les définitions d'outils nécessaires au traitement des ensembles flous [51], [52], [53], [54],[55].

Soient A et B deux ensembles flous dans X ayant respectivement μ_A et μ_B comme fonction d'appartenance. L'union, l'intersection, et la complémentation des ensembles flous sont déduites à l'aide de leur fonction d'appartenance [51],[52],[53],[54],[55].

Définition 1 : Union (Disjonction)

L'union de deux ensembles flous A et B de X est l'ensemble flou constitué des éléments de X affecté du plus grand de leurs deux degrés d'appartenance. Elle est définie comme l'ensemble flou $C = A \cup B$, tel que :

$$\forall x \in X \quad \mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{III.5}$$

Définition 2 : Intersection (Conjonction)

L'intersection de deux ensembles flous A et B de X est l'ensemble flou constitué des éléments de X affecté du plus grand de leurs deux degrés d'appartenance. Elle est définie comme l'ensemble D , tel que :

$$\forall x \in X \quad \mu_D(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \tag{III.6}$$

Définition 3 : Complémentation

La fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}}$ du complément d'un ensemble flou A est définie, pour tout $x \in X$, par :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \tag{III.7}$$

Définition 4 : Produit Cartésien

Soient $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ des ensembles flous dans $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ respectivement. Le produit cartésien de $A_1.A_2.A_3. \dots.A_n$ est un ensemble flou dans l'espace produit de $X_1. X_2. X_3. \dots.X_n$, ayant pour fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1.A_2.A_3. \dots.A_n} = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \tag{III.8}$$

Définition 5 : Relation Floue

Soient u_1, u_2, \dots, u_n des univers de discours. Une relation floue est un ensemble flou dans $u_1.u_2. \dots.u_n$, exprimé comme suit :

$$R_{U_1.U_2...U_n} = \{((x_1, x_2, \dots, x_n), \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n) / (x_1, x_2, \dots, x_n) \in U_1.U_2...U_n)\} \quad (III.9)$$

Définition 6 : Composition des Règles Floues

Si R et S sont deux relations floues dans $U.V$ et $V.W$, la composition de ces deux relations est une relation floue dénotée par $(R \circ S)$ et elle est définie par :

$$R \circ S = \{((U, W), \sup_{v \in V} \min(\mu_R(U, V), \mu_S(V, W))), u \in U, v \in V, w \in W\} \quad (III.10)$$

III.2.3. Fonctions d'appartenance

Une définition des variables linguistiques à l'aide des fonctions d'appartenance est nécessaire dans le but de traiter des déductions floues par ordinateur. Dans ce contexte, il est attribué à chaque valeur de la variable linguistique une fonction d'appartenance μ , dont la valeur varie entre 0 et 1. Le plus souvent, nous utilisons pour les fonctions d'appartenance les fonctions suivantes Tableau III.1, [51],[52],[53],[54],[55] :

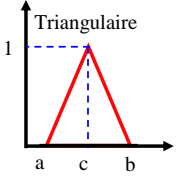
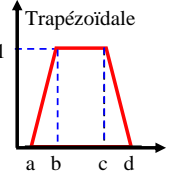
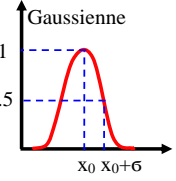
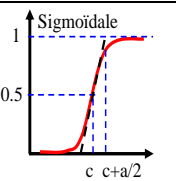
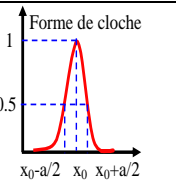
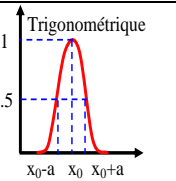
 <p style="text-align: center;">Triangulaire</p> $\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right)$ <p style="text-align: center;">Fonction Triangulaire</p>	 <p style="text-align: center;">Trapézoïdale</p> $\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right)$ <p style="text-align: center;">Fonction Trapézoïdale</p>	 <p style="text-align: center;">Gaussienne</p> $\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2.\sigma^2}\right)$ <p style="text-align: center;">Fonction Gaussienne</p>
 <p style="text-align: center;">Sigmoïdale</p> $\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(a.(x-c))}$ <p style="text-align: center;">Fonction Sigmoïdale</p>	 <p style="text-align: center;">Forme de cloche</p> $\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2}$ <p style="text-align: center;">Fonction en Forme de Cloche</p>	 <p style="text-align: center;">Trigonométrique</p> $\mu(x) = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \cos\left(\frac{\pi.(x-x_0)}{2.a}\right)\right)$ <p style="text-align: center;">$x_0 - 2.a \leq x \leq x_0 + 2.a$</p> <p style="text-align: center;">Fonction Trigonométrique</p>

Tableau III.1 .Formes usuelles des fonctions d'appartenances.

III.2.4. Propositions floues

- Propositions floues élémentaires

Une proposition floue élémentaire est définie à partir d'une variable linguistique (V, X, T_V) par la qualification « V est A », pour une caractérisation floue A , appartenant à T_V [51],[52],[53]:

- Propositions floues générales :

Une proposition floue générale est obtenue par la composition des propositions floues élémentaires « V est A », « W est B », pour des variables linguistiques V, W [53].

Plus généralement, nous pouvons construire des propositions floues par conjonction, disjonction ou implication, par exemple, des propositions de la forme : « si V est A et W est B alors U est C » (si la taille est moyenne et le prix est peu cher, alors l'achat est conseillé).

III.3. Raisonnement en logique floue

Les ensembles flous sont des éléments importants de la représentation des connaissances imparfaitement définies. Pour raisonner sur de telles connaissances, la logique classique ne suffit pas et nous utilisons la logique floue, lorsque les connaissances sont imprécises, vagues, et éventuellement incertaines.

III.3.1. Implication floue

Considérons une règle floue de la forme « si V est A alors W est B », construite à partir de deux variables linguistiques (V, X, T_V) et (W, Y, T_W) . L'implication floue est un opérateur qui permet d'évaluer le degré de vérité entre les propositions floues élémentaires « V est A » et « W est B » à partir des valeurs de la prémisse d'une part, et celles de la conclusion d'autre part [51],[52],[53]:

$$\mu_R(x, y) = \text{imp}(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.17})$$

Les opérateurs les plus utilisés en commande floue sont les implications de *Mamdani* et de *Larsen* [51],[52],[53],[54],[55].

- Implication de Mamdani

$$\mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.18})$$

- Implication de Larsen

$$\mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x) \quad (\text{III.19})$$

III.3.2. Modus ponens généralisé

En logique classique, le *Modus Ponens* permet, à partir de la règle « si X est A alors Y est B » et du fait « X est A » de conclure le fait « Y est B ».

Zadeh a étendu ce principe au cas de la logique floue, principe que nous appelons alors *Modus Ponens* généralisé. Ce principe se résume comme suit [51],[52],[53],[54],[55]:

Règle floue : si X est A alors Y est B

Fait observé : X est A

Conclusion : Y est B

III.3.3. Modus tollens généralisé

Le principe du *Modus Tollens* se résume comme suit, [51],[52],[53],[54],[55]:

Règle floue : si X est A alors Y est B

Fait observé : Y est B

Conclusion : X est A

III.4. Réglage et commande de la logique floue

La commande par la logique floue a le même but qu'une commande réalisée en automatique classique. Elle en diffère cependant sur les points suivants [51],[52],[53],[54],[55]:

- La connaissance mathématique du fonctionnement du processus n'est pas nécessaire.
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire).
- Piloter un processus en utilisant les connaissances et l'expérience d'un opérateur humain qualifié « expert » ; les connaissances de l'expert sont schématisées à l'aide d'un ensemble de règles de conduite basées sur un vocabulaire symbolique.
- Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques.

III.5. Configuration interne d'un régulateur par logique floue

La figure III.3 montre la configuration interne d'un régulateur par la logique floue [51],[55].

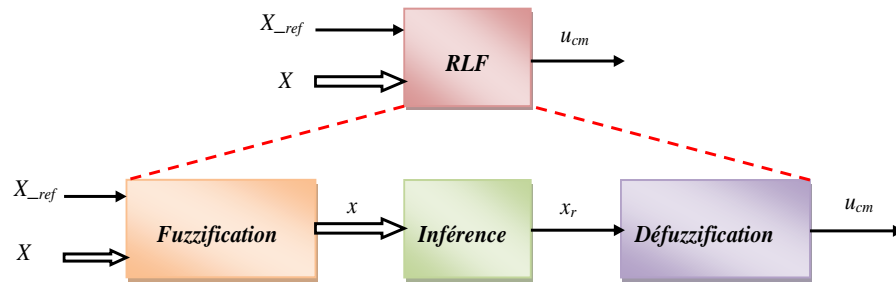


Figure III.3 .Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.

La figure III.3 montre le schéma fonctionnel interne du système de la logique floue, ce dernier se compose des blocs suivants :

- Bloc *Fuzzification*, laquelle permet de transformer les grandeurs mesurées d'entrée en des grandeurs floues ;
- Bloc *Inférence* une base des règles, qui contient la définition des termes utilisés dans la commande et les règles caractérisant la cible de la commande et décrivant la conduite de l'expert ;
- Bloc *Défuzzification* à la sortie, laquelle détermine une action précise à partir des descriptions floues des variables de sortie.

III.5.1. Base des règles

Ces règles permettent de déterminer le signal de sortie du contrôleur en fonction des signaux d'entrée ; elles sont exprimées sous la forme « SI - ALORS », qui peut être, à titre d'exemple, la suivante :

R_l : SI x_1 est A_{1l} et ... et x_n est A_{ln} ALORS Y est B_l

Ou sous la forme de *Sugeno* :

R_l : SI x_1 est A_{1l} et ... et x_n est A_{ln} ALORS $Y = f_l(x)$

avec : $f_l(x)$, un polynôme.

III.5.2. Logique de prise de décision (Inférence Floue)

La logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou, elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence en logique floue [51],[52],[53],[54],[55].

Dans les règles floues interviennent les opérateurs « ET » et « OU ». L'opérateur « ET » s'applique aux variables à l'intérieur d'une règle, tandis que l'opérateur « OU » lie les différentes règles. Il existe plusieurs possibilités pour interpréter ces deux opérateurs.

Pour le réglage par logique floue, on utilise en général une des méthodes suivantes :

- Méthode d'inférence max-min (Méthode de Mamdani)

La méthode d'inférence max-min réalise, au niveau de la condition, l'opérateur « ET » par la formulation du minimum. La conclusion dans chaque règle, introduite par « ALORS », lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie, réalisé par la formation du minimum. Enfin l'opérateur « OU » qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [51],[52],[53],[54],[55].

- Méthode d'inférence max-produit (Méthode de Larsen)

La méthode d'inférence max-produit réalise, au niveau de la condition, l'opérateur « ET » par la formulation du produit. La conclusion dans chaque règle, introduite par « ALORS », est réalisée par la formation du produit. L'opérateur « OU » qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [51],[52],[53],[54],[55].

- Méthode de Sugeno

L'opérateur « ET » est réalisé par la formulation du minimum, la conclusion de chaque règle floue a une forme polynomiale. La sortie finale est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle [51],[52],[53],[54],[55].

III.5.3. Interface de fuzzification

L'interface de *Fuzzification* inclut les fonctions suivantes [51],[52],[53],[54],[55]:

- mesure des variables d'entrée.
- représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants.
- transformation des variables d'entrée en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance.

III.5.4. Interface de defuzzification

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de *Défuzzification* jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeurs physiques nécessaires pour un tel état de processus. Une stratégie de *Défuzzification* est alors nécessaire.

Plusieurs stratégies de *Défuzzification* existent, les plus utilisées sont [51],[52],[53],[54],[55].

- méthode du maximum
- méthode de moyenne des maxima
- méthode de centre de gravité
- méthode des hauteurs pondérées

- Méthode du maximum

Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence. Cependant, cette méthode présente un certain inconvénient lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.

- Méthode de la moyenne des maxima

Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale.

- Méthode du centre de gravité

Cette méthode est la plus utilisée dans les contrôles flous, elle génère le centre de gravité \bar{y} de la fonction d'appartenance issue de l'inférence.

L'abscisse du centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation suivante [51],[55].

$$\bar{y} = \frac{\int y \cdot \mu_{res}(y) \cdot dy}{\int \mu_{res}(y) \cdot dy} \quad (\text{III.20})$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface.

La détermination du centre de gravité nécessite une envergure de calcul assez importante, surtout pour l'exécution en temps réel. De ce fait, cette méthode est la plus coûteuse en temps de calcul.

- Méthode des hauteurs pondérées

Au fond, cette méthode n'est rien d'autre qu'un cas particulier de la méthode du centre de gravité. Dans ce cas, nous choisissons comme fonctions d'appartenance pour la variable de sortie, des barres (rectangles de largeurs étroites), et nous aboutissons à une simplification notable de la détermination de l'abscisse du centre de gravité.

L'abscisse du centre de gravité se calcule alors à l'aide de la relation suivante [51],[52],[53],[54],[55].

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^M \mu_i \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^M \mu_i} \quad (\text{III.21})$$

Où M est le nombre de règles, μ_i est le degré de confiance ou d'activation de la règle R_i et \bar{y}_i est l'abscisse du centre de gravité de l'ensemble flou de la variable de sortie associée à la règle R_i .

III.6. Avantages et inconvénients de la logique floue [50],[51]

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages.

III.6.1. Les avantages de la commande par logique floue

- La non-nécessité d'une modélisation (cependant, il peut être utile de disposer d'un modèle convenable);
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus;
- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-Linéaire et difficile à modéliser);
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non-linéaire);
- Deux solutions sont possibles: solution par logiciels (par microprocesseur, DSP et PC) ou solution matérielle (par fuzzy processeurs).

III.6.2. Les inconvénients de la commande par logique floue

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la *Fuzzification*, des *inférences* et de la *Défuzzification*);
- L'approche artisanale et non systématique (implémentation des connaissances des opérateurs souvent difficile);
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable);
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non-linéaire; la cohérence des inférences non garantie à priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

III.7. Application de la logique floue

Dans cette section, nous nous intéressons à l'application de la commande par logique floue au système hybride. Deux types de régulateurs sont synthétisés pour le réglage de la vitesse de l'éolienne et les courants du réseau, d'une première part, les régulations des paramètres précédant (la vitesse de l'éolienne et les courants du réseau) ainsi que la maximisation de la puissance des panneaux photovoltaïques par la logique floue, ensuite la régulation de la vitesse de l'éolienne et les courants du réseau par un régulateur hybride (floue-PI).

III.7.1. Optimisation du système éolien

III.7.1.1. Synthèse du régulateur floue

La majorité des contrôleurs développés utilisent le schéma simple proposé par MAMDANI pour le système mono-entrée/mono-sortie, figure III.4. [56],[57].

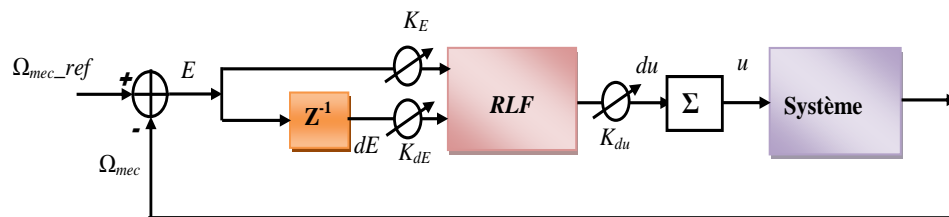


Figure III.4. Schéma bloc de synthèses d'un contrôleur flou.

III.7.1.1.1. Loi de commande

La loi de commande est fonction de l'erreur et de sa variation ($u=f(E, dE)$). Par conséquent, l'activation de l'ensemble des règles d'inférence associées donne la variation de la commande nécessaire, permettant l'ajustement de la commande u .

La forme de cette loi de commande est donnée par :

$$u_{k+1} = u_k + K_{du} \cdot du_{k+1} \tag{II.21}$$

Où :

K_{du} : le gain associé à la commande u_{k+1} .

du_{k+1} : la variation de la commande.

L'erreur E et la variation de l'erreur dE sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} X_E = K_E \cdot E \\ X_{dE} = K_{dE} \cdot dE \end{cases} \tag{II.22}$$

Où : K_E et K_{dE} sont les facteurs d'échelles (gain de normalisation). Nous faisons varier ces facteurs jusqu'à ce que nous ayons un phénomène transitoire de réglage convenable. En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande.

Dans ce régulateur, l'intervalle d'intérêt de chaque variable d'entrée, et de la variable de sortie est divisé en trois classes, comme il est montré à la figure III.5.

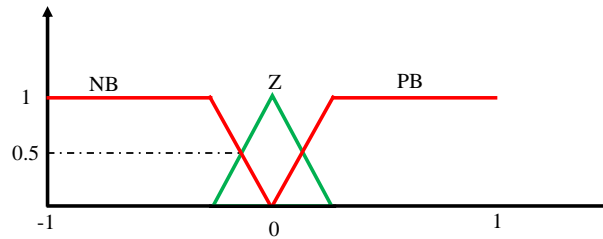


Figure III.5. Fonction d'appartenance d'une variable linguistique.

Les règles floues sont résumées et présentées sous forme d'une matrice MACVICAR – WHELAN suivante :

E dE	NB	Z	PB
NB	NB	NB	Z
Z	NB	Z	PB
PB	Z	PB	PB

Tableau III.2. Table de règles à trois classes.

III.7.1.2. Synthèse du régulateur floue -PI

Le régulateur par logique floue (RLF) ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles. Un régulateur PI va être ajouté au régulateur floue en série afin d'améliorer les performances de la commande pour avoir une régulation hybride.

Dans cette section, nous allons présenter les bases générales de la commande hybride (floue-PI). Nous allons détailler les démarches de la conception d'un RLF-PI pour régler la vitesse.

III.7.1.2.1. Conception d'un RLF-PI

Afin de concevoir un dispositif de commande à logique floue (RLF) pour la boucle de réglage des courants du réseau et la vitesse de l'éolienne. La structure générale du contrôle de la logique floue est représentée dans la figure III.6. Le RLF est utilisé pour ajuster les paramètres conformément à l'erreur de signal d'entrée E . Le RLF est composé d'un bloc de fuzzification, , inférence floue et défuzzification.

