

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTÈRE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électrotechnique

Spécialité: Commandes Électriques

THÈME:

*Production d'électricité au moyen
d'une chaine hybride (éolienne +PV)*

Préparés par : TOUHAMI Ahmed et LARBI ILYES Ayoub
Devant le Jury:

Noms et prénoms	Grade	Qualité
Y.MESLEM	Pr	President
A.TAHRI	MCB	Examineur
S.KOUADRIA	MCB	Examineur
S.ZINE	MCB	Encadrante

PROMOTION 2022 /2023

On remercie ALLAh tout puissant pour nous avoir donné la patience et la force d'accomplir ce modeste travail.

On tient à remercier toutes les personnes qui ont contribué de façon directe ou indirecte à l'aboutissement de ce travail, particulièrement notre encadreur Madame **Zine Souhila**, pour sa qualité humaine et sa compétence professionnelle et son soutien moral.

Nos remerciements vont également aux membres du jury, pour avoir accepté d'examiner le présent travail.

On remercie aussi l'ensemble des enseignants du département de génie électrique de l'université de Tiaret pour leur soutien et leur aide précieuse.

Sans oublier toute notre famille et nos amis pour leurs encouragements, leur soutien moral et leur dévouement

Table des matières

Introduction générale.....	2
Chapitre I : Modélisation et commande du système Photovoltaïque	
I.1 introduction.....	7
I.2 . Principe de la conversion photovoltaïque.....	7
I.3 Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque.....	8
I.3.1 Modèle électrique de la cellule photovoltaïque.....	8
I.3.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.3.2.1 Courant de court-circuit (I_{cc}) :	9
I.3.2.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co})	9
I.3.2.3 Puissance de la cellule PV.....	9
I.3.2.4. Puissance maximale d'une cellule PV(P_{max}).....	9
I.3.2.5 Rendement énergétique.....	10
I.3.2.6 Facteur de forme.....	10
I.3.3 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque.....	10
I.3.4.Parametres de simulation.....	12
I.4. Resultats et l'analyse de la simumlation.....	12
I.4.1 L'Influence de la variation des conditions météorologiques sur les caractéristiques de PV.13	
a- L'influence de la température :.....	13
b- L'influence de de l'éclairement.....	14
I.5.Commande MPPT.....	15
I.5.1. Organigramme Perturber et Observer (P&O).....	16
I.6 Modélisation du convertisseur statique DC/DC.....	17
I.6.1 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs).....	17
I.6.2.Hacheur élévateur (Boost).....	17
I.7.Résultats de simulation et interprétation.....	19
I.7.1.interprétation des résultats:.....	25
I.8.conclusion.....	25
I.9 références bibliographiques.....	25
Chapitre II : Modélisation et commande du système turbine et génératrice synchrone à aimant permanent	
II.1 Introduction.....	28
II.2 Les principaux composants d'une éolienne.....	28
II.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	29

Table des matières

II.4 Les éoliennes à vitesse variable.....	29
II.4.1 Modélisation de la turbine.....	29
II.4.2 Modélisation du vent.....	30
II.4.3 Bilan des forces sur une pale.....	30
II.4.4 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine.....	31
II.4.5 Loi de Betz.....	32
II.4.6 Calcul du coefficient de puissance.....	33
II.4.7 Calcul de la vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio).....	34
II.4.8 Modèle du multiplicateur.....	34
II.4.9 Équation dynamique de l'arbre.....	35
II.4.10 Résultats de simulation en boucle ouverte.....	36
II.5 Stratégie de commande de la turbine.....	38
II.5.1 Maximisation de la puissance extraite dans la zone 2.....	39
II.5.2. Techniques d'extraction du maximum de la puissance.....	39
II.5.2.1 Bilan des puissances.....	39
II.5.2.2 Maximisation de puissance avec asservissement de la vitesse.....	40
II.5.2.3. Conception de correcteur de vitesse par PI classique.....	40
II.5.3 Résultats de simulation.....	42
II.6 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	44
II.6.1 Introduction.....	44
II.6.2 Description de la machine.....	44
II.6.3 Principe de fonctionnement de la GSAP.....	44
II.6.4 Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	44
II.6.5 Équations de la GSAP dans le repère abc :.....	45
II.6.6 Modèle de la machine synchrone dans le repère de PARK.....	45
II.6.6.1 Equations magnétiques.....	46
II.6.6.2 Équation du couple électromagnétique.....	47
II.6.6.3 Equations mécaniques.....	47
II.7 Commande vectorielle de la Génératrice Synchrone à aimants permanents.....	48
II.7.1. Principe de la commande vectorielle.....	48
II.7.2 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle.....	49
II.7.3 Conception du correcteur de courants par un PI classique.....	49
II.7.3.1 Synthèse du régulateur de courant Isd.....	50

Table des matières

II.7.3.2 Synthèse du régulateur de courant Isq.....	51
II.8 Simulation de la cascade (Turbine, Génératrice synchrone à aimants permanents).....	51
II.8 .1.Interprétation des résultats.....	54
II.9 Conclusion.....	54
II.10 références bibliographiques.....	55
Chapitre III Raccordement de la chaine hybride au Réseau.....	57
III.1 Introduction.....	58
III.2. Description de système hybride.....	58
iii.2.1 Modelisation De Convertisseur MLI1 :.....	58
III.2.2.Commande en tension par MLI sinus-triangle.....	60
III.2.3. Modélisation de bus continu.....	61
III.2.4 Régulation de bus continue.....	61
iii.2.5 Modelisation De Convertisseur MLI2.....	62
III.2.6Modélisation du filtre.....	63
III.6.1 Contrôle des courants envoyés au réseau.....	64
III.6.1.1 Régulation des courants.....	64
III.7. Résultats de simulation de la chaine globale.....	66
III.7. 1.Interprétation des résultats de simulation.....	70
III.8 Conclusion.....	70
Conclusion générale.....	70

Listes des tableaux et figures

Figure I.1 : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium (présence d'une jonction PN).	7
Figure I.2 : Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.	8
Figure I.3 : Modèle du circuit équivalent d'un cellule PV	10
Figure I.4 : Schéma bloc de calcul du courant maximal	11
Figure I.5 : Schéma bloc du calcul de I_0	11
Figure I.6 : Schéma bloc du calcul de I_{pv}	11
Figure I.7 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink.	11
Figure I.8 : Caractéristique $I=f(V)$ du module photovoltaïque.	12
Figure I.9 : Caractéristique $P=f(V)$ du module photovoltaïque.	13
Figure I.10 : Caractéristique $P(V)$ et $I(V)$ pour différentes valeurs Temperature (T)	14
Figure I.11 : Caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes valeurs de G	14
Figure I.12 : La chaîne de conversion photovoltaïque	15
Figure I.13 : Caractéristique P_{pv} et V_{pv} et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation	16
Figure I.14 : organigramme de la méthode P&O	16
Figure I.15 : schéma block de la technique PO	17
Figure I.16 : circuit électrique d'un hacheur boost.	17
Figure I.17 : Schémas équivalents du hacheur survolteur K fermé.	18
Figure I.18 : Schémas équivalents du hacheur survolteur K ouvert.	18
Figure I.19 : Schéma de simulation d'un hacheur boost	19
Figure I.20 : Allure de la puissance photovoltaïque P_{pv} .	20
Figure I.21 : Allure de la tension photovoltaïque V_{pv} .	20
Figure I.22 : Allure de le courant photovoltaïque i_{pv} .	21
Figure I.23 : Allure de l' irradiation (1000w/m ² ,500w/m ² ,250w/m ²)	21
Figure I.24 : Allure de la puissance de sortie de convertisseur boost P_s	22
Figure I.25 : Allure de la tension de sortie de convertisseur boost V_s .	22
Figure I.26 : Allure de le courant de sortie de convertisseur boost i_s .	23
Figure I.27 : Allure de Temperature (40°,25°,10°)	23
Figure I.28 : Allure de la puissance de sortie de convertisseur boost P_s	24
Figure I.29 : Allure de la tension de sortie de convertisseur boost V_s .	24
Figure I.30 : Allure de le courant de sortie de convertisseur boost i_s .	24
Figure II.1 : Les composantes d'une éolienne	28
Figure II.2 : Schéma de conversion de l'énergie éolienne	29
Figure II.3 : Eléments du système mécanique complets	30
Figure II.4 : Bilan des forces sur une pale	31
Figure II.5 : Représentation du système mécanique de l'éolienne	31
Figure II.6 : Canal de courant d'air autour d'une éolienne	32