La logique floue transforme des variables d'entrée en variables linguistiques. La fonction d'appartenance est utilisée pour associer une catégorie à chacun des termes linguistiques. Pour la

fuzzification, les trois variables de la RLF, l'erreur E et les sorties P_{er} et I_{er} ont cinq fonctions d'appartenance triangulaires.

Les variables de sous-ensembles flous pour l'entrée sont Big Négative (BN), Small Négative (NS), Zéro (Z), Small Positive (PS), et Big Positive (PB). La figure III.7 représente la fonction d'appartenance pour l'entrée E . L'intervalle de L'entrée E de la fonction d'appartenance varie entre -1 et 1 [58], [59], [60].

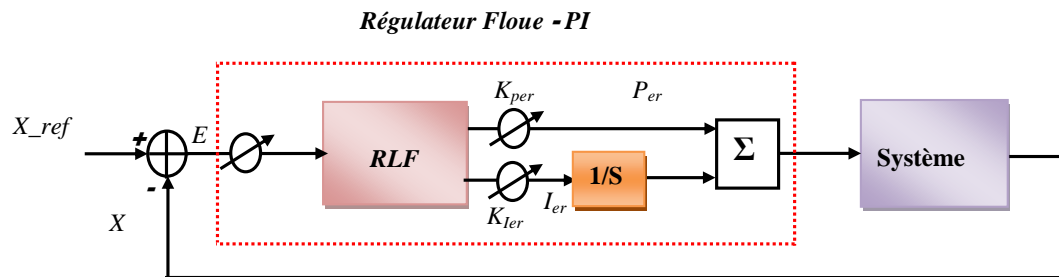


Figure III.6 .Schéma de contrôleur par la logique floue.

Les figures III.7 montrent les fonctions d'appartenance de sortie pour E , P_{er} et I_{er} , respectivement.

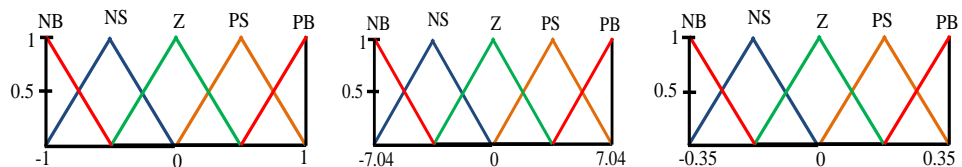


Figure III.7.Fonction d'appartenance du variable linguistique(E , P_{er} , I_{er}).

Les règles sont définies sur la base de la connaissance et le fonctionnement du système. Les valeurs de E , P_{er} et I_{er} du contrôleur flou-PI pour la régulation de la vitesse sont calculés avec les changements d'entrée du RLF. L'inférence floue du système peut être exprimée sous la forme:

- Si (E est NB), puis (P_{er} est NB) et (I_{er} est NB)*
- Si (E est NS), puis (P_{er} est NS) et (I_{er} est NS)*
- Si (E est ZE), puis (P_{er} est ZE) et (I_{er} est ZE)*
- Si (E est PS), puis (P_{er} est PS) et (I_{er} est PS)*
- Si (E est PB), puis (P_{er} est PB) et (I_{er} est PB)*

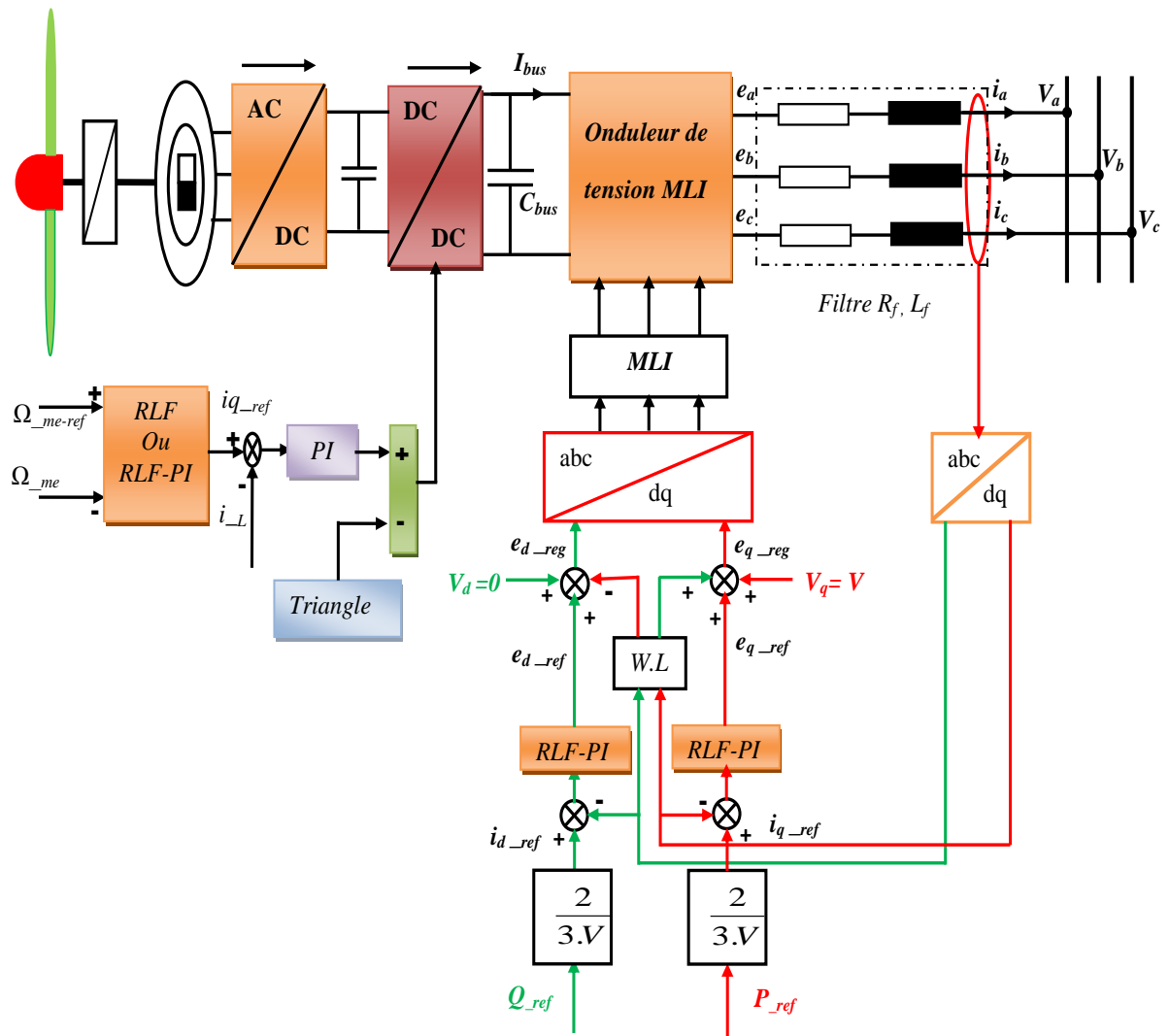


Figure III.8 . Schéma global d'un système éolienne avec un régulateur floue et floue PI .

III.7.2. Optimisation de puissance à côté du système photovoltaïque

III.7.2.1 Optimisation par la technique de logique floue

Le schéma de la figure III.9, représente un système qui constitue un générateur photovoltaïque et un convertisseur DC-DC. L'optimisation de la puissance du GPV est faite à l'aide d'un circuit numérique de commande (PIC, DSP,...) , utilisant les données du générateur photovoltaïque et la technique de la logique floue .

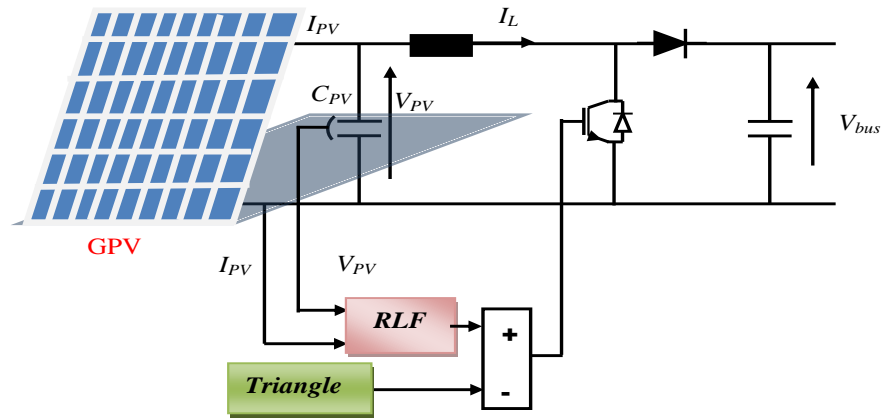


Figure III.9 .Structure globale de l'optimisation par la logique floue.

Les étapes de calcul des différentes commandes sont les suivantes [61],[62],[63],[64],[65],[66],[67]:

1. Echantillonnage de la sortie
2. Calcul de l'erreur notée $e(k)$:

$$E(k) = \frac{P_{PV}(k+1) - P_{PV}(k)}{V_{PV}(k+1) - V_{PV}(k)} \tag{III.23}$$

3. Calcul de la variation de cette erreur notée $dE(k)$:

$$dE(k) = E(k+1) - E(k) \tag{III.24}$$

4. Calcul des valeurs normalisées de $E(k)$ et $dE(k)$ par :

$$\begin{cases} X_E = K_E \cdot E(k) \\ X_{dE} = K_{dE} \cdot dE(k) \end{cases} \tag{III.25}$$

5. Calcul de la variation de la commande dD_i en suivant les étapes suivantes :

- FUZZIFICATION :

Calculer les degrés d'appartenance de $E(k)$ et $dE(k)$ pour les 5 classes à l'aide de leurs fonctions d'appartenance.

- INFÉRENCE FLOUE :

Calculer, en utilisant la table des règles de la commande (Tableau.III.3), les fonctions d'appartenance résultantes de la variable linguistique dD_i à chacune de ses classes.

- DÉFUZZIFICATION :

Une réduction notable de l'envergure de calcul s'obtient par l'emploi de la méthode de centre de gravité, est donnée par la relation suivante:

$$dD = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \tag{III.26}$$

Avec $\mu(D_j)$, le degré d'activation de la $j^{ième}$ règle et D_j l'abscisse du centre de gravité de la $j^{ième}$ classe.

6. Calcul de la valeur physique de la commande par :

$$D_{K+1} = D_K + K_{dD} \cdot dD_{K+1} \tag{III.27}$$

7. Laisser la sortie évoluer jusqu'à la prochaine période d'échantillonnage et puis ré-exécuter toutes les règles.

III .7.2.2. Synthèse du régulateur

Le schéma de principe de la logique floue en fonction MPPT proposé est représenté sur la Figure III.10.

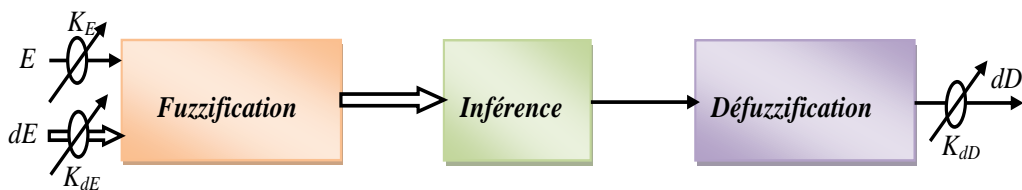


Figure III.10 .Schéma bloc du contrôleur par la logique floue.

Le contrôle floue comporte :

- Un bloc de calcul de variation de l'erreur au cours du temps ($dE(k)$)
- Des facteurs d'échelle associés à l'erreur, à la variation de l'erreur et à la variation de la commande (dD) ;
- Des règles du contrôleur flou (Inférence) ;
- Un bloc de DEFUZZIFICATION utilisé pour convertir la variation de la commande en valeur numérique ;
- Un sommateur.

Le succès des algorithmes flous dans les systèmes industriels complexes est dû au choix des méthodes relativement pratiques, permettant avec une simplicité notable, la mise au point de tels algorithmes.

III.7.2.3 Loi de commande

La loi de commande est fonction de l’erreur et de sa variation ($D=f(E, dE)$). Par conséquent, l’activation de l’ensemble des règles d’inférence associées donne la variation de la commande dD nécessaire, permettant ainsi l’ajustement de la commande D .

La forme de cette loi de commande est donnée par [61],[62],[63],[64],[65],[66],[67]:

$$D_{K+1} = D_K + K_{dD} \cdot dD_{K+1} \tag{III.21}$$

Où K_{dD} est le gain associé à la commande D_{k+1} et est la variation de la commande dD_{k+1} .

L’erreur E et la variation de l’erreur dE sont normalisées comme suit :

$$\begin{cases} X_E = K_E \cdot E \\ X_{dE} = K_{dE} \cdot dE \end{cases} \tag{III.22}$$

Où K_E et K_{dE} sont les facteurs d’échelles (facteurs de normalisation).

Nous faisons varier ces facteurs jusqu’à ce que nous ayons un phénomène transitoire de réglage convenable. En effet, ce sont ces derniers qui fixeront les performances de la commande.

Les fonctions d’appartenance, de chaque variable d’entrée et de sortie sont divisées en cinq classes, figure III.11.

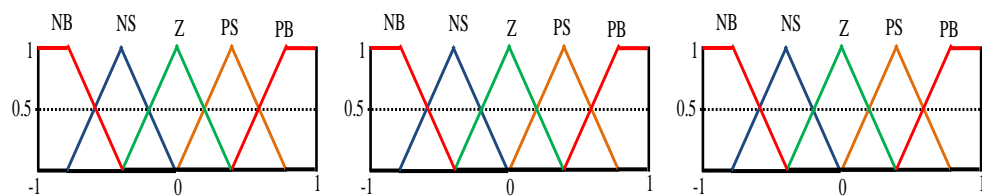


Figure III.11. Fonction d'appartenance de E , dE et dD

Les classes d’appartenance sont :

NB pour Big négatif, **NS** pour Small négatif, **Z** pour environ Zéro, **PS** Small positif, et **PB** pour Big positif.

Les règles floues permettent de déterminer le signal de sortie du régulateur en fonction des signaux d’entrée. Elles relient le signal de sortie aux signaux d’entrée par des conditions

linguistiques prenant en compte l'expérience ou le savoir-faire acquis par un opérateur humain, en traduisant simplement des remarques de bon sens.

Les règles floues sont résumées et présentées sous forme d'une matrice MACVICAR – WHELAN suivante :

E	CE	NB	NS	Z	PS	PB
NB		Z	Z	PB	PB	PB
NS		Z	Z	PB	PB	PB
Z		PS	Z	Z	Z	NS
PS		NS	NS	NS	Z	Z
PB		NB	NB	NB	Z	Z

Tableau III.3. Table de règles d'inférence à cinq classes.

III.8 Résultats de simulations

Pour prouver la conception du système hybride proposé, le système complet est simulé en utilisant le MATLAB Simulink. Les trois sources d'énergie sont modélisées afin de prédire leurs caractéristiques réelles. Les figures ci-dessous illustrent les différents résultats du système hybride afin d'étudier les performances du système de contrôle, en appliquant trois contrôles différents (PI, floue et le flou-PI).

A. Générateur éolien

Pour évaluer la performance de l'état d'équilibre du système proposé, les réponses données pour la vitesse du vent, variation de la vitesse mécanique, variation du couple et la variation de la puissance de l'éolienne de la figure III.12, III.13, III.14 et III.15 sont évaluées pour les cas de logique floue et le flou-PI contrôlée. Les figures montrent que le contrôle par le flou-PI donne un temps de réponse inférieur que le contrôle flou et le contrôle classique PI mentionné dans le chapitre II, ainsi que les pics.

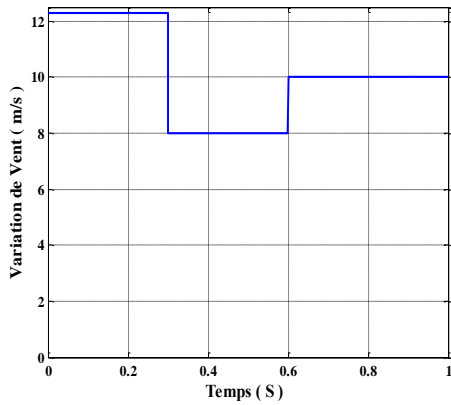


Figure III.12 . Variation du vent.

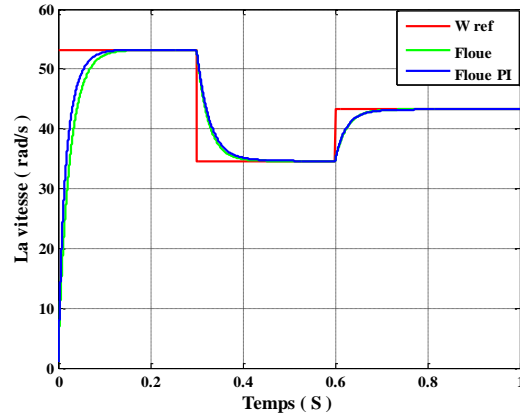


Figure III.13 . Variation de la vitesse mécanique GE.

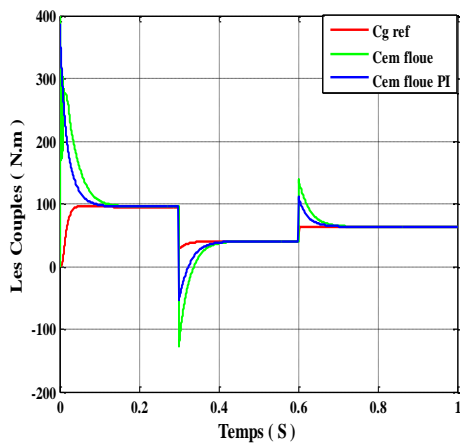


Figure III.14. Variation du couple GE.