Listes des tableaux et figures

Figure II.7 : Schéma du C_p en fonction de la vitesse spécifique .....	.34
Figure II.8 : Représentation de la vitesse spécifique .....	.34
Figure II.9 : Schéma bloc de la turbine .....	.35
Figure II.10 : Allure de la vitesse du vent .....	.36
Figure II.11 : Allure de la vitesse de rotation .....	.36
Figure II.12 : Allure du coefficient de puissance .....	.37
Figure II.13 : Allure de la vitesse spécifique .....	.37
Figure II.14 : Caractéristiques puissance et vitesse éolienne .....	.38
Figure II.15 : Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse .....	.42
Figure II.16 : Profil du vent .....	.42
Figure II.17 : Vitesse de rotation .....	.43
Figure II.18 : Coefficient de puissance et la vitesse spécifique .....	.43
Figure II.19 : Représentation de la GSAP dans le repère triphasés .....	.45
Figure II.20 : Passage du repère triphasés à repère de park .....	.46
Figure II.21 : Schéma bloc du découplage .....	.49
Figure II.22 : Profil du vent .....	.51
Figure II.23 : Coefficient de puissance et la vitesse spécifique .....	.51
Figure II.24 : Vitesse de rotation .....	.52
Figure II.25 : Courants direct et quadrature .....	.52
Figure II.26 : Tensions triphasées V_{abc} .....	.53
Figure III.1 : Classification des systèmes hybrides .....	.57
Figure III.2 : Schéma du redresseur .....	.59
Figure III.3 : Schéma du redresseur .....	.60
Figure III.4 : Boucle de la régulation du bus continu .....	.61
Figure III.5 : Boucle de la régulation du bus continu .....	.62
Figure III.6 : Schéma d'un filtre .....	.62
Figure III.7 : schéma bloc du découplage .....	.64
Figure III.8 : schéma bloc de la chaîne globale raccordée au réseau .....	.65
Figure III.9 : Allure de la vitesse de rotation (rad/s) .....	.65
Figure III.10 : Allure du couple électromagnétique (N.m) .....	.66
Figure III.11 : Allure des courants quadrature .....	.66
Figure III.12 : Allure du courant direct (A) .....	.66
Figure III.13 : Allure de tension du bus continue (V) .....	.67
Figure III.14 : Allure des tensions triphasés (V) .....	.67
Figure III.15 : Allure des courants triphasés (A) .....	.67
Figure III.16 : Allure des puissances active et, réactive du réseau .....	.68

Listes des tableaux et figures

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques électrique du module photovoltaïque du panneau KC200GT dans les conditions standards « CST »	12
Tableau II.1 : Fonctionnement de la MPPT	39
Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de la commande vectorielle	48

Abréviations

I-V :	Caractéristique courant tension.
P-V	Caractéristique Puissance tension.
V	Tension aux bornes d'un générateur photovoltaïque.
I :	Courant délivré par générateur photovoltaïque.
P	Puissance délivré par générateur photovoltaïque.
V _{OC}	Tension circuit ouvert.
I _{cc}	Courant circuit ouvert.
V _{max} :	Tension correspondante à la puissance maximale.
I _{max} :	Courant correspondante à la puissance maximale.
P _{max} :	Puissance optimale.
N _s :	Nombre de cellules en série.
N _p :	Nombre de cellules en parallèle.
N _{ss} :	Nombre de Module en série.
N _{pp} :	Nombre de Module en parallèle.
G :	Eclairement ou Irradiation solaire
G _{ref}	L'irradiation de référence
T	Température.
T _n	Température de référence
P	Charge positive.
N	Charge négative.
I ₀	Courant de saturation de la jonction.
I _{rs}	Courant de saturation inverse de la jonction.
q	Charge de l'électron.
K	Constante de Boltzmann.
P-N :	Jonction positive-négative dans un semi-conducteur.

Abréviations

I_{ph} :	Courant généré par les photons.
k_i :	Coefficient de température de courant de court-circuit
R_s :	Résistance série.
R_{sh} :	Résistance parallèle (shunt).
DC:	Courant continue.
DC-DC :	Conversion continue-continue (Hacheur).
a	Rapport cyclique.
λ	Longueur d'onde [m].
C	Capacité du condensateur (F)
I_c	courant de condensateur
I_{hyb}	courant hybride
I_{ccr} :	courant cote reseaux
m_0 :	Masse d'air traversant l'hélice par seconde ;
ρ	Densité de l'air ;
s :	Surface balayée par les pales de l'éolienne ;
V_1	Vitesse du vent en amont ;
V_2 :	Vitesse du vent en aval ;
P_m :	La puissance extraite ;
P_{mt}	: Puissance totale ;
$P_{aér}$	Puissance capturé par l'éolienne
C_p	Coefficient de puissance ;
λ	vitesse spécifique ;
β	Pitch angle ;
R_t	Le rayon des pales de la turbine ;
Ω_t	La vitesse de la turbine ;

Abréviations

C_g	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;
C_{aer} ;	Couple aérodynamique ;
G	Gain du multiplicateur ;
$\Omega_{turbine}$;	Vitesse de rotation du générateur (avant le multiplicateur) ;
Ω_{mec}	Vitesse de rotation du générateur (après le multiplicateur) ;
J	Moment d'inertie total sur l'arbre ;
$J_{turbine}$;	Moment d'inertie de la turbine ;
J_g ;	Moment d'inertie de la génératrice ;
C_{mec}	Couple mécanique total ;
C_{em}	Couple électromagnétique du générateur ;
C_g	Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;
C_{vis} ;	Couple des frottements visqueux ;
f ;	Le coefficient de frottement visqueux ;
Ω	Vitesse de rotation du rotor ;
ω	Vitesse de rotation de la génératrice ;
P	Nombre de pair de pole ;
R_s	Résistance statorique ;
V_{sd_q}	Les composantes de la tension statorique dans le repère d-q ;
i_{sd-q}	Courants statorique instantanée dans l'axe d et q ;
$L_{d,q}$	Inductances de la génératrice ;
C_r	Couple résistant ;
Φ_f	flux ;
i_{Nd_q}	Courants de réseau instantané dans l'axe d et q ;

Abréviations

idc	Courant du bus continu ;
Rn	Résistance du filtre ;
Vdc	Tension du bus continu ;
VNd_q	tensions de réseau instantanée dans l'axe d et q ;
LN	Inductance du filtre ;
ω_n	pulsation ;
Pg	Puissance active ;
Qg	Puissance réactive ;
C	Capacité du bus continu ;
ΔV_d et ΔV_q	termes de compensation ;
GPV	Générateur photovoltaïque.
PV	Photovoltaïque.
PPM	Point de puissance maximal.
MPPT.	Maximum Power Point Tracking.
P&O	Perturbation et observation.
DC	Courant Continu
MSAP	Machine synchrone à aimant permanent ;
GSAP	Génératrice synchrone à aimant permanent ;
MPPT;	Maximum Power Point Tracking ;
FMM	Force magnéto motrice ;

Introduction générale

Introduction Générale

La croissance de l'industrie a conduit à une augmentation caractéristique de la consommation mondiale d'électricité au cours des dernières décennies. Toute fois une grande partie de cette production électrique repose sur des ressources non renouvelables telles que le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium, qui représentent une régénération extrêmement lente à l'échelle humaine, ce qui pose un risque réel d'épuisement à plus ou moins court terme.

Les énergies renouvelables sont des moyens de production d'énergie qui exploitent des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. Il existe plusieurs sources d'énergie renouvelable comme l'eau, le vent et le soleil .., actuellement exploitées et étudiées, dans le but de développer des techniques d'extraction de puissance afin d'améliorer la fiabilité, de réduire les coûts (de fabrication, d'utilisation et de recyclage) et d'augmenter l'efficacité énergétique[1], Ces énergies renouvelables sont caractérisées par leur faible ou nulle pollution.

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable qui provient de la lumière et de la chaleur du soleil. Elle est considérée comme l'une des sources d'énergie les plus abondantes et les plus durables disponibles sur Terre. L'énergie solaire peut être captée et convertie en différentes formes d'énergie utilisables, telles que l'électricité et la chaleur.

La principale technologie utilisée pour exploiter l'énergie solaire est les cellules solaires photovoltaïques, qui sont composées de matériaux semi-conducteurs qui absorbent la lumière du soleil et la convertissent directement en électricité, qui peut être utilisé pour alimenter des appareils électriques ou être stocké dans des batteries pour une utilisation ultérieure.

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque présentent de nombreux avantages tels que L'entretien réduit, l'inexistence de bruit, et de pollution, etc., ce qui le rend de plus en plus important. Pour maximiser la production d'énergie d'un système photovoltaïque, il est nécessaire de maximiser l'utilisation des générateurs photovoltaïques. Les systèmes photovoltaïques nécessitent une technologie de suivi du point de puissance maximale (MPP) pour fonctionner correctement. Au cours de la dernière décennie, de nombreuses recherches ont été menées pour développer différentes méthodes MPPT afin d'atteindre une efficacité maximale dans la production d'énergie photovoltaïque. [2].

Parmi les autres énergies renouvelables, l'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la force du vent pour produire de l'électricité. Elle exploite la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui est ensuite transformée en électricité à l'aide d'un générateur.