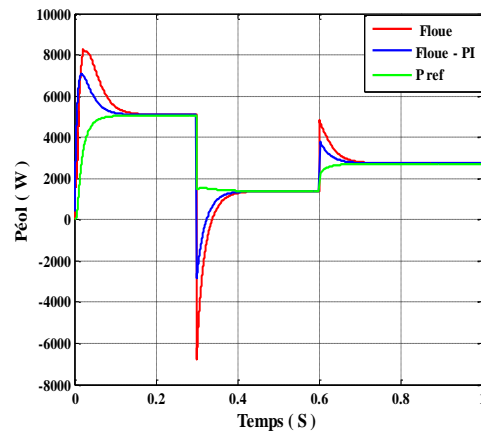


Figure III.15. Variation de la puissance GE.

B. Générateur photovoltaïque.

Les fonctions d'appartenances à cinq classes (figure III.11) avec la base de règles montrées à la table (III.3) contrôlent l'erreur (E) et la variation de l'erreur (CE) après adaptation tel que le montre la figure (III.17) où on obtient le point optimal pour l'intensité de courant qui est de 35A avec un régime transitoire court de 0.08s, pour un éclairement de 1000 W/m². Après changement du niveau d'éclairement, qui chute à 300 W/m², on montre aussi que le courant du GPV est ajusté sur sa nouvelle valeur optimale, qui est 10A pour ce niveau d'éclairement.

Après augmentation à nouveau du niveau d'éclairement à 500W/m², et après un régime transitoire d'environ 0.05 s, il y a réajustement au point optimal qui est de 18A.

La variation de la tension du générateur PV est montrée dans la figure (III.18), au changement de la tension, le contrôleur à logique floue s'adapte à la nouvelle valeur. Les valeurs obtenues à l'état d'équilibre sont proches des valeurs optimales de tension qui sont de 155 V pour 1000 W/m², 140 V

pour 300W/m^2 et 145 V pour 500W/m^2 . La variation de la puissance instantanée du générateur PV est montrée dans la figure (III.19). Ses valeurs optimales sont près de 5.3 kW pour un éclairage de 1000 W/m^2 , 1.5 kW pour 300 W/m^2 et 2.5 kW pour 500 W/m^2 .

Ce qui montre bien que l'optimisation permet d'améliorer sensiblement le système en réduisant le régime transitoire.

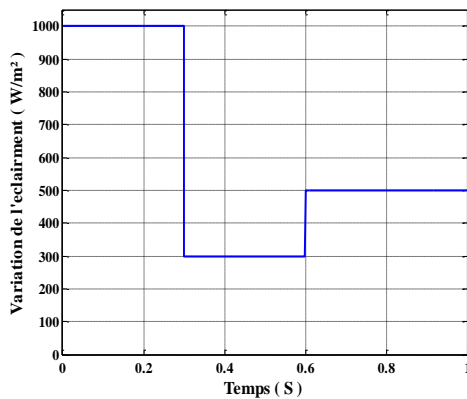


Figure III.16. Variation de l'éclairage.

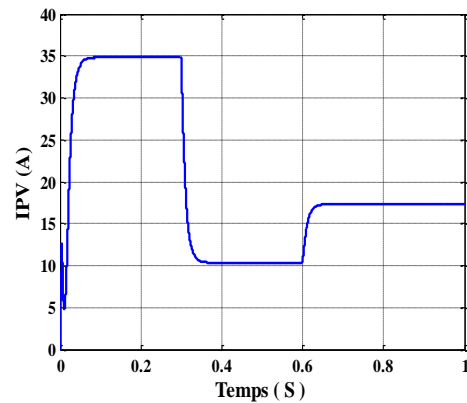


Figure III.17. Variation du courant de GPV.

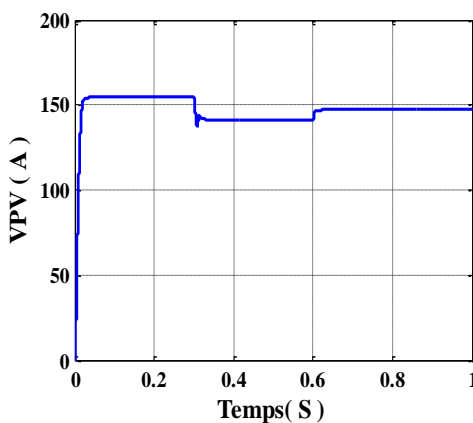


Figure III.18. Variation de la tension de GPV.

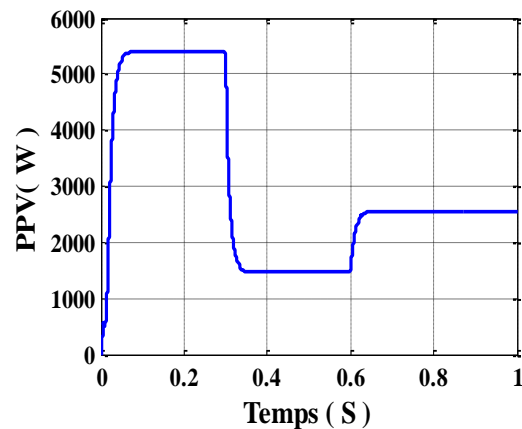


Figure III.19. Variation de la puissance de GPV.

C. La pile à combustible.

Selon les résultats de simulation présentés ci-dessous, la variation de la puissance de la pile à combustible est obtenue à partir de la puissance demandée au réseau, en cas où la somme des puissances des deux générateurs éolien et solaire est insuffisante. Les trois figures III.20, 21 et 22 montrent bien l'état de variation et le fonctionnement de la pile à combustible ainsi que à quel point les générateurs éolien et solaire sont suffisants et insuffisants. Sur La figure III.20, le courant converge vers la référence de la pile à combustible après un temps de réponse de 0.15s, La

puissance de la pile à combustible est 4.2 kW (la puissance de générateur éolien et solaire est insuffisante). Après 0.3s, elle augmente jusqu'aux environs 5 kW, puis elle diminue encore à 4.2 kW (la puissance du générateur éolien et solaire est insuffisante). Les figures montrent aussi que les pics sont inférieurs pour le contrôle floue-PI que pour le contrôle floue.

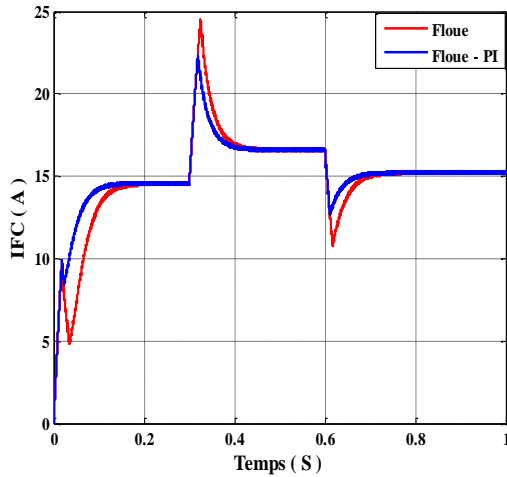


Figure III.20. Courant de contrôle de la PC.

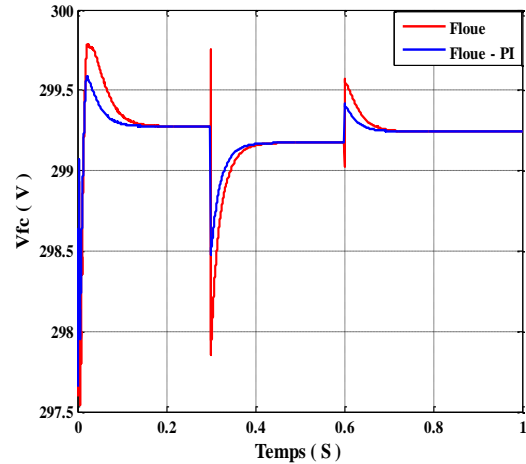


Figure III.21. Tension de la PC.

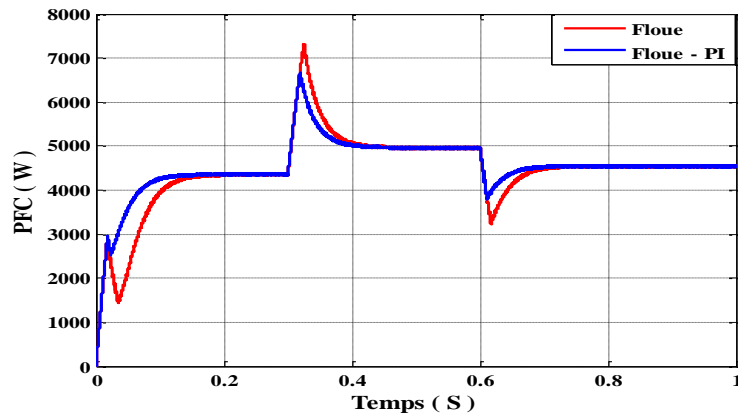


Figure III.22. La puissance de contrôle de la pile à combustible.

D. Coté onduleur réseau

D'après la figures III.24 , on voit que la puissance compensée converge vers leur reference (puissance demandée). Dans l'intervalle [0 0.3s], la puissance éolienne et solaire est insuffisante. Pour l'intervalle [0.3 0.6s], la puissance des deux sources principales est insuffisante.

La tension de bus continu est conservée à la tension de référence quelque soit la variation des sources puisque les batteries conservent cette valeur (800 V), figure III.23.

Selon les résultats de simulation présentés ci-dessous, toutes les grandeurs à optimiser, et le courant de commande injecté au réseau convergent bien vers leurs références après un temps de réponse acceptable plus court relativement à la dynamique lente du profil de la source primaire (éclairage, vent, pile à combustible) pour le contrôle floue par rapport au contrôle floue-PI.

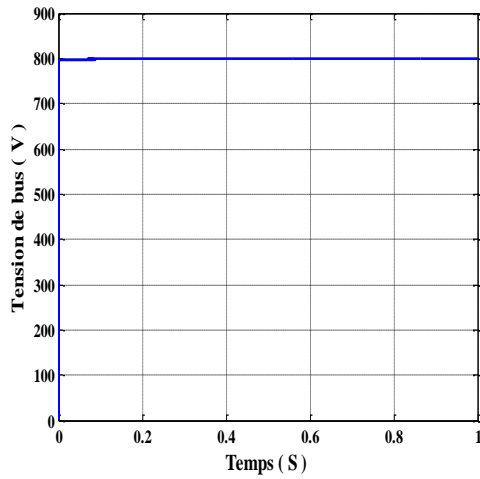


Figure III.23. Tension de bus

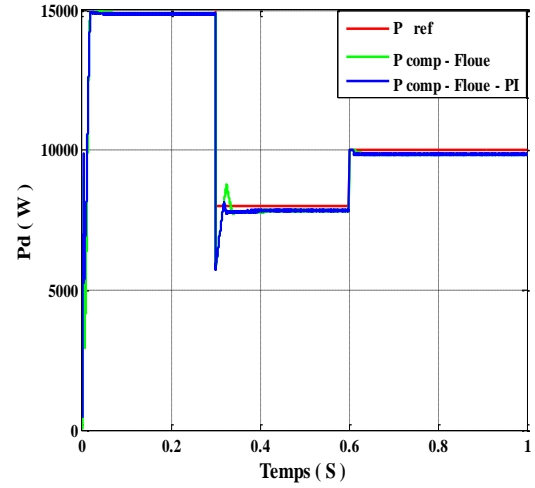


Figure III.24. Puissance demandée et compensée

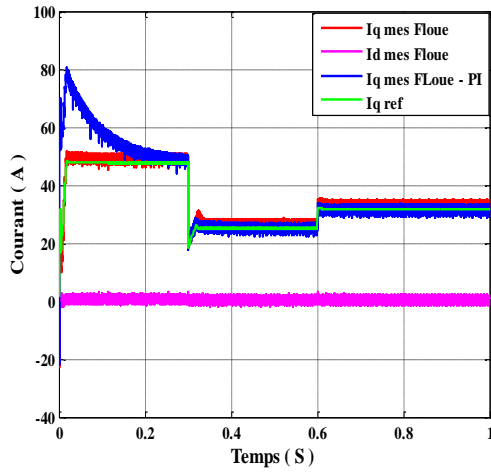


Figure III.25. Courant injecté au réseau.

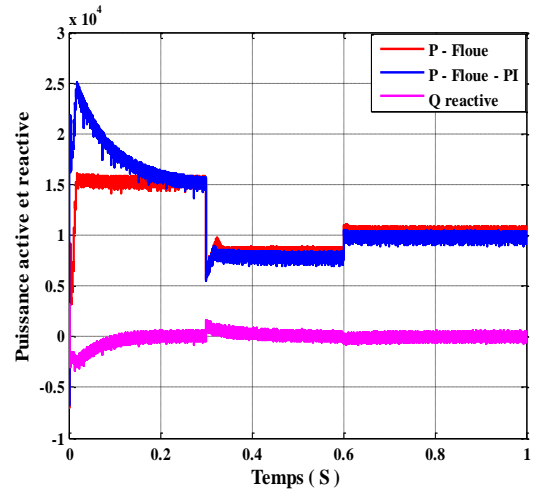


Figure III.26. Puissance injectée au réseau.

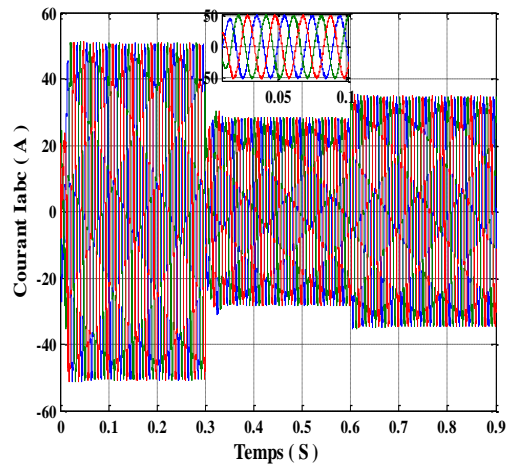


Figure III.27. Courant triphasé de réseau.

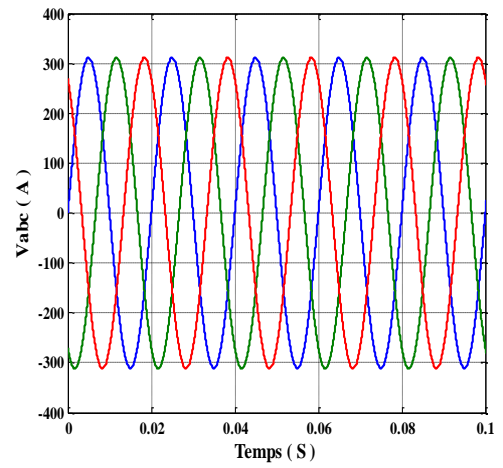


Figure III.28. Zoom de la tension de réseau.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la RLF qui permet de maximiser le point de puissance maximale (MPP) d'un système photovoltaïque, le contrôle de la vitesse du système éolien et le contrôle de la puissance active et réactive du réseau.

Les résultats de simulation prouvent que ce système peut s'adapter aux incertitudes et donner une réponse rapide, une bonne performance en régime transitoire, peu sensible aux variations des perturbations externes.

Les résultats obtenus lors de l'application du régulateur flou de Mamdani ont montré un comportement satisfaisant du système ainsi que des performances élevées. Toutefois, il y a un inconvénient qui réside dans le temps de calcul qui est relativement long tout dépend de la classe des fonctions d'appartenance.

IV.1.Introduction

La théorie du réglage par mode de glissement a été développée depuis plusieurs années déjà. Les premiers travaux ont été réalisés en URSS [68], [69], pour être repris et poursuivis dans d'autres pays. En fait, le mode de glissement est un mode particulier de fonctionnement des systèmes à structure variable. Le changement de structure peut se faire soit au niveau de la contre-réaction du régulateur, soit dans le système à régler lui-même au niveau de l'organe de commande [70], [71].

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à une classe particulière de structure de la variable de l'ingénierie des systèmes, connus sous le nom de convertisseurs électroniques de puissance. Le but de ce chapitre introductif est d'introduire les concepts de base et mathématique fond de contrôle de la SM qui sont nécessaires pour comprendre les discussions couve dans ce chapitre.

IV.2. Théorie de la commande par mode de glissement

IV.2.1 Systèmes à structure variable

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit est appelé mouvement de glissement [68], [69], [70].

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes [71], [72], [73], [74] :

- Le mode de convergence -MC- : c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation $s(x,y)=0$ (dans le cas de deux dimensions). Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

- Le mode de glissement -MG- : c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement $s(x,y)=0$.

- Le mode du régime permanent -MRP- : ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande [70], [71], [72], [73], [74], [75].

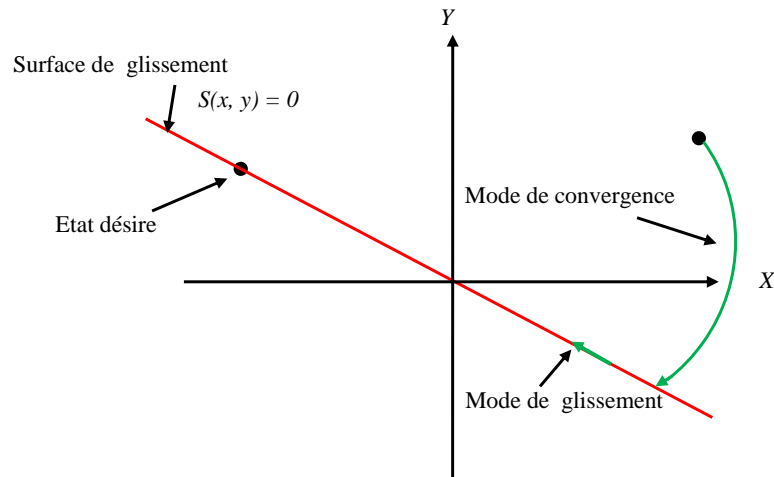


Figure IV.1. Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase.

IV.3. Conception de la commande par mode de glissement

Les avantages de la commande par mode de glissement sont importants et multiples : la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance, la robustesse...etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adaptée pour les systèmes ayant un modèle imprécis [76], [77], [78].

Souvent, il est préférable de spécifier la dynamique du système durant le mode de convergence. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties : une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode de glissement, et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire, car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle [72], [73], [74].

La conception de la commande peut être effectuée en trois étapes principales très dépendantes l'une de l'autre [72], [73], [74] :

- Le choix de la surface.
- L'établissement des conditions d'existence.
- La détermination de la loi de commande.