L'énergie éolienne est devenue la plus concurrentielle, par de nombreux avantages tel que l'impact positif sur l'environnement, le développement économique, la propagation rapide, l'innovation technologique et l'abondance des nouvelles méthodologies de contrôle, en plus de ça elle est gratuite. Cependant, plusieurs problèmes ont été rencontrés, liés d'une part à la complexité des systèmes de conversion éolienne ; à savoir, la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et d'une autre part l'instabilité de la vitesse du vent [3], [4].

Au début, les éoliennes avaient une durée de vie longue et étaient capables de s'adapter à des vitesses variables, même lorsque la variation du vent était importante. De ce fait, des fluctuations de tension et de puissance du réseau ont été générées. Pour dépasser cette limitation et améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, beaucoup de chercheurs ont eu recours à des structures éoliennes à vitesse variable, qui ont rendu ses systèmes de conversion plus attractifs. Ceci permet l'extraction de l'énergie optimale pour différentes vitesses du vent, la réduction des contraintes mécaniques par élimination du multiplicateur, ce qui améliore la fiabilité du système, et la réduction des frais d'entretien.[3], [5].

Les dernières générations d'éoliennes fonctionnant à vitesse variable utilisent des générateurs à double induction (MADA) ou à aimants permanents (GSAP) [6], [7].

Les générateurs à double alimentation présentent de bonnes performances dynamiques et une forte robustesse. Cependant, l'entretien de la boîte de vitesses, le prix de l'électronique de puissance, et la complexité de leur contrôle sont des inconvénients majeurs. Les systèmes de conversion d'énergie utilisent des générateurs synchrones à aimants permanents comme solution alternative [2], [8]. Ils sont caractérisés par un couple volumique élevé, une inertie très faible, et de faibles inductances [8]. Ceci leur offre de grandes performances, un rendement important, et une meilleure contrôlabilité; et fait d'elle un vrai concurrent de la génératrice asynchrone [5].

Comme les systèmes de conversion éolienne sont à vitesses variables, leur puissance disponible dépend essentiellement de la vitesse du vent. Pour en tirer profit au maximum, il existe un point de fonctionnement optimal qui est ajusté en agissant sur la vitesse transmise à l'arbre ainsi que le couple électromagnétique. Dans le but d'extraire le maximum de puissance, la commande d'extraction du maximum de puissance (MPPT) est appliquée au niveau de la turbine et la commande vectorielle au niveau de la génératrice, ceci permet d'avoir de bonnes performances dynamiques, et assure un couple même en basses vitesses.

Dans le but d'optimiser la production d'électricité en exploitant les avantages des deux sources d'énergie renouvelable, on utilise une chaîne hybride photovoltaïque éolienne, Cette configuration permettrait de maximiser l'utilisation de l'espace disponible en captant à la fois l'énergie solaire et l'énergie éolienne pour une production d'électricité plus constante et opérante. Après avoir transformé l'énergie éolienne et solaire en énergie électrique, il est nécessaire de l'adapter au réseau au quel est connecté notre système, car ce systèmes n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règlent pas le rapport puissance fréquence, et donc perturbent d'autant plus la stabilité du réseau que leur taux de pénétration est important. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies de commandes sont apparues pour optimiser cette nouvelle génération d'énergie. [9]

Structure de la thèse

Dans le premier chapitre une modélisation du panneau photovoltaïque est présentée, des essais sont effectués pour montrer les effets des changements de température et d'irradiation. En suite le modèle du

convertisseur Boost est détaillé. Des résultats de simulation sont également présentés pour vérifier le fonctionnement du système. Par la suite le principe de l'algorithme de suivi du point de puissance maximale MPPT, à savoir l'algorithme perturbation et observation (P&O) est étudié.

Le second chapitre est dédié à l'étude et à la modélisation du système regroupant la turbine et la génératrice synchrone à aimants permanents. Après énumération des hypothèses simplificatrices, un modèle simulink est établi dans le but de vérifier le fonctionnement.

La commande de vitesse et de courant de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents fait l'objet de ce chapitre. On commence par l'application de la MPPT munie d'un PI pour la turbine et la commande vectorielle pour la génératrice synchrone à aimants permanents. Les résultats de simulation sont analysés dans un but de montrer l'efficacité des commandes appliquées et les améliorations apportées.

Dans le dernier chapitre. La modélisation des deux convertisseurs et du bus continu, est établie. Les résultats de simulation de la chaîne complète sont présentés pour mettre en évidence la validité des stratégies choisies.

Références bibliographiques

Reference bibliographie

[1] A. Bouscayrol, Ph. Delarue, X. Guillaud, « Power strategies for maximum control structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine », *Renewable Energy* 30 (2005) 2273–2288.

[2] H. Wang, M. Liserre, and F. Blaabjerg, “Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities,” *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 17–26, Jun. 2013.

[3] R. Said, M. I. Bhatti, et A. I. Hunjra, « Toward Understanding Renewable Energy and Sustainable Development in Developing and Developed Economies: A Review », *Energies*, vol. 15, no 15, Art. no 15, janv. 2022, doi: 10.3390/en15155349.

[4] B. Soltane, « Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », *Electrical engineering thesis*, Constantine University, constantine, Algeria, 2010.

[5] C.-W. Su, K. Khan, M. Umar, et W. Zhang, « Does renewable energy redefine geopolitical risks? », *Energy Policy*, vol. 158, p. 112566, nov. 2021, doi: 10.1016/j.enpol.2021.112566.

[6] Kerrouche, K., Mezouar, A., Boumediene, L., Belgacem, K., «Modeling and Optimum Power Control Based DFIG Wind Energy Conversion System», (2014) *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, 9(1), pp. 174-185.

[7]K. Rama Lingeswara Prasad, K. Chandra Sekhar, «Variable Structure Controller for Generator Side Converter of Variable Speed PMSG Wind Energy Conversion System»,*International Journal of Computer Applications*, Vol.67(Issue.18),pp. 28-33, April 2013

[8]B. N. Mobarkah, « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à

aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification „en ligne“ des paramètres », thèse de doctorat de l'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001

[9]S.Hamecha , " Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents", Thèse de Magistère , 2013, Université de Tizi-Ouzou

Chapitre I : Modélisation et commande du système Photovoltaïque

I.1 introduction

La production d'énergie électrique à partir de l'énergie solaire est couramment effectuée en convertissant directement la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules solaires. Le terme "énergie solaire" trouve son origine dans le mot grec "photo", qui signifie lumière, et le nom du physicien italien Alessandro Volta (1754-1827), qui a grandement contribué à la découverte de l'électricité dans la production d'énergie photovoltaïque [1].

Depuis sa découverte en 1839, la technologie photovoltaïque a considérablement évolué. Elle est aujourd'hui de plus en plus utilisée pour répondre aux besoins énergétiques dans le monde entier, que ce soit pour alimenter des maisons isolées, des entreprises ou même des villes entières. L'un des principaux avantages de l'énergie solaire est qu'elle est abondante et gratuite, ce qui en fait une solution durable et économique pour faire face aux défis posés par l'approvisionnement énergétique et le changement climatique. Dans cette optique, l'optimisation de l'utilisation de l'énergie photovoltaïque est essentielle pour garantir l'efficacité et la durabilité de ces systèmes.

I.2. Principe de la conversion d'énergie photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un dispositif qui utilise des matériaux semi-conducteurs pour transformer directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les propriétés physiques des électrons dans ces matériaux sont exploitées pour libérer des charges électriques lorsqu'ils sont excités par la lumière solaire. Ces charges électriques produisent un courant électrique continu lorsque leur mouvement est canalisé. Cette transformation est due à l'effet photovoltaïque qui est le phénomène physique sous-jacent au fonctionnement des cellules photovoltaïques. Le silicium est souvent utilisé comme matériau semi-conducteur pour sa capacité à absorber efficacement la lumière solaire. Pour générer un courant électrique, les charges électriques sont déséquilibrées en créant une jonction entre deux couches de matériau semi-conducteur ayant des propriétés électriques différentes, généralement une couche positive et une couche négative. La figure I.1 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium [2]

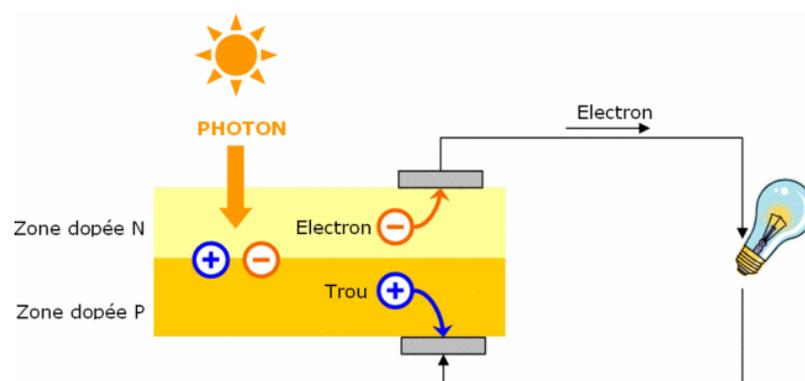


Figure I.1 :Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium (présence d'une jonction PN).