IV.3.1. Choix de la surface de glissement

On considère le modèle d'état suivant :

$$\dot{x} = A(x,t)x + B(x,t)u \quad (\text{IV.1})$$

Où x^n est le vecteur d'état, u le vecteur de commande

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande u .

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de référence x_{ref} , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} . e(x) \quad (IV.2)$$

Avec :

$e(x)$: est l'écart entre la variable à régler et sa référence : $e(x) = x_{ref} - x$.

λ_x : est une constante positive .

r : est un degré relatif, il représente le nombre de fois qu'il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande [69], [70], [71].

L'objectif de la commande est de maintenir la surface à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x)=0$ pour un choix convenable du paramètre λ_x . Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire qui est équivalent à une linéarisation exacte de l'écart tout en respectant la condition de convergence.

IV.3.2. Conditions de convergence et d'existence

Les conditions d'existence et de convergence sont les critères qui permettent aux différentes dynamiques du système de converger vers la surface de glissement et d'y rester indépendamment de la perturbation. Il existe deux considérations pour assurer le mode de convergence :

IV.3.2 .1. La fonction discrète de commutation

C'est la première condition de convergence, elle est proposée et étudiée par EMILYANOV et UTKIN. Il s'agit de donner à la surface, une dynamique convergente vers zéro. Elle est donnée par :

$$\begin{cases} \dot{S}(x) > 0 \text{ si } S(x) < 0 \\ \dot{S}(x) < 0 \text{ si } S(x) > 0 \end{cases} \quad (IV.3)$$

Cette condition peut être formulée autrement par :

$$\dot{S}(x).S(x) < 0 \quad (IV.4)$$

IV.3.2.2. La fonction de Lyapunov

La fonction de LYAPUNOV est une fonction scalaire positive ($V(x) > 0$) pour les variables d'état du système. La loi de commande doit faire décroître cette fonction ($\dot{V}(x) < 0$). L'idée est de choisir une fonction scalaire $S(x)$ pour garantir l'attraction de la variable à contrôler vers sa valeur de référence, et de concevoir une commande telle que le carré de la surface correspond à une fonction de LYAPUNOV [68], [69].

Nous définissons la fonction de LYAPUNOV comme suit :

$$V(x) = \frac{1}{2} \cdot S^2(x) \quad (\text{IV.5})$$

La dérivée de cette fonction est :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) \quad (\text{IV.6})$$

Pour que la fonction $V(x)$ puisse décroître, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci n'est vérifié que si la condition (IV.4) est vérifiée.

L'équation (IV.5) explique que le carré de la distance entre un point donné du plan de phase et la surface de glissement exprimé par $S^2(x)$ diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface à partir des deux côtés de cette dernière. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie [68], [69].

IV.3.3. Calcul de la commande

Lorsque le régime glissant est atteint, la dynamique du système est indépendante de la loi de commande qui n'a pour but que de maintenir les conditions de glissement (l'attractivité de la surface), c'est pour cette raison que la surface est déterminée indépendamment de la commande. Maintenant, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant les conditions d'existence du mode de glissement.

L'obtention d'un régime de glissement suppose une commande discontinue. La surface de glissement devrait être attractive des deux côtés. De ce fait, si cette commande discontinue est indispensable, il n'empêche nullement qu'une partie continue lui soit ajoutée. La partie continue peut en effet amener à réduire autant que nous voulons l'amplitude de la partie discontinue. En présence d'une perturbation, la partie discontinue a essentiellement pour but de vérifier les

conditions d'attractivité. Dans ce cas, la structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, une concernant la linéarisation exacte (u_{eq}) et l'autre stabilisante (u_n).

$$u = u_{eq} + u_n \quad (IV.7)$$

u_{eq} correspond donc à la commande proposée par FILIPOV. Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement $S(x)=0$. La commande équivalente est déduite, en considérant que la dérivée de la surface est nulle $\dot{S}(x) = 0$. Elle peut être interprétée comme étant un retour d'état particulier jouant le rôle d'un signal de commande appliqué sur le système à commander.

Elle peut être aussi interprétée autrement comme étant une valeur moyenne que prend la commande lors de la commutation rapide entre les valeurs u_{min} et u_{max} [70], [71].

La commande discrète u_n est déterminée pour vérifier la condition de convergence (IV.11) en dépit de l'imprécision sur les paramètres du modèle du système [71], [72], [73].

Pour mettre en évidence le développement précédent, nous considérons un système défini dans l'espace d'état par l'équation (IV.1). Il s'agit de trouver l'expression analogique de la commande u .

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (IV.8)$$

En remplaçant (IV.1) et (IV.7) dans (IV.8), nous trouvons :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot (A(x,t) + B(x,t)u_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x,t)u_n \quad (IV.9)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, la surface est nulle, et par conséquent, sa dérivée et la partie discontinue sont aussi nulles. D'où, nous déduisons l'expression de la commande équivalente :

$$u_{eq} = -\left(\frac{\partial S}{\partial x} \cdot B(x,t)\right)^{-1} \cdot \frac{\partial S}{\partial x} \cdot A(x,t) \quad (IV.10)$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que $\frac{\partial S}{\partial x} B(x,t) \neq 0$.

Durant le mode de convergence, et en remplaçant la commande équivalente par son expression dans (IV.9), nous trouvons la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x,t) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t) u_n \quad (\text{IV.11})$$

Et la condition d'attractivité exprimée par (IV.4) devient :

$$S(x,t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t) u_{eq} \quad (\text{IV.12})$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de u_n doit être opposé à celui de $S(x,t) \cdot \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t)$. La

forme la plus simple que peut prendre la commande discrète est celle d'un relais (figure IV.2).

$$u_n = K \cdot \text{sign}(S(x,t)) \quad (\text{IV.13})$$

Le signe de K doit être différent de celui de $\frac{\partial S}{\partial x} B(x,t)$.

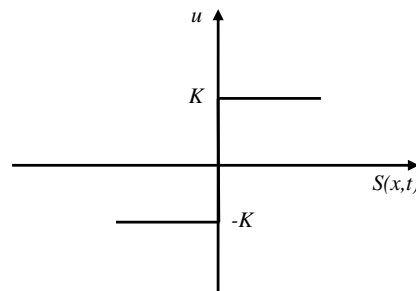


Figure IV.2. Représentation de la commande discontinue.

IV.3.4.1. Régime de glissement réel

Les commandes non linéaires sont de nature continue et sont difficiles à exprimer en échantillonné, plus particulièrement, la commande par mode de glissement. Ceci est dû aux hypothèses de conception qui supposent que la fréquence de commutation est infinie. Dans les **SSV** échantillonnés, l'état du système converge vers la surface sans y rester. Il se produit donc un mouvement de zigzag dans une bande au voisinage de la surface de commutation (figure IV.3) [70], [71]. Cette bande est le siège du mode de glissement réel qui est appelé quasi-mode de glissement ou plus précisément pseudo mode de glissement. Ce mouvement est dû au fait que l'action de la commande n'est activée qu'aux instants d'échantillonnage, et est maintenue constante entre ces instants. De plus, les grandeurs mesurées ou calculées à l'instant t_k ne sont disponibles qu'à l'instant t_{k+1} .

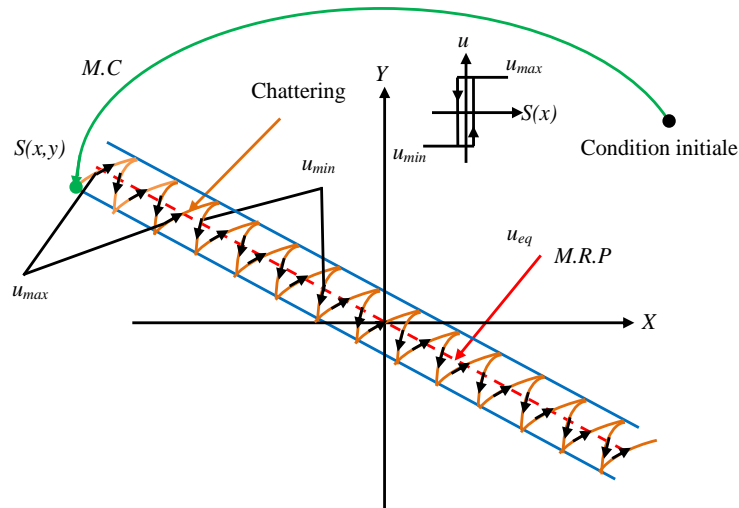


Figure IV.3. Régime glissant réel.

IV.3.4.1. Phénomène de Chattering

En mode de glissement, la commande discontinue commute entre deux valeurs ($\pm K$) à une fréquence théorique infinie. Ceci est impossible à réaliser à cause de la présence d'un temps de retard pour le calcul de la commande d'une part, et de la fréquence de commutation des interrupteurs d'autre part. Par conséquent, des oscillations de hautes fréquences se produisent. Ce phénomène est appelé phénomène de broutement (CHATTERING en anglais). Dans ce mode, la trajectoire d'état n'évolue plus exactement le long de la surface, mais elle tend à osciller au voisinage de celle-ci. Ce phénomène est néfaste pour le bon fonctionnement du système, et il peut exciter les dynamiques négligées durant la modélisation [72], [73], [74].

IV.3.4.2. Solutions pour atténuer le phénomène de réticence(Chattering)

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite, mode glissant d'ordre supérieur, etc.....

IV.3.4.2.1. Solution de couche limite

Dans le but de réduire ces oscillations, nous proposons une des solutions qui repose sur la variation de la commande u_n en fonction de la distance entre la trajectoire de la variation à régler et la surface de glissement. Il s'agit d'encadrer la surface par une bande avec un ou deux seuils, le choix des seuils est directement lié à la précision en boucle fermée.

Parmi les méthodes qui réduisent l'effet de la fonction signe dans une bande autour de la surface, nous trouvons la commande douce. Cette commande est caractérisée par un ou deux seuils.

Pour diminuer progressivement la valeur de u_n en fonction de l'approche de l'état vers la surface dans la région qui encadre cette dernière. La commande varie entre les deux valeurs limites ($\pm K$) suivant une pente entre les deux seuils (figure IV.4.a), ou dans le cas d'un seul seuil par une pente qui passe par l'origine du plan $(S(x,t), u)$ (figure IV.4.b) [73],[74].

- Commande douce à deux seuils

$$u_n = \begin{cases} 0 & \text{si } |S(x, t)| < \varepsilon_1 \\ |K| \cdot \frac{S(x, t) - \varepsilon_1 \cdot \text{sign}(S(x, t))}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} & \text{si } \varepsilon_1 < |S(x, t)| < \varepsilon_2 \\ |K| \cdot \text{sign}(S(x, t)) & \text{si } |S(x, t)| > \varepsilon_2 \end{cases} \quad (IV.14)$$

- Commande douce à un seul seuil

$$u_n = \begin{cases} |K| \cdot \frac{S(x, t)}{\varepsilon} & \text{si } |S(x, t)| \leq \varepsilon \\ |K| \cdot \text{sign}(S(x, t)) & \text{si } |S(x, t)| > \varepsilon \end{cases} \quad (IV.15)$$

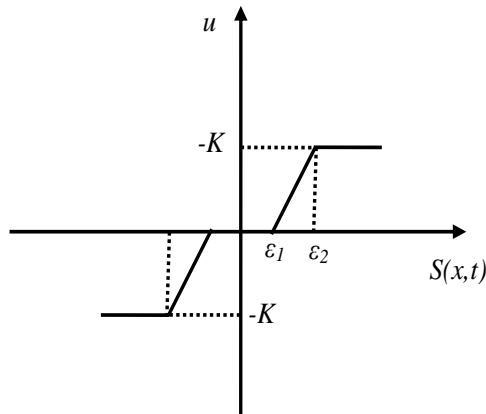


Figure IV.4.a. Commande à deux seuils.

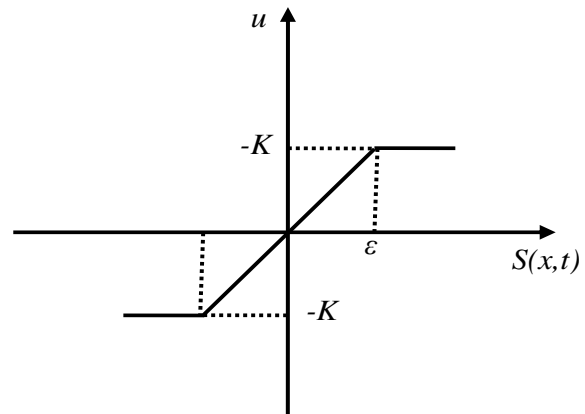


Figure IV.4.b. Commande à un seul seuil.

Quel que soit la méthode utilisée pour réduire le phénomène de CHATTERING, plus le nombre de seuils est grand, plus les effets du phénomène de CHATTERING sont atténués. De ce fait, il en résulte un écart statique qui est en fonction du nombre de seuils utilisés. Le nombre de seuils influe également sur la robustesse de la commande vis-à-vis aux perturbations et aux imprécisions des paramètres du modèle [73], [74].

IV.3.4.2.2. Solution par des modes glissants d'ordre supérieur

Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans

l'expression de la commande synthétisée mais dans une de ses dérivées supérieures, ce qui a le mérite de réduire le Chattering [73], [74].

IV.4. Application du mode glissant

Dans cette section, nous nous intéressons à l'application de la commande par mode glissant aux systèmes hybrides. Deux types de régulateurs sont synthétisés pour le réglage de la vitesse de l'éolienne et les courants du réseau, ainsi que la maximisation de la puissance des panneaux photovoltaïques par le mode glissant.

IV.4.1. Réglage de la vitesse d'éolienne par mode glissant

Afin d'extraire le maximum d'énergie du vent, nous avons adopté la stratégie de contrôle de la vitesse de la turbine. Il permet de régler la vitesse de l'éolienne à la valeur désirée qui correspond au point de puissance maximale.

Cette structure de contrôle consiste à ajuster le couple figurant sur l'arbre de la turbine afin de fixer la vitesse de la turbine à une référence qui permet de suivre le vent à sa puissance maximale. Cette référence est :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \quad (IV.16)$$

La vitesse du vent est variable, imprévisible et considérée comme une perturbation pour notre système. Par conséquent, nous avons besoin d'un algorithme de commande robuste qui permet d'atteindre la référence sans être affecté par cette perturbation.

La commande par mode glissant est l'une des techniques non linéaires.

Il s'agit d'un mode de fonctionnement particulier des systèmes de commande à structure variable. Son concept consiste à déplacer la trajectoire de l'état de surface prédéterminée du système appelé surface de glissement et de la maintenir autour de ce dernier avec une logique de commutation appropriée [74].

En général, pour un vecteur u de dimension m , nous devons choisir les surfaces m pour définir l'équation d'état. (IV-17),

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (IV.17)$$

Avec $x \in R^n$ et $u \in R^m$

En ce qui concerne la forme de la surface, nous proposons la forme suivante:

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} . e(x) \quad (\text{IV.18})$$

Lorsque le système de commande fonctionne en mode glissant variable, la commutation (commutation basse) respecte toujours la condition $S(x) = 0$. Par conséquent, la dérivée par rapport au temps devrait également toujours égale à zéro, c'est à dire, $\dot{S}(x) = 0$.

Alors que cette condition est respectée en tout temps, l'importance de la commande doit prendre une valeur bien déterminée, désignée par u_{eq} de contrôle équivalent.

Alors que la trajectoire de l'évolution du système tend vers $S=0$, le système doit être soumis à l'attraction de cette surface. Ceci se fera par le contrôle attrayant déterminé par l'état de l'attractivité: $S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0$

Cette commande permet de définir le comportement dynamique du système pendant le mode de convergence de la trajectoire de la surface de glissement.

Elle est égale à zéro une fois que le mode de glissement est atteint. La solution la plus simple est de choisir u_n avec la forme de relais:

$$u_n = -K \cdot \text{Sign}(S(x)) , \text{ avec } K > 0$$

Ainsi, le faible contrôle nécessaire pour ramener la variable que nous voulons contrôler à la surface choisie, respectant à la fois l'existence et l'attractivité des conditions est donné par:

$$u = u_{eq} + u_n$$

IV.4.2. Conception de mode de glissement et algorithme de commande

Pour concevoir un contrôleur de vitesse variable, nous considérons l'équation suivante [75], [76] :

$$\dot{\Omega} = \frac{1}{J} \cdot (T_g - T_{em} - f \cdot \Omega) \quad (\text{IV.19})$$

Nous choisissons l'erreur comme étant la surface de glissement:

$$S(\Omega) = e(\Omega) = \Omega_{ref} - \Omega \quad (\text{IV.20})$$

La dérivée de surface est:

$$\dot{S} = \dot{\Omega}_{ref} - \dot{\Omega} \quad (\text{IV.21})$$

Pour assurer la condition de l'attractivité, $\dot{S}(x) \cdot S(x) < 0$, \dot{S} est choisie comme suit:

$$\dot{S} = -K_1 \cdot \text{Sign}(S) - K_2 \cdot S \quad (\text{IV.22})$$

K_1 et K_2 sont des constantes positives, $\text{Sign}(S)$ est la fonction de signe.