I.3 Caractéristiques et modélisation de la cellule photovoltaïque

I.3.1 Modèle électrique de la cellule photovoltaïque

La (figure I.2) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairage. Il correspond à un générateur de courant photovoltaïque monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule [3]:

- La résistance montée en série (R_s) représente la résistance de contacte et de connexion.
- La résistance shunt (R_{sh}) montée en parallèle représente le courant de fuite.
- Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN.

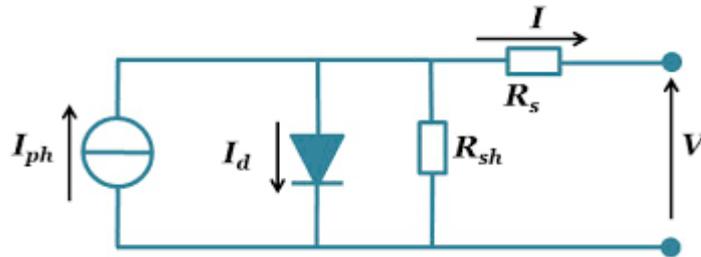


Figure I.2 :Schéma équivalent électrique de la cellule PV à une diode.

La loi de Kirchhoff nous permet d'écrire la relation suivante :

$$I_{ph} = I_d + I_{Rsh} + I \quad \text{donc} \quad I = I_{ph} - I_{Rsh} - I_d \quad (\text{I.1})$$

L'expression résultante à une caractéristique courant-tension (I-V) après tout calcul est :

$$i = i_{ph} - i_s \left[\exp\left(\frac{v + R_s i}{\alpha v_t}\right) - 1 - \frac{v + R_s i}{R_{sh}} \right] \quad (\text{I.2})$$

Les expressions de (I_{ph}) et de (I_{sat}) le courant de saturation de la diode sont donnés par :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_0} * (I_{ph} + K_i + \Delta T) \quad (\text{I.3})$$

$$I_{sa} = D T^3 \left(\frac{-qEg}{a.K.T} \right) \quad (\text{I.4})$$

Afin de se débarrasser du facteur de diffusion D de la diode, apparu dans l'équation (I-4), il faut réécrire cette équation à T_0 et faire le rapport entre les deux. Ainsi, l'expression obtenue est :

$$I_{sat} = I_{s0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^3 \exp\left(\frac{qEg}{a.K} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (\text{I.5})$$

1.3.2 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique [4]. Les plus usuels sont les suivantes :

1.3.2.1 Courant de court-circuit (I_{cc}) :

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant ph dans le cas contraire[4].

$$i_{cc} = i_{ph0} - I_{s0} \left[\exp\left(\frac{v}{\alpha \cdot v_{t0}}\right) - 1 \right] \quad (I.6)$$

en utilisant la condition où la cellule pv est en court-circuit ($I=I_{cc}$ et $V=0$), l'équation

$$i_{cc} = I_{ph0} - I_{s0} \left[\exp\left(\frac{0}{\alpha \cdot v_{t0}}\right) - 1 \right] = I_{ph0} \quad (I.7)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible). Donc :

$$I_{cc} \approx I_{ph0} \quad (I.8)$$

1.3.2.2. Tension de circuit-ouvert (V_{co})

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul.

Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse. [5]

$$0 = I_{cc} - I_s \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{a \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (I.9)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{c0} = V_t \cdot \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right] \quad (I.10)$$

1.3.2.3 Puissance de la cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc...), la puissance électrique $P(W)$ disponible aux bornes d'une cellule PV est :

$$P = VI \quad (I.11)$$

1.3.2.4. Puissance maximale d'une cellule PV (P_{max})

Lorsque la puissance atteint la crête, elle est maximale, cela se produit en plein soleil, pour un maximum de radiation [6].

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} = V_{c0} \cdot I_{cc} \quad (I.12)$$

1.3.2.5 Rendement énergétique

Le rendement η , des cellules PV désigne le rendement de conversion en énergie. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{P_{in}} \tag{I.13}$$

Ce rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Le rendement de conversion est un paramètre essentiel.

En effet, la seule connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule [7].