Le couple de commande T_{em_ref} peut être obtenu à partir des équations. (IV.19), (IV.21) et (IV.22):

$$T_{em_ref} = J(-K_1 \cdot \text{Sign}(S) - K_2 \cdot S - \dot{\Omega}_{ref}) + T_g - f \cdot \Omega \quad (\text{IV.23})$$

IV.4.3. Modélisation du système hybride raccordée au réseau triphasé

Le modèle d'espace d'états d'un système hybride raccordé au réseau triphasé représenté sur la Figure(IV.5) peut être obtenu par l'équation dynamique décrite comme suit [77], [78] :

$$\begin{cases} \dot{i}_a = -\frac{R_f}{L_f} i_a - \frac{1}{L_f} V_a + \frac{V_{bus}}{3.L_f} (2.f_1 - f_2 - f_3) \\ \dot{i}_b = -\frac{R_f}{L_f} i_b - \frac{1}{L_f} V_b + \frac{V_{bus}}{3.L_f} (-f_1 + 2.f_2 - f_3) \\ \dot{i}_c = -\frac{R_f}{L_f} i_c - \frac{1}{L_f} V_c + \frac{V_{bus}}{3.L_f} (-f_1 - f_2 + 2.f_3) \\ \dot{V}_{bus} = \frac{1}{C} i_{bus} - \frac{1}{C} (i_a \cdot f_1 + i_b \cdot f_2 + i_c \cdot f_3) \end{cases} \quad (\text{IV.24})$$

Où

Ce modèle non linéaire et varié avec le temps, en appliquant la transformation de Park à (II.12), en utilisant une fréquence de rotation angulaire ω d'une ligne de réseau, le repère de référence synchronisé avec les réseaux de lignes, dans lequel la composante-d de la tension de la phase d'alimentation est égale à zéro, un modèle d'invariance dans le temps, et non linéaire, peut être écrite comme suit:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{bus} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega & \frac{f_d}{L_f} \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} & \frac{f_q}{L_f} \\ -\frac{f_d}{C} & -\frac{f_q}{C} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ V_{bus} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{1}{L_f} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ i_{bus} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.25})$$

Où

$$i_{dq} = T_{abc}^{dq} \cdot i_{abc}, V_{dq} = T_{abc}^{dq} \cdot V_{abc}, f_{dq} = T_{abc}^{dq} \cdot f_{123}$$

Le T^{qd}_{abc} est la matrice de transformation mentionnée en (II.12)

La puissance instantanée S qui est délivrée à la ligne de réseau est donnée par :

$$S = P + jQ \tag{IV.26}$$

Où P est la puissance active et Q est la puissance réactive.

Dans le cadre de rotation synchrone $d-q$, $V_d=0$.

Donc

$$P = \frac{3}{2} (V_q \cdot i_q)$$

$$Q = \frac{3}{2} (V_q \cdot i_d)$$
(IV.28)

La puissance active P peut être commandée par un courant i_q et la puissance réactive Q peut être commandée par un courant i_d .

Le schéma de contrôle proposé est montré sur la figure IV.5 :

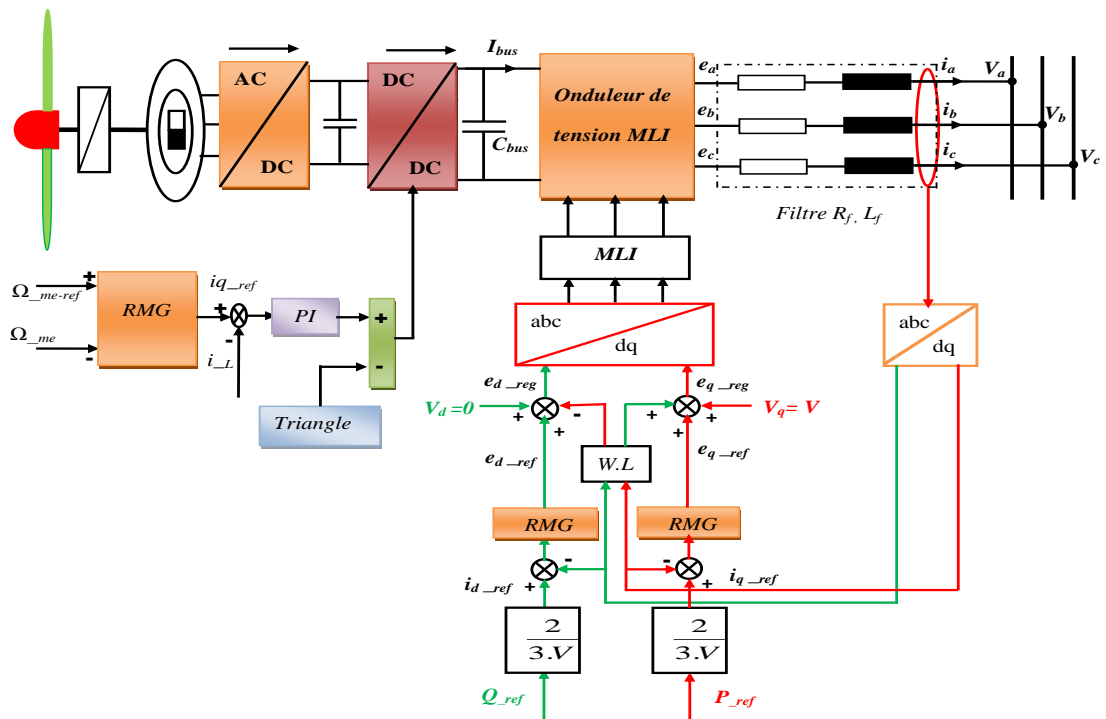


Figure IV.5. Configuration globale du contrôleur du système.

IV.4.4. Conception du dispositif de commande intégral en mode glissant

La conception du dispositif de commande en mode glissant commence à partir de la conception de la surface de glissement. Habituellement, la surface de glissement est réalisée par la combinaison linéaire des erreurs des variables d'état qui sont définies comme la différence entre les variables d'état et leurs références. Par conséquent, dans ce cas, la surface de glissement peut être conçue avec des erreurs de tension des sources renouvelables du système raccordé à un réseau triphasé. La tension de référence du réseau est une tension continue qui est produite à partir de contrôleur (MPPT), mais la tension du système est oscillante en raison des paramètres de circuit non appariés, ce qui résulte en un rendement indésirable en mode glissant [77], [78].

Le but principal d'un multi système hybride raccordé au réseau est de transférer la puissance maximale des sources primaires au réseau avec un facteur de puissance unitaire. Par conséquent, la surface de glissement doit être conçue pour contrôler l'inductrice de puissance. Cette condition peut être obtenue en sélectionnant une surface de glissement seulement à l'aide des erreurs de courant dans l'inductance. Si le courant de la bobine d'inductance de référence est exprimé comme une fonction de puissance des sources du système, puis la surface de glissement peut commander à la fois le courant de l'inductance et la puissance des multi systèmes hybride.

En supposant que la transmission de puissance sans perte entre le générateur et la ligne de réseau, la relation suivante est obtenue à partir de (IV.28) si la puissance réactive est commandée par la mise à zéro $i_d = 0$

$$P_{sources} = P_{réseau} = \frac{2}{3} V_d \cdot i_q \quad (IV.29)$$

La surface de glissement solidaire proposée est définie comme suit:

Où

$$\begin{cases} S(i_d) = i_{d-ref} - i_d + C_d \int_0^t (i_{d-ref} - i_d) dt \\ S(i_q) = i_{q-ref} - i_q + C_q \int_0^t (i_{q-ref} - i_q) dt \end{cases} \quad (IV.30)$$

$$\begin{cases} i_{q-ref} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{Sources}}{V_q} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_{ref}}{V_q} \\ i_{d-ref} = 0 \end{cases} \quad (IV.30)$$

P_{ref} est la puissance de référence des sources qui sont données par les contrôleurs MPPT.

L'étape suivante consiste à concevoir une entrée de commande qui satisfait à la loi de l'existence du mode de glissement. L'entrée de commande est définie comme suit:

$$V_d = f_d \cdot V_{bus}, V_q = f_q \cdot V_{bus} \quad (IV.32)$$

L'entrée de commande est choisie pour présenter la structure de la façon suivante :

$$\begin{cases} e_{d_reg} = V_{d-eq} + V_{d-nd} \\ e_{q_reg} = V_{q-eq} + V_{q-nq} \end{cases} \quad (IV.33)$$

Où V_{eq} est une entrée de contrôle équivalente qui détermine le comportement du système sur la surface de glissement et V_{ni} est une entrée de commutation non linéaire qui entraîne l'état de la surface de glissement et maintient l'état de la surface de glissement en présence des variations et des perturbations des paramètres.

L'entrée de commande équivalente est obtenue à partir de la condition d'invariance qui est donnée par la condition suivante en tant que :

$$S = 0 \ \& \ \dot{S} = 0 \implies e_i = V_{eq} \quad (V.34)$$

En résumé, l'entrée de commande équivalente est donnée par :

$$\begin{cases} V_{d-eq} = Ri_d - \omega L_q i_q + V_d + C_d \begin{pmatrix} i_{d_ref} & -i_d \end{pmatrix} \\ V_{q-eq} = Ri_q + \omega L_q i_d + V_q + C_q \begin{pmatrix} i_{q_ref} & -i_q \end{pmatrix} \end{cases} \quad (IV.35)$$

L'entrée non linéaire V_{ni} de commutation peut être choisie de la façon suivante :

$$V_{ni} = K \cdot \text{Sign}(S_i) \quad (IV.36)$$

Si (IV.35) et (IV.36) sont remplacés dans (IV.33), la gamme d'assurer $K_i, S \cdot \dot{S} < 0$ peut déterminée comme suit:

$$\begin{aligned}
S_1 \cdot \dot{S}_1 &< 0 \\
S_1 \cdot \left(\frac{R_f}{L_f} i_d - \omega i_q + \frac{V_d}{L_f} + C_1 \cdot (i_{d_ref} - i_d) - \frac{1}{L_f} (R_f \cdot i_d - \omega \cdot L_f \cdot i_q \right. \\
&+ V_d + C_1 \cdot L_f (i_{d_ref} - i_d) + K_1 \cdot \text{Sign}(S_1) \left. \right) < 0 \\
S_1 \left(-\frac{K_1}{L_f} \text{Sign}(S_1) \right) &< 0 \\
S_2 \cdot \dot{S}_2 &< 0 \\
S_2 \cdot \left(\frac{R}{L_f} i_q - \omega i_d + \frac{V_q}{L_f} + C_2 \cdot (i_{q_ref} - i_q) - \frac{1}{L_f} (R_f \cdot i_q - \omega \cdot L_f \cdot i_d \right. \\
&+ V_q + C_2 \cdot L_f (i_{q_ref} - i_q) + K_2 \cdot \text{Sign}(S_2) \left. \right) < 0 \\
S_2 \left(-\frac{K_2}{L_f} \text{Sign}(S_2) \right) &< 0
\end{aligned} \tag{IV.37}$$

Par conséquent, les plages des gains de commutation sont données comme suit:

$$K_1 > 0, K_2 > 0 \tag{IV.38}$$

À partir de (13), (14) et (16), l'entrée de commande $e_i = V_{eq} + V_{ni}$ est donnée comme suit:

$$\begin{cases} e_{d_reg} = R_f i_d - \omega L_f i_q + V_d + C_1 (i_{d_ref} - i_d) + K_1 \cdot \text{sign}(S_1) \\ e_{q_reg} = R_f i_q + \omega L_f i_d + V_q + C_2 (i_{q_ref} - i_q) + K_2 \cdot \text{sign}(S_2) \end{cases} \tag{IV.39}$$

IV.5. Maximisation de la puissance du générateur photovoltaïque par mode glissant

La puissance électrique produite par un générateur photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et à un degré moins important de la température des cellules mais aussi du vieillissement global du système. Ces variables influencent sur le comportement du système en présentant des fluctuations quotidiennes et saisonnières. Pour ces raisons, le générateur photovoltaïque ne peut fournir une puissance maximale que pour une tension particulière et un courant bien déterminé; ce fonctionnement à puissance maximale dépend de la charge à ses bornes. À cet effet et en fonction du type de charge, un dispositif de contrôle devra être intégré dans le circuit de commande du convertisseur. Ce dernier doit être capable de faire fonctionner le générateur photovoltaïque à sa puissance maximale.

La méthode de suivi ou "Tracking" connue sous le nom MPPT (Maximum Power Point Tracking) est basée sur l'utilisation d'un algorithme de recherche où le maximum de la courbe de puissance est estimé sans interrompre le fonctionnement normal du panneau photovoltaïque.

Parmi Les méthodes et les stratégies de tracking qui existent dans la littérature, nous retenons la méthode d'optimisation par mode glissant. Pour avoir un contrôleur de mode glissant, nous considérons les équations suivantes [79], [80], [81], [82], [83] :

La puissance de sortie du GPV

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot i_{PV} \quad (IV.40)$$

La surface de glissement est défini par $S = \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}}$

$$\text{Tel que : } \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} = \frac{\partial (V_{PV} \cdot i_{PV})}{\partial V_{PV}}$$

Donc :

$$\frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} = \frac{\partial i_{PV}}{\partial V_{PV}} V_{PV} + i_{PV} = 0 \quad (IV.41)$$

La surface de glissement sera d'écrite comme suit :

$$S = \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} = \frac{\partial i_{PV}}{\partial V_{PV}} V_{PV} + i_{PV} \quad (IV.42)$$

La structure d'un contrôleur par mode de glissement est constituée de deux parties, l'une concernant la linéarisation exacte (u_{eq}) et l'autre la stabilisation (u_n).

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_n(t) \quad (IV.43)$$

u_n : est défini selon le signe de la surface de glissement :

$$u_n = \begin{cases} 0 & S \geq 0 \\ 1 & S < 0 \end{cases} \quad (IV.44)$$

La dérivée de la surface est :

$$S(x) = \frac{\partial S}{\partial x^T} f(x) \quad (IV.45)$$

En remplaçant (IV.17) dans (IV.45) :

$$S(x) = \frac{\partial S}{\partial x^T} f(x) + \frac{\partial S}{\partial x^T} g(x) u_{eq} \quad (IV.46)$$

Pour définir la commande u_{eq} , on pose la dérivé de la surface égale à zéro ($\dot{S} = 0$) :

$$u_{eq} = - \frac{\frac{\partial S}{\partial x^T} f(x)}{\frac{\partial S}{\partial x^T} g(x)} \quad (IV.47)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x^T} f(x) = \left(\frac{\partial^2 i_{PV}}{\partial^2 V_{PV}} V_{PV} + 2 \frac{\partial i_{PV}}{\partial V_{PV}} \right) \frac{i_{PV}}{C} \quad (IV.48)$$

$$\frac{\partial S}{\partial x^T} g(x) = \left(\frac{\partial^2 i_{PV}}{\partial^2 V_{PV}} V_{PV} + 2 \frac{\partial i_{PV}}{\partial V_{PV}} \right) \cdot \frac{i_L}{C} \quad (IV.49)$$

D'après l'équation (IV.48) et (IV.49), on trouve :

$$u_{eq} = \frac{i_{PV}}{i_L} \quad (IV.50)$$

➤ **Conditions de convergence et d'existence**

Parmi les critères qui permettent d'étudier la stabilité et la convergence vers la surface de glissement ; la stabilité au sens de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} S^2 > 0$$

La dérivée est :

$$\dot{V} = S \frac{dS}{dt} = \frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial P_{pv}}{\partial V_{pv}} \right) \quad (IV.53)$$

$$D'après le chapitre (I), l'équation (I.1) \quad I_{PV} = I_L - I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V_{PV} + I \cdot R_s)}{\gamma \cdot K \cdot T_C} \right) - 1 \right]$$

Pour simplifier le calcul on pose $R_s = 0$.

En remplaçant l'équation (I.1) dans (IV.42), on obtient l'équation de S, la stabilité du system est résumée dans le tableau suivant :

$$S = (I_L + I_0) - I_0 \left[1 + \frac{q \cdot (V_{PV})}{\gamma \cdot K \cdot T_C} \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V_{PV})}{\gamma \cdot K \cdot T_C} \right) \right] \quad (IV.54)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS}{dV_{PV}} \cdot \frac{dV_{PV}}{dt} = -I_0 \left[\frac{2 \cdot q}{\gamma \cdot K \cdot T_C} + \frac{q \cdot (V_{PV})}{\gamma \cdot K \cdot T_C} \right] \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot (V_{PV})}{\gamma \cdot K \cdot T_C} \right) \right] \cdot \frac{dV_{PV}}{dt} \quad (IV.55)$$

Variation		$\frac{dS}{dV_{PV}}$
S et V_{PV}	S	
$\frac{dV_{PV}}{dt} < 0$	Négative	Positif
$\frac{dV_{PV}}{dt} > 0$	Positif	Négative
$S \cdot \frac{dS}{dt}$	Négative Système stable	Négative Système stable

Tableau IV.1. Vérification des conditions de stabilité

La configuration proposée est montrée dans la figure (IV.6). Elle est composée d'un contrôleur MPPT par mode glissant et la modulation de largeur d'impulsion(PWM). Le contrôleur MPPT suit le point maximal de la puissance utilisant la tension (V_{PV}) et le courant (I_{PV}). Ce dispositif de commande a pour objectif de contrôler le courant d'inductance et de suivre le courant de référence utilisant la surface de glissement où le générateur PWM génère le signal d'impulsion pour la commutation à l'entrée de la commande.

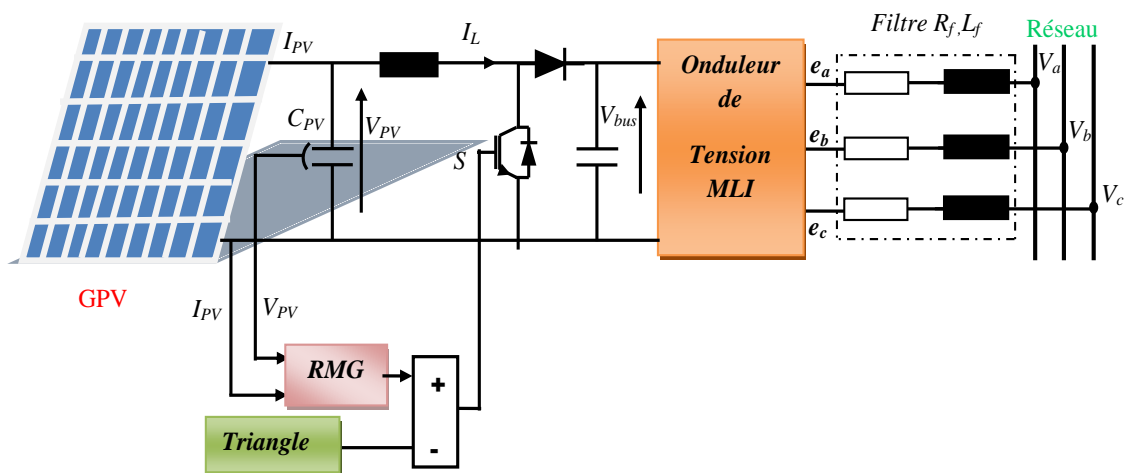


Figure IV.6. Configuration du contrôleur du système solaire.

IV.6. Résultats de simulations

Pour prouver la conception du multi système hybride proposé, le système complet est simulé en utilisant le Matlab Simulink. Les trois sources d'énergie sont modélisées afin de prédire les caractéristiques du système. Les figures ci-dessous illustrent les différents résultats afin d'étudier les performances de contrôle par mode glissant.

A. Générateur éolien

Pour évaluer la performance de l'état d'équilibre du système proposé, les réponses données pour la vitesse du vent, la variation de la vitesse mécanique, la variation du couple et la variation de la puissance d'éolienne des figures IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10 sont évaluées. Les figures montrent que le contrôle par mode glissant donne un temps de réponse inférieur à celui du contrôle flou mentionné dans le chapitre III, mais des pics supérieurs à ceux des régulateurs cités dans le chapitre précédent.

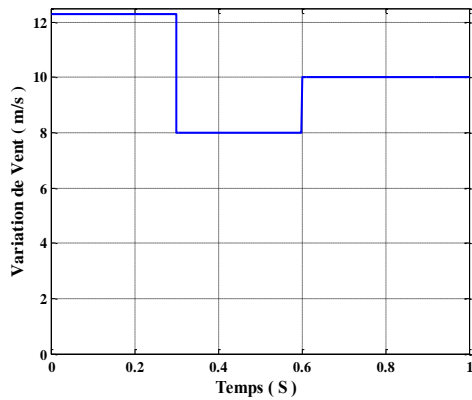


Figure IV.7 .Variation du vent.

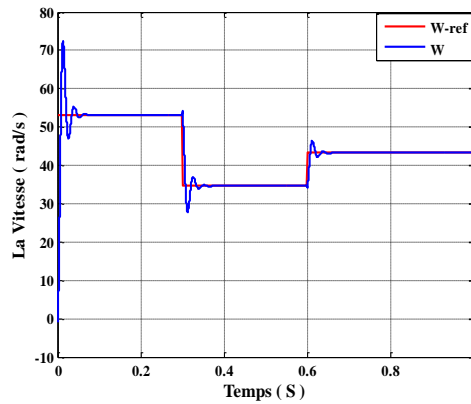


Figure IV.8 .Variation de la vitesse mécanique GE.

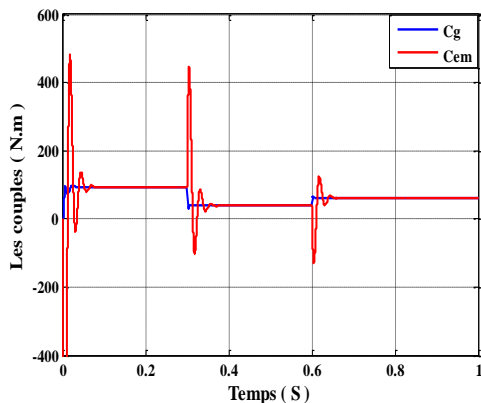


Figure IV.9. Variation du Couple GE.

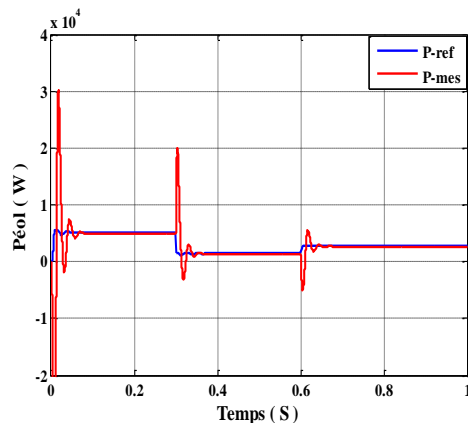


Figure IV.10. Variation de la Puissance GE.

B. Générateur photovoltaïque

Les figures IV.11, 12, 13 et 14 montrent les résultats de la simulation de l'unité de commande en mode glissant. D'après la figure IV.12, l'adaptation se fait au point optimal pour l'intensité de courant qui est de 35A avec un régime transitoire court de 0.04s et pour un éclairement de 1000 W/m². Après changement du niveau d'éclairement, qui chute à 300 W/m², le courant de GPV est ajusté sur sa nouvelle valeur optimale, qui est 10A pour ce niveau d'insolation. Après augmentation à nouveau du niveau d'insolation à 500W/m², et après un régime transitoire d'environ 0.03 s, il y a réajustement au point optimal qui est de 18A.

La variation de la tension du GPV est montrée dans la figure (IV.13), face au changement de la tension, le contrôleur par mode glissant s'adapte à la nouvelle valeur. Les valeurs obtenues à l'état d'équilibre sont proches des valeurs optimales de tension qui sont de 155 V pour 1000 W/m², 140 V pour 300W/m² et 145 V pour 500W/m². La variation de la puissance instantanée du GPV est montrée dans le figure (IV.14). Ses valeurs optimales sont près de 5.3 kW pour un éclairement de 1000 W/m², 1.5 kW pour 300 W/m² et 2.5 kW pour 500 W/m².

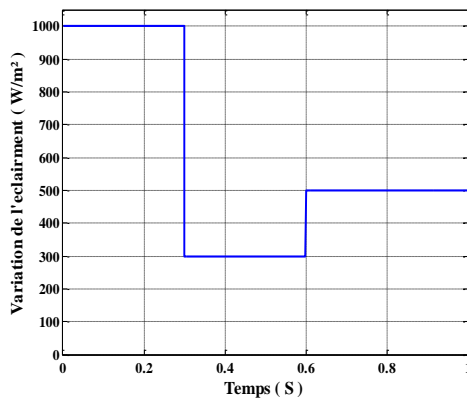


Figure IV.11. Variation de l'éclairement.

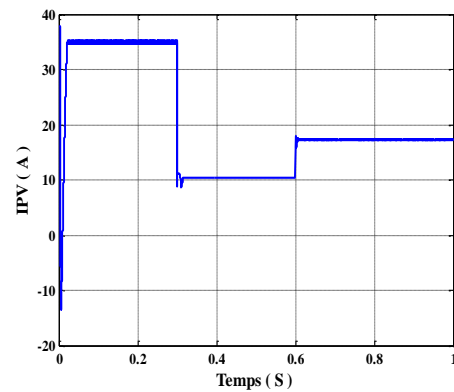


Figure IV.12. Variation du courant de GPV.

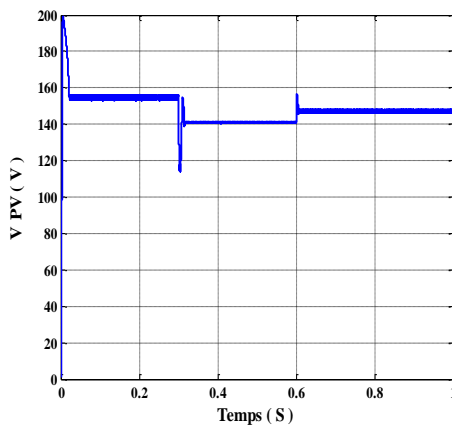


Figure IV.13. Variation de tension de GPV.

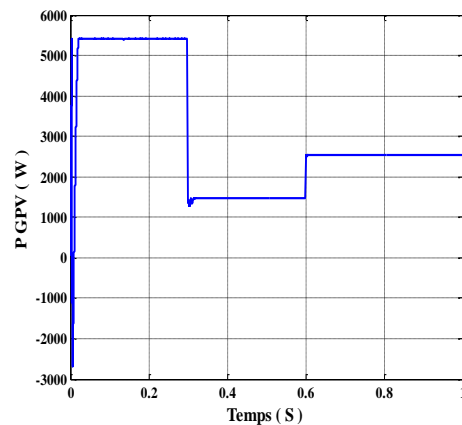


Figure IV.14. Variation de puissance de GPV.

C. la pile à combustible

Selon les résultats de simulation présentés ci-dessous, la variation de la puissance de la pile à combustible est obtenue à partir de la puissance demandée au réseau, en cas où la somme des puissances des deux générateurs (éolien et solaire) est insuffisante. Les trois figures IV.15, 16 et 17 montrent bien l'état de variation et le fonctionnement de la pile à combustible ainsi qu'à quel point le générateur éolien et solaire sont suffisants et insuffisants. La figure IV.15, montre que le courant converge vers leur référence après un temps de réponse de 0.15s, La puissance est 4.2 kW (la puissance des générateurs éolien et solaire est insuffisante). Après 0.3s, elle augmente jusqu'aux environs de 5 kW, puis elle diminue encore à 4.2 kW (la puissance de l'éolien et du solaire est insuffisante). Les figures montrent aussi que les pics et le régime transitoire sont supérieurs par rapport au contrôle mentionné au chapitre précédent.

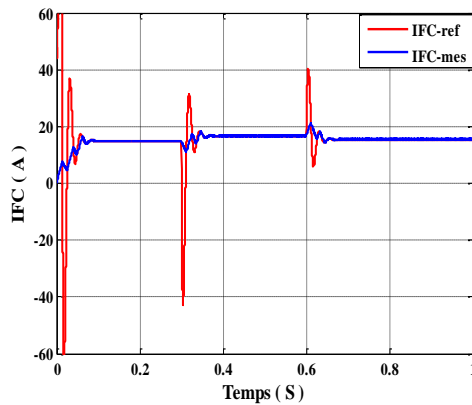


Figure IV.15. Courant de contrôle de la PC.

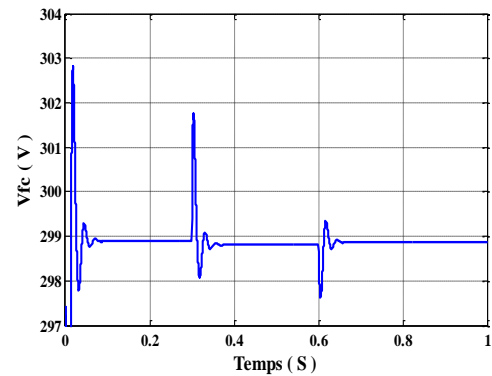


Figure IV.16. Tension de la PC.

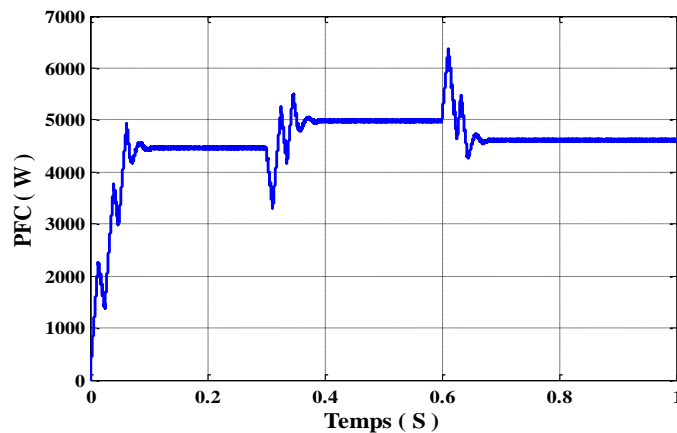


Figure IV.17. La puissance de la pile à combustible.

D. Coté onduleur réseau

D'après la figures IV.19, on voit que la puissance compensée converge vers la référence (Puissance demandée). Dans l'intervalle [0-0.3s], la puissance de l'éolienne et du solaire sont insuffisantes. Pour l'intervalle [0.3-0.6s], la puissance des deux sources principales sont insuffisantes.

La tension du bus est conservée à la tension de référence quelque soit la variation des sources puisque les batteries conservent cette valeur ($V= 800$ V, figure IV.18).

Selon les résultats de simulation présentés ci-dessous, toutes les grandeurs à optimiser. Le courant de commande injecté au réseau converge bien vers leurs références après un temps de réponse acceptable plus court relativement à la dynamique lente du profil de la source primaire (éclairage, vent, pile à combustible) pour le contrôle flou par rapport au contrôle flou-PI.

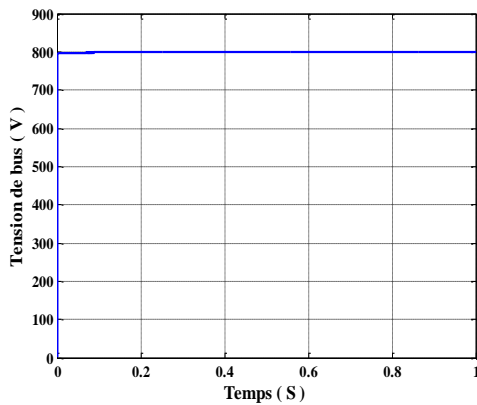


Figure IV.18. Tension du bus.

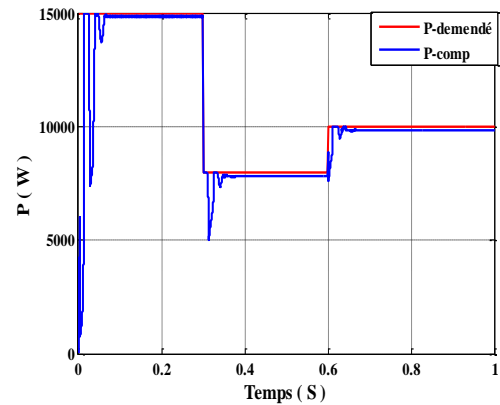


Figure IV.19. Puissance demandée et compensée.

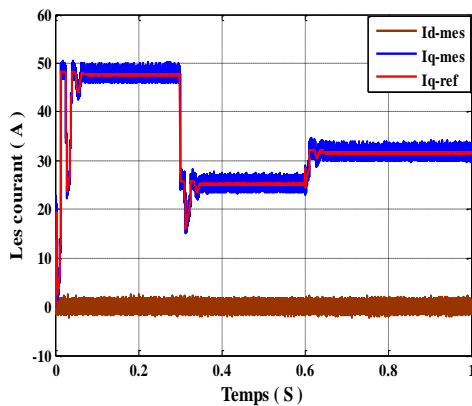


Figure IV.20. Courant injecté au réseau.

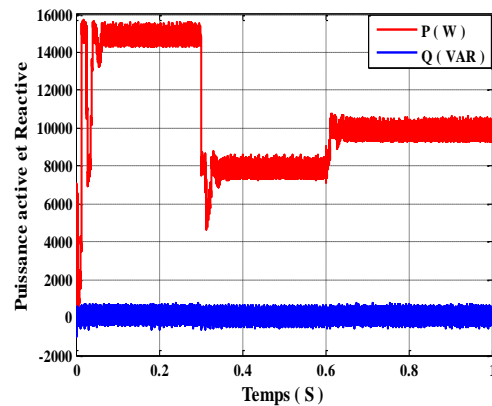


Figure IV.21. Puissance injectée au réseau.

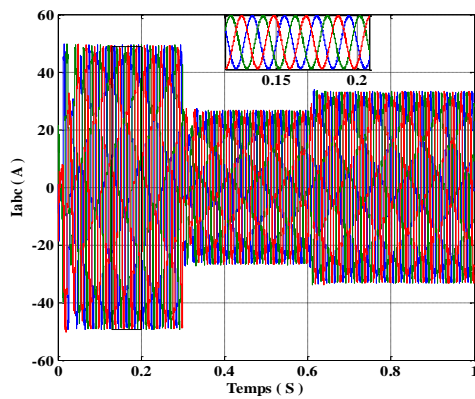


Figure IV.22. Courant triphasé de réseau.

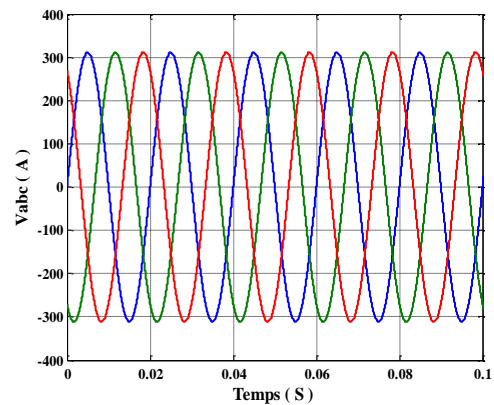


Figure IV.23. Zoom de la tension de réseau.

Les figure IV.20, 21 représente le courant et les puissances (active, réactive) injectées au réseau, face au changement au niveau des conditions climatiques (éclairage, vitesse du vent). La puissance active de 1.5kW est le point de puissance maximale, et la puissance réactive est mise à zéro. Pour vérifier la performance de suivi du contrôleur proposé, P_{ref} passe de 1.5kW à 1kW. Cette correspond à la variation du courant I_{qref} de référence de 48A à 31A. Pour la transmission du facteur de puissance de l'unité, la valeur de I_{dref} est mis à zéro.

La tension du réseau et des formes d'onde de courant inducteur pour une phase sont représentées sur la Fig. IV.22, 23. La tension et le courant de phase sont synchronisés et la transmission du facteur de puissance de l'unité est obtenue.

Les performances de suivi de MPPT du système proposé sont représentées sur la figure IV.13. En raison de l'ondulation de la tension du générateur, la valeur moyenne a été utilisée pour le calcul de l'énergie.

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre un robuste traqueur de point de puissance maximale utilisant un contrôleur de mode glissant pour la connexion des systèmes multi-sources au réseau triphasé a été proposé. Les principales remarques finales sont résumées comme suit:

- Les paramètres des intégrales coulissantes du mode de réponse rapide, de bonnes performances transitoires et sensibilité aux variations de perturbations externes.
- L'inconvénient de cette technique est le Chattering qui est généralement indésirable car il ajoute au spectre de la commande, des composants de haute fréquence, et pour pallier à cet inconvénient, une combinaison avec des techniques telles que le mode de glissement-flou sont nécessaires.
- Cette technique présente un algorithme de commande simple et robuste qui a l'avantage d'être facilement implantable dans la calculatrice.

Conclusion Générale

Nous nous sommes intéressés dans cette thèse à l'étude et l'optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique composé d'une éolienne, des panneaux photovoltaïques et des éléments de stockages (piles combustibles).

Dans ce contexte, nous avons modélisé chaque bloc de la chaîne de conversion d'énergie du système ainsi que la commande de chaque convertisseur. Le problème qui se pose est généralement une exploitation non optimale du système. Alors une adaptation est nécessaire pour maximiser le rendement du système d'une part et pour réduire le coût du système d'autre part. Pour parvenir à cet objectif, nous avons opté pour différentes techniques d'optimisation.

Nous avons d'abord étudié l'optimisation conventionnelle de la puissance de chaque générateur qu'on a considéré comme référence. Nous avons constaté une variation très sensible du rapport cyclique du hacheur coté générateur photovoltaïque (GPV) lorsque l'éclairement et la température varient. Cette sensibilité est dépendante du type de source et de la nature de la charge.

Afin de résoudre ce problème, nous avons présenté quelques algorithmes basés sur les techniques numériques et l'intelligence artificielle (floue et mode glissant).

Pour se faire, nous avons exposé premièrement un état de l'art sur les différentes technologies utilisées dans les systèmes d'énergie hybride. Nous exposons entre autre la situation énergétique actuelle concernant la production d'électricité dans le monde et dans le cas particulier de l'Algérie. Nous listons ensuite une brève présentation d'une manière, la fonction, la classification et les différentes structures d'un système hybride. Puis un état de l'art concernant les différentes topologies de couplage du bus DC et AC ainsi que leurs avantages et inconvénients. Nous donnons enfin une discussion générale sur le stockage, les convertisseurs, la charge et les différents types des systèmes de supervision.

Par la suite, nous avons présenté une étude sur notre système hybride ainsi que la modélisation mathématique des différents sous-systèmes qui le constituent. Les trois sources d'énergie (photovoltaïque, éolien et piles combustibles) sont simulées et modélisées afin de prédire leurs caractéristiques réelles. Selon les résultats de simulation présentés, toutes les grandeurs à optimiser telle que la tension, le courant et la puissance du générateur photovoltaïque convergent bien vers leurs références après un temps de réponse acceptable.

Notre système hybride conçu pour générer une puissance continue, indépendamment des sorties de puissance intermittentes à partir des sources d'énergie éolienne et photovoltaïque.

Conclusion Générale

Les systèmes éolien et photovoltaïque sont contrôlés pour fonctionner à leur point de puissance maximale sous différentes conditions.

Après, nous avons présenté la règle par contrôleur PI, la logique flou (RLF) et la logique flou PI (RLF-PI) qui permettent de maximiser le point de puissance maximale (MPP) d'un système photovoltaïque, le contrôle de la vitesse du système éolien et le contrôle de la puissance active et réactive injecté au réseau. Les résultats de simulation prouvent que ce système peut s'adapter aux incertitudes il donne un temps de réponse plus rapide et une bonne performance en régime transitoire, et il est peu sensible aux variations des perturbations externes. L'application du régulateur flou de Mamdani a montré un comportement satisfaisant du système ainsi que des performances élevées. Toutefois, il y a un inconvénient qui réside dans le temps de calcul qui est relativement grand dépendamment de la classe des fonctions d'appartenance.

Dans le dernier chapitre, nous présentons la théorie de base du mode glissant et son application pour optimiser la vitesse de l'éolienne, la puissance active et réactive injectée au réseau et l'optimisation de la puissance maximale du système photovoltaïque. Cette technique présente un algorithme de commande simple et robuste qui a l'avantage d'être facilement implantable dans la calculatrice.

- L'inconvénient de cette technique est qu'elle n'est généralement pas souhaitable, car elle ajoute une des composants d'une haute fréquence du spectre de la tension et du courant GPV. Pour pallier à cet inconvénient, une combinaison avec des techniques telles que le mode de glissement flou doit être envisagée etc.

En perspective, ce travail pourra être complété par :

- L'utilisation des méthodes analytiques approchées pour optimiser les différents points de puissance maximale du système photovoltaïque.

- L'utilisation de la méthode combinée neurone-floue, celle des algorithmes génétiques par PSO où l'utilisation d'un régulateur à mode glissant-floue, pour l'optimisation de la puissance maximale du système photovoltaïque.

- [01] Ministère de L'énergie 2015. <http://www.mem-algeria.org>
- [02] J. Labbé « L'hydrogene Electrolytique Comme Moyen de Stockage D'electricite pour Systemes Photovoltaïques Isoles » Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris 2006.
- [03] F. Alkhalil « Supervision, Economie et Impact Sur L'environnement D'un Système D'énergie Electrique Associé à une Centrale Photovoltaïque» Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers 2011.
- [04] U.S. Energy Information Administration / International Energy Outlook 2010 www.eia.gov/oiaf/ieo/index.html.
- [05] Aysar M.M. Yasin « Distributed Generation Systems Based on Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell structures » Thèse de doctorat, Università Degli Studi di Catania Scuola Superiore di Catania 2012.
- [06] Trends in Photovoltaic Applications Survey Report of Selected IEA Countries Between 1992 and 2011 Report IEA-PVPS T1-21:2012 www.suterkeller.ch
- [07] Global Wind Energy Out Look 2012 GWEC www.gwec.net
- [08] [09 L. Stoyanov « Etude de Différentes Structures de Systèmes Hybrides à Sources D'énergie Renouvelables », Thèses de Doctorat, Université Technique de Sofia ,2011.
- [09] C. Ashari,M.,Nayar,C.V.,Keerthipala,W.W.L., «Optimum Operation Strategy and Economic Analysis of a Photovoltaic - Diesel - Battery –Mains Hybrid Uninterruptible Power Supply». Renewable Energy, Vol.22, Issues 1-3, pp.247- 254, March 2001.
- [10] T. Zhou, « Commande et Supervision Energétique d'un Générateur Hybride Actif Eolien Incluant du Stockage Sous Forme D'hydrogène et des Super-Condensateurs pour l'Intégration dans le Système Electrique d'un Micro Réseau », Thèse de Doctorat Ecole Centrale de Lille 2009.
- [11] I.Vechiu « Modélisation et Analyse de L'intégration des Energies Renouvelables dans un Réseau Autonome » ; Thèses de Doctorat, de L'université du Havre, 2005.
- [12] Courtecuisse « Supervision D'une Centrale Multi-Source à Base D'éoliennes et Stockage D'énergie Connectée au Réseau Electrique », Thèse de Doctorat. L'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers.2008.
- [13] A.Payman, « Contribution à la Gestion de l'Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-Sources Multi-charges », Thèse de Doctorat ,L'Institut National Polytechnique de Lorraine 2009.
- [14] J. Bernard, « Véhicules Hybrides à Pile à Combustible, Dimensionnement et Stratégies de Commande » These de doctorat, L'université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis 2007.

- [15] Caisheng Wang, « Modeling and Control of Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Distributed Generation Systems », These de Doctorat, Dissertation, Montana State University, July 2006.
- [16] A. Labouret, P. cumunel, J-P. Braun, « Cellules Solaires Les Bases de L'énergie Photovoltaïque», Dunod, Paris 2001.
- [17] M.N. Kasbadji, « Quel veiner pour l'énergie éolienne en Algérie», Bulletin N° 14-04, CDER , Décembre 2008.
- [18] B. Azoui et al, "Sizing and Optimization Models for Photovoltaic Pumping System Using BLDCM Motor", AMSE, pp 55-69, 2003.
- [19] Z .Laid "Etude Technique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque-Eolien Hors Réseau" Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010.
- [20] Dai, W. Chen et Y. Zhu « Seeker Optimization Algorithm for Optimal Reactive Power Dispatch», IEEE Transactions on power Systems, Vol. 24, Issue.3, pp.1218-1231 August 2009.
- [21] T. Ghannam, B. François, E.M. Berkouk, «Local Supervisory Algorithm for Reactive Power Dispatching of a Wind Farm » 13th European Conference on power Electronics and Applications (EPE)Barhchalona ,Spain, 5-8 September 2009.
- [22] T.Ghennam « Supervision D'une Ferme Eolienne pour Son Intégration dans la Gestion D'un Réseau Electrique, Apports des Convertisseurs Multi Niveaux au Réglage des Eoliennes à Base de Machine Asynchrone à Double Alimentation » Thèse de Doctorat, Ecole Militaire Poly technique, (EMP) Alger, Ecole Centrale de Lille, 2011.
- [23] S.El Aimani, « Modélisation de Différents Technologies d'Eoliennes Intégrées dans Un Réseau de Moyenne Tension » Thèse Doctorat de l'Ecole Centrale de Lille 2006.
- [24] J. G. Sloopweg, S. W. H. Haan, H. Polinder, and W. L. Kling « General Model for Representing Variable Speed Wind Turbines in Power System Dynamics Simulations» IEEE, Power Engineering, Vol. 18, Issue 1, pp 144-151, February 2003.
- [25] A.Davigny « Participation aux Survies Systèmes Fermes d'éolienne à Vitesse Variable Intégrant du Stockage Inertiel d'Energie »Thèse de Doctorat de L'université des Science et Technologie de Lille 2007.
- [26] F. A. Mirecki «Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance » Thèse de Doctorat de L'institut Nationale polytechnique de Toulouse 2005.
- [27] Valenciaga and P. F. Puleston « High-Order Sliding Control for a Wind Energy Conversion System Based on a Permanent Magnet Synchronous Generator » IEEE, Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, Issue 3, pp 860-867, September 2008.

Référence

- [28] G. Esmaili «Application of Advanced Power Electronics in Renewable Energy Sources and Hybrid Generating Systems» These de Doctorat, School of The Ohio State University 2006.
- [29] F. Valenciaga , Paul F. Puleston, Pedro E. Battaiotto «Power Control of a Solar/Wind Generation System Without Wind Measurement: A Passivity/Sliding Mode Approach» IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol: 18, Issue:4, pp 501 – 507, December 2003.
- [30] F. Valenciaga , Paul F. Puleston «Supervisor Control for a Stand-Alone Hybrid Generation System Using Wind and Photovoltaic Energy » IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol: 20, Issue: 2, pp 398 – 405, 2005
- [31] S. Gusia «Modélisation des Systèmes Electroniques de Puissance à Commande MLI» Thèse de Doctorat de Université catholique de Louvain 2005.
- [32] B.K. Bose « Power Electronics and Motor Drives » Book, Elsevier USA 2006.
- [33] P. Tritschler «Optimisation de L'architecture Electrique et Gestion d'Energie pour un Système à Pile à Combustible Embarquée Dédié a L'application Agricole »Thèse de Doctorat de L'Université de Grenoble 2010.
- [34] R.Chenni, «Etude Technico-Economique d'un Système de Pompage Photovoltaïque dans un Village Solaire » Thèse de Doctorat, Constantine, 2007.
- [35] A. Labouret, P. cumunel, J-P. Braun, « Cellules Solaires Les Bases de L'énergie Photovoltaïque », Dunod, Paris 2001.
- [36] A. Borni, L. Zarour , R.Chenni & A. Bouzid «Analysis and Simulation of Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic System Using Fuzzy Logic Controller» Publication International Journal of Electrical Engineering, vol11, Issue 1-7, pp 37-46 2011.
- [37] R.Chenni, M.Makhlouf, T.Kerbache, A.Bouzid «A Detailed Modeling Method for Photovoltaic Cells» Science Direct Solar Energy, Vol 32, Issue 9 pp 1724-1730, September 2007.
- [38] L. Zarour, R. Chenni, A. Borni & A. Bouzid «Improvement of Synchronous and Asynchronous Motor Drive Systems Supplied by Photovoltaic Arrays With Frequency Control». Journal of Electrical Engineering, Vol. 59, Issue 4, pp169-177 2008.
- [39] G. Fontes, C. Turpin, S. Astier, T. A. Meynard, «Interactions Between Fuel Cells and Power Converters: Influence of Current Harmonics on a Fuel Cell Stack »IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.22, Issue.2, pp 670-678, March 2007.
- [40] C. Kunusch , P.F. Puleston, M.A. Mayosky, J. J. Moré «Characterization and Experimental Results in PEM Fuel Cell Electrical Behaviour »International Journal of Hydrogen Energy Vol 35, Issue 11, pp 5876–5881, June 2010.
- [41] D. Rekioua, S. Bensmail, N. Bettar «Development of Hybrid Photovoltaic-Fuel Cell

- System for Stand-Alone Application» *International Journal of Hydrogen Energy* Vol 39, Issue 3, pp 1604–1611, 16 January 2014.
- [42] S. Yeul Park «A Wide Range and Precise Active and Reactive Power Flow Controller for Fuel Cell Power Conditioning Systems» Thesis de Doctoral of the Virginia Polytechnic Institute and State University 2009.
- [43] J.Woo Ahn «Control and Analysis of Air, Water, and Thermal Systems for a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell» Thesis de Doctoral of Auburn University 2011.
- [44] C. Darras «Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène Applications Site Isolé, Micro-Réseau, et Connexion au Réseau Electrique dans le Cadre du Projet PEPITE (ANR PAN-H) » Thèses de Doctorat de L'université de Corse 2011.
- [45] S. G. Tesfahunegn «Fuel Cell Assisted Photovoltaic Power Systems» Thesis de Doctorat, University of Science and Technology Norwegian 2012.
- [46] F. Amrouche , B. Mahmah , M. Belhamel ,H. Benmoussa «Modélisation D'une Pile à Combustible PEMFC Alimentée Directement en Hydrogène-Oxygène et Validation Expérimentale» *Revue des Energies Renouvelables*, Vol 8 N° 2, Décembre 2005 .
- [47] B. Kosko, «Neural Network and Fuzzy Systems: A Dynamical System Approach to Machine Intelligence» Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N J., 1991.
- [48] M. TA CAO «Commande Numérique de Machines Asynchrones par Logique Floue» Thèse de Doctorat, Université Laval Québec 1997.
- [49] C. Dualibe, M. Verleysen, Paul G.A. Jaspers «Design of Analog Fuzzy Logic Controllers in Cmos Technologies Implementation, Test and Application» Kluwer Academic Publishers New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow 2003.
- [50] H. Bühler, «Le Réglage par la Logique Floue», Presses Polytechniques Romandes, 1994.
- [51] M.N. Cirstea, A. Dinu, J.G. Khor, M. McCormick «Neural and Fuzzy Logic Control of Drives and Power Systems» An imprint of Elsevier Science Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 2002.
- [52] S. N. Sivanandam, S. Sumathi and S. N. Deepa «Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB »Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007.
- [53] P. Borne, J. Rozinoer, J. Y. Dieulot, "Introduction à la Commande Floue", Edition Technip, 1998.
- [54] E. H. Mamdani, « Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis » *IEEE Trans. Computer*, Vol. 26, N°.12, pp.1182-1191, December.1977.
- [55] J. M. Mendel, « Fuzzy systems for engineering; A tutorial » *IEEE Proc*, Vol. 83, N°3,pp

- 347-377, March, 1995.
- [56] R.Zhao, Z. Chang, P. Yuan, L. Yang, Z. Li « A Novel Fuzzy Logic and Antiwindup PI Controller for Three-phase Grid Connected Inverter » 2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System, IEEE, Vol 1 pp 442-446,Decembre, 2009.
- [57] M. Rosyadi, S. M. Muyeen, R. Takahashi, J. Tamura «A Design Fuzzy Logic Controller for a Permanent Magnet Wind Generator to Enhance the Dynamic Stability of Wind Farms »applied sciences Vol. 2,Issue 4 pp 780-800, 22 Nov. 2012.
- [58] M. Rosyadi, S. M. Muyeen, R. Takahashi, J. Tamura «Fuzzy-PI Controller Design for PM Wind Generator to Improve Fault Ride Through of Wind Farm» International Journal Renewable Energy Research, Vol.3, No.2,pp 308-314, 2013.
- [69] M. Rebhi, A. Benatillah,M. Sellam, B. Kadri « Comparative Study of MPPT Controllers for PV System Implemented in the South-west of Algeria», TerraGreen 13 International Advancements in Renewable Energy and Clean Environment, Published by Elsevier Vol.36,pp 142-153, 2013.
- [60] M.S. Aït Cheikh, C.Larbes,G.F.Tchoketch Kebir , A. Zerguerras , «Maximum Power Point Tracking Using a Fuzzy Logic Control Scheme »,Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 ,N°3 ,pp 387 – 395, 2007.
- [61] H. L. Hey, J. D. P. Pacheco, J. Imhoff, and R. Gules, «A Maximum Power Point Tracking System With Parallel Connection for PV Stand-Alone Applications», IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, Issue. 7, pp. 2674–2683, Jul. 2008.
- [62] M. Hatti, « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque» JCGE'08 LYON, 16 et 17 Décembre. 2008.
- [63] C.Y.Won, D.H.Kim, S.Chan Kim, W.S. Kim, H.S. Kim «A New Maximum Power Point Tracker of Photovoltaic Arrays, Using Fuzzy Controller», IEEE Power Electronics Specialists Conference Vol.1,pp 396-403,1994.
- [64] Tsai-Fu Wu, C.H. Chang, Y.K. Chen, «A Fuzzy-Logic-Controlled Single-Stage Converter for PV-Powered Lighting System Applications», IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, Issue. 2,pp 287-296, April 2000.
- [65] N. Patcharaprakiti,S. Premrudeepreechacharn,Y. Sriuthaisiriwong «Maximum Power Point Tracking Using Adaptive Fuzzy Logic Control for Grid-Connected Photovoltaic System» Renewable Energy ,Vol.30,Issue 11, pp 1771–1788, 2005.
- [66] V. I. Utkin, «Sliding Modes in Control and Optimization » Springer-Verlllg, Berlin, Heidelberg. Printed in The United States of America 1992.
- [67] V. Utkin, J. Guldner, J. Shi «Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems» Second Edition by Taylor & Francis Group, LLC CRC Press is an Imprint of Taylor & Francis Group, an Informa Business 2009.
- [68] H. Bühler, « Réglage par Mode de Glissement », Presses Polytechniques Romandes, 1994.

- [69] U. BENZ « Réglage par Mode de Glissement Hybride, Applique au Réglage de Position de Systèmes Electromécaniques », Thèse de doctorat Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne 1992.
- [70] B. Beltran «Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : du Mode Glissant Classique au Mode Glissant D'ordre Supérieur», Thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale, 2010.
- [71] B. Karim «Approche Polytopique de la Commande de Systèmes Incertains par Modes Glissants d'Ordre Supérieur : Application aux Robots Flexibles», Thèse doctorat 2010.
- [72] M. C. S. Alaoui, «Commande et Observateur par Modes glissants d'un Système de Pompage et d'un Bras Manipulateur», Thèse de doctorat Université Sidi Mohammed Ben Abdellah 2009.
- [73] M.S. Merzouga, H. Benalla, L. Louze, «Sliding Mode Control (SMC) Of Permanent Magnet Synchronous Generators (PMSG) » Energy Procedia Vol.18, pp 43 – 52, 2012.
- [74] H. D. Battista, R. J. Mantz, C. F. Christiansen «Dynamical Sliding Mode Power Control of Wind Driven Induction Generators», IEEE, Vol. 15, Issue. 4, December 2000.
- [75] A. Merabet, R. Beguenane, J. S. Thongam, I.Hussein «Adaptive Sliding Mode Speed Control for Wind Turbine Systems» ,IEEE, pp2461-2466,2011.
- [76] L. Shang, J. Hu, «Sliding-Mode-Based Direct Power Control of Grid-Connected Wind-Turbine-Driven Doubly Fed Induction Generators Under Unbalanced Grid Voltage Conditions», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 27, Issue. 2, June 2012.
- [77] I.Song Kim, «Robust Maximum Power Point Tracker Using Sliding Mode Controller for the Three-Phase Grid-Connected Photovoltaic System» Solar Energy,Vol.81,Issue 3,pp 405–414, March 2007.
- [78] I.Song Kim, «Sliding Mode Controller for The Single -Phase Grid-Connected Photovoltaic System», Applied Energy Vol83, Issue 10, pp1101–1115, 2006.
- [79] M. Zhang,J. Wu, H. Zhao, «The Application of slide technology in PV Maximum Power Point tracking System», Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation, June 15-19, Hangzhou, PR. China IEEE, Vol.6,pp 5591-5594, 2004.
- [80] F.Valenciaga, P.F.Puleston, P.E.Battaiotto , R.J.Mantz,«Passivity/sliding mode control of a stand-alone hybrid generation system » IEEE Proc.-Control Theory Appl..Vol. 147, Issue.6,pp 680-686, November 2000.
- [81] F.Valenciaga, P.F.Puleston ,P.E.Battaiotto ,«Power Control of a Photovoltaic Array in a Hybrid Electric Generation System Using Sliding Mode Techniques », IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 148, Issue. 6, pp 448-455, November 2001.

Référence

- [82] F. Valenciaga, P. F. Puleston, P. E. Battaiotto «Power Control of a Solar/Wind Generation System Without Wind Measurement: A Passivity/Sliding Mode Approach», IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18, Issue. 4, pp 501-507, December 2003.

- [83] M.W. Naouar, B. Ben Hania, I. S.Belkhodja, E. Monmasson , A.A. Naassani, «FPGA-based sliding mode direct control of single phase PWM boost rectifier» Mathematics and Computers in Simulation Vol.91,pp 249–261,2013.

Annexe

Paramètres du Module Photovoltaïque MSX60 (G=1000W/m², T=25°C)

L. Zarour, R. Chenni, A. Borni & A. Bouzid «Improvement of Synchronous and Asynchronous Motor Drive Systems Supplied by Photovoltaic Arrays With Frequency Control».Journal of Electrical Engineering, Vol. 59, Issue 4, pp169-177 2008.

Puissance nominale		60 W
Courant de court circuit	I_{SC}	3.7 A
Courant optimal	I_{OP}	3.5 A
Tension de circuit ouvert	V_{OC}	22.5 V
Tension optimal	V_{OP}	18 V
Résistance série	R_S	0.08 Ω
nombre de cellule solaire	N_S	36
puissance optimale	P_{OP}	60 W

Les paramètres du génératrice à aiment permanent et la Turbine

Valenciaga and P. F. Puleston « High-Order Sliding Control for a Wind Energy Conversion System Based on a Permanent Magnet Synchronous Generator »IEEE, Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, Issue 3, pp 860-867, September 2008.

Puissance nominale		5.Kw
Flux nominale	ψ	0.2867 V.s
La résistance statorique de phase	R	0.3676 Ω
L'inductance statorique de phase	L	0.00355 H
Nombre de pôle	P	28
Moment d'inertiel (Machine +Turbine)		7.856 Kg m ²
Rayon de turbine	r	1.84 m
λ_{opt}		7.35
C_{Popl}		0.44
K_{opt}		$2.117.10^{-4}$ Nms ²

Les paramètres de la batterie

F.Valenciaga, P.F.Puleston, P.E.Battaiotto , R.J.Mantz, «Passivity/sliding mode control of a stand-alone hybrid generation system » IEEE Proc.-Control Theory Appl, Vol. 147, Issue.6, pp 680-686, November 2000.

La tension de batterie	E_b	48V
La résistance de batterie	R_b	14m Ω
La Capacité de batterie	C_b	180 000 F

Les paramètres de la pile à combustible 500W BCS

G. Esmaili «Application of Advanced Power Electronics in Renewable Energy Sources and Hybrid Generating Systems» These de Doctorat, School of The Ohio State University 2006.

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
n	32	ξ_1	-0.984
T	333 K°	ξ_2	$0.00286+0.0002*\ln A+4.3*10^{-5}*\ln C_{H2}$
A	64 cm ²	ξ_3	$7.6 *10^{-5}$
l	178 μ m	ξ_4	$-1.93 *10^{-4}$
P_{H2}	1 atm	Ψ	23
P_{O2}	0.2095 atm	J_{max}	469 mA/cm ²
B	0.016 V	J_n	3 mA/cm ²
R_C	0.0003 Ω	I_{max}	30 A

Calcul de la tension de bus continu

Pour déterminer la valeur de la tension de bus continu nécessaire pour transiter une puissance donnée, on utilise un schéma équivalent monophasé simple de la liaison entre le bus continu, l'onduleur et le réseau (en négligeant la résistance du filtre d'entrée). Pour cela, l'onduleur et le réseau sont considérés comme des sources de tension monophasées (figure 1).

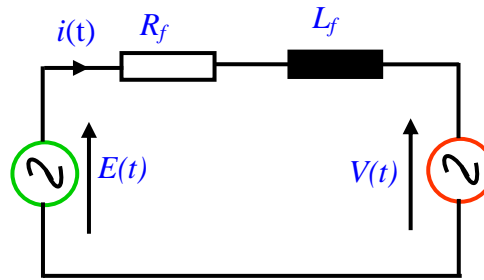


Figure. 1. Schéma monophasé simplifié de la liaison réseau

E : est la valeur efficace du fondamental de la tension modulée par l'onduleur, V est la valeur efficace de la tension simple à l'entrée du transformateur.

$X = L_f \cdot \omega$: est l'impédance monophasée de la self de lissage. On a représenté sur la figure.2 le diagramme vectoriel correspondant.

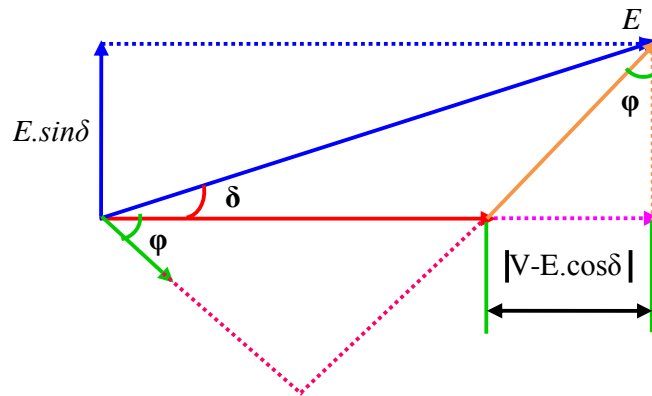


Figure. 2. Diagramme vectoriel des grandeurs électriques en valeur crête

On peut donc exprimer, les puissances actives et réactives consommées de la côte de l'onduleur et au primaire du transformateur, en triphasé. La puissance réactive envoyée sur le réseau (au primaire du transformateur), on a :

$$Q = 3.V.I \sin \varphi \quad (1)$$

Cette quantité peut être écrite en fonction du déphasage entre V et E : δ . On considère la projection du vecteur XI sur l'axe porte par V : $X.I. \sin \varphi$. Ce dernier est équivalent à la quantité $V - E. \cos \delta$ d'où

$$Q = \frac{3.V.(V - E.\cos \delta)}{X} \quad (2)$$

La puissance active s'exprime par :

$$P = 3.V.I.\cos\varphi \quad (3)$$

Où, la projection de XI sur l'axe perpendiculaire à celui porte par V : $XI.\cos\varphi$, s'écrit aussi sous la forme $E.\sin\delta$. D'où :

$$P = \frac{3.V.E.\cos\delta}{X} \quad (4)$$

On définit le paramètre r , appelé taux de modulation, qui permet de caractériser la valeur efficace du fondamental de la tension modulée par l'onduleur :

$$E = \frac{r.V_{bus}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

Pour dimensionner la tension du bus continu V_{bus} , on introduit le paramètre α

$$V_{bus} = \sqrt{2}.\alpha.V \quad (6)$$

De (5) et (6) on déduit

$$E = r.\alpha.V \quad (7)$$

Les puissances sont alors exprimées en fonction de ce paramètre selon :

$$Q = \frac{3.V^2.(1 - r.\alpha.\cos\delta)}{X} \quad (8)$$

$$P = \frac{3.V^2.r.\alpha.\sin\delta}{X} \quad (9)$$

Ou, pour un fonctionnement souhaité à puissance réactive nulle (qui est le cas souhaité dans notre étude), on obtient à partir de $Q = 0$ dans l'équation (8) :

$$r.\alpha.\cos\delta = 1 \quad (10)$$

Autrement dit, à partir de (9) :

$$P = \frac{3.V^2.\sqrt{r^2.\alpha^2 - 1}}{X} \quad (11)$$

Afin de transférer le maximum de puissance sur le réseau, le taux de modulation est unitaire. Donc, la relation (11) devient :

$$r = 1 \Rightarrow |P| = \frac{3.V^2.\sqrt{\alpha^2 - 1}}{X} \quad (12)$$

Connaissant la puissance maximale fournie par notre système hybride, on peut déterminer le paramètre α . A partir de ce paramètre et de la valeur efficace des tensions du réseau, on fixe la valeur de la tension du bus continu correspondante en utilisant l'équation (6).

La puissance maximale $P_{max} = 20kW$ est considérée pour une valeur de la tension simple efficace du réseau de $E = 230V$. L'impédance de la self de lissage de $5mH$. Dans ce cas, l'équation 12 donne :

$$\alpha^2 = \frac{P \cdot X^2}{9 \cdot V^4} + 1 \quad \text{Ou} \quad \alpha = \sqrt{\frac{P \cdot X^2}{9 \cdot V^4} + 1}$$

Calcul d'un régulateurs PI avec compensation

Pour réguler les commandes du système hybride des grandeurs physique (couples, courants, Vitesse, Tension.....) on choisie un correcteurs PI basée sur la compensation de la constante de temps. Ces grandeurs ont la même fonction de transfert pour les systèmes physique, donc la régulation se faire de la même manière.

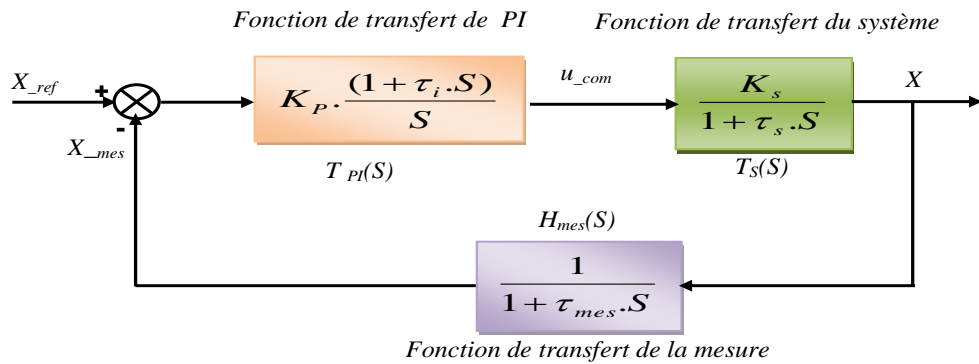


Figure. 3. Boucle de régulation des grandeurs physique.

$T_{PI}(s)$: Fonction de transfert du correcteur PI.

τ_i : Constante de temps du correcteur PI.

K_{PI} : Gain du correcteur PI.

$T_S(s)$: Fonction de transfert du correcteur PI.

τ_s : Constante de temps du système.

K_s : Coefficient du système.

$H_{mes}(s)$: Fonction de transfert de la mesure.

τ_{mes} : Constante de temps de la mesure.

La fonction de transfert $T(s)$ en boucle ouverte s'écrit :

$$T(s) = T_{PI}(s) \cdot T_S(s) \quad (13)$$

Annexe

$$T(s) = \frac{(1 + \tau_i \cdot S)}{S} \cdot \frac{K_s}{(1 + \tau_s \cdot S)} \quad (14)$$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$F(s) = \frac{T(s)}{1 + T(s) \cdot H_{mes}(s)} = \frac{T_{PI}(s) \cdot T_S(s)}{1 + T_{PI}(s) \cdot T_S(s) \cdot H_{mes}(s)} \quad (15)$$

On considère que la mesure des grandeurs est parfaite et sans retard (fonction de transfert égale à 1 pour la fonction de transfert de la mesure). On obtient donc :

$$F(s) = \frac{T(s)}{1 + T(s)} = \frac{T_{PI}(s) \cdot T_S(s)}{1 + T_{PI}(s) \cdot T_S(s)} \quad (16)$$

$\tau_i = \tau_s$, Pour la compensation de la fonction de transfert du système $T(s)$

$$T(s) = K_P \frac{(1 + \tau_i \cdot S)}{S} \cdot \frac{K_s}{(1 + \tau_s \cdot S)} = \frac{K_P \cdot K_s}{S} \quad (17)$$

On calcul alors la fonction de transfert en boucle fermée $F(s)$:

$$F(s) = \frac{T(s)}{1 + T(s)} = \frac{1}{1 + \frac{S}{K_P \cdot K_s}} = \frac{1}{1 + \tau_n \cdot S} \quad (18)$$

$$\tau_n = \frac{1}{K_P \cdot K_s}$$

Pour un système du premier ordre, le temps de réponse à 5% de la valeur finale est égal à trois fois la constante de temps, d'où :

$$t_r = 3 \cdot \tau_n$$

Ou

$$\tau_i = \tau_s$$

Alors

$$K_P = \frac{3}{K_s \cdot t_r}$$

RÉSUMÉ

Cette thèse traite de l'application des systèmes de production hybrides connectés au réseau électrique qui se composent d'une turbine d'éolienne, une source photovoltaïque et une unité de piles à combustible destinée pour la continuité d'énergie. Un contrôle simple et économique avec convertisseur DC-DC est utilisé pour l'extraction de la puissance maximum de l'éolien et du photovoltaïque. En raison de l'intermittence de ces deux sources d'énergie, la nature de l'éolienne et du photovoltaïque, une unité de piles à combustible est ajoutée au système dans le but d'assurer une continuité de courant continu. La pile à combustible est ainsi contrôlée pour fournir la puissance de déficit quand le vent combiné aux sources photovoltaïques ne peuvent pas répondre à la demande de la puissance demandée. Une description complète de ce système est présentée avec ses résultats de simulation qui attestent de sa faisabilité. Un algorithme de suivi de la puissance maximale calcule la vitesse de référence, qui est correspondante à la puissance maximale de sortie de la turbine, en tant que signal de commande pour le convertisseur continu-continu. L'optimisation de notre système présente le réglage par le contrôleur PI, la logique flou (RLF), logique floue PI (RLF-PI) et le mode glissant, qui permet de maximiser le point de puissance maximale (MPP) d'un système photovoltaïque, le contrôle de la vitesse du système éolien et le contrôle de la puissance active et réactive du réseau.

ABSTRACT

This thesis deals with the application of hybrid output connected to the grid which are composed of a wind turbine, a photovoltaic source, and a unit for a fuel cell for energy continuity. A simple and cost control with DC-DC converter is used to extract the maximum power from wind and photovoltaic sources. Due to the intermittent of these two energy sources, the nature of photovoltaic and wind, a fuel cell unit is added to the system in order to ensure a flow of direct current. The fuel cell is thus controlled to provide power deficit when combined wind and solar sources cannot meet the demand of the net power. A complete description of this system is presented with simulation results that demonstrate its feasibility. A tracking algorithm of the maximum power calculates the reference speed, which is corresponding to the maximum power output of the turbine, as a control signal for the DC-DC converter. The optimization of our system in this setting by PI, fuzzy logic (RLF), fuzzy PI (RLF-PI) and sliding mode that maximizes the maximum power point (MPP) of a photovoltaic system, the speed control system wind and control the active and reactive power of the grid.

المخلص

تتناول هذه الأطروحة نظام تطبيق الطاقة الهجين المتصل بالشبكة. حيث يتكون هذا النظام من توربينات الرياح، مصدر للطاقة الشمسية، ووحدة خلايا الوقود لتزويد الحمل بشكل مستمر. نستخدم التحكم البسيط وقليل التكلفة بواسطة مطبر لاستخراج الطاقة القصوى من توربينات الرياح والألواح الشمسية. الطاقة غير مستمرة (متقطعة) بالنسبة للمصدرين السابقين بسبب تغير الرياح و الشمس، نضيف وحدة خلايا الوقود إلى النظام السابق (الطاقة الشمسية وطاقة الرياح) لضمان التدفق الثابت للطاقة أي استمرار تدفق التيار من خلال خلايا الوقود نعوض العجز في الطاقة الكهربائية عندما تكون طاقة الرياح والطاقة الشمسية مجتمعة غير قادرة على تلبية الطلب على الطاقة المطلوبة وزيادة على ذلك وصف كامل لهذا النظام مع نتائج المحاكاة و خوارزمية تتبع أقصى قدر التي تثبت فعاليتها. وفي الأخير ركزنا على الاستفادة المثلى من نظامنا في هذا الإعداد المنطق الضبابي (RLF) والمنطق الضبابي الهجين (RLF-PI) وضع الانزلاق (RMG) للبحث على نقطة الطاقة القصوى (MPP) من وحدة النظام الشمسي، و تعديل نظام التحكم سرعة توربينات الرياح والتحكم في الاستطاعة الفعالة وغير الفعالة الصادرة للشبكة الكهربائية.