1.3.2.6 Facteur de forme

Le facteur de forme en Anglais {Fill Factor} d'une cellule solaire dépend d'un ensemble de paramètres, il est définit comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Le facteur de forme détermine la qualité électrique de la cellule[8]. Il est obtenu par l'équation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{cc} \cdot V_{co}} \tag{I.14}$$

1.3.3 Modélisation et simulation du générateur photovoltaïque

• Modules photovoltaïques choisis sans commande

En décortiquant notre système par l'utilisation de l'environnement MATLAB /Simulink, notre modèle photovoltaïque peut être représenté comme suit :

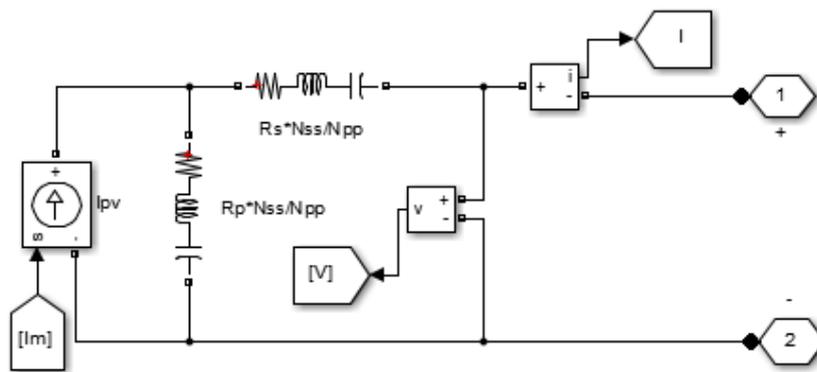


Figure I.3 :Modèle du circuit équivalent d'un cellule PV

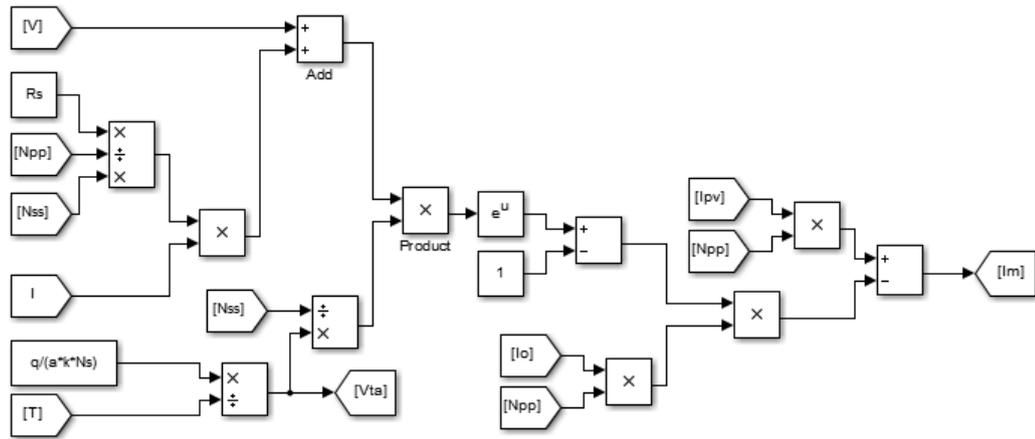


Figure I.4 :Schéma bloc de calcul du courant maximal

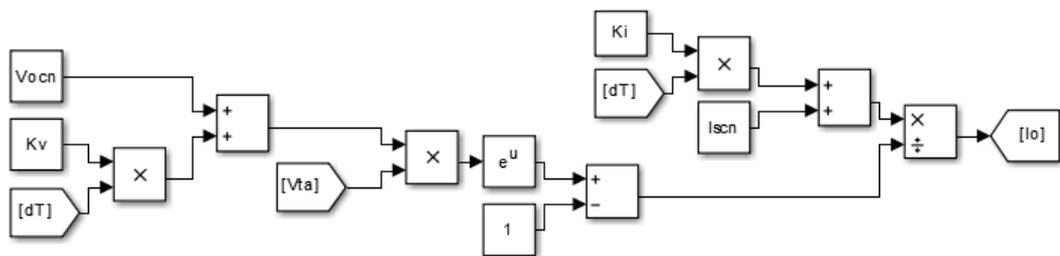


Figure I.5 :Schéma bloc du calcul de IO

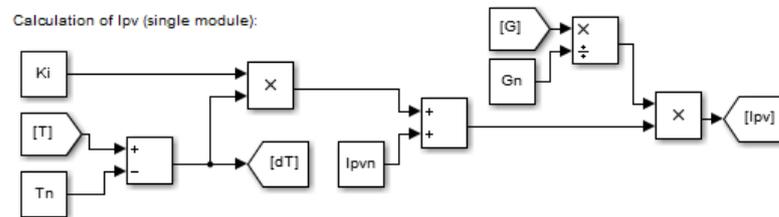


Figure I.6 :Schéma bloc du calcul de Ipv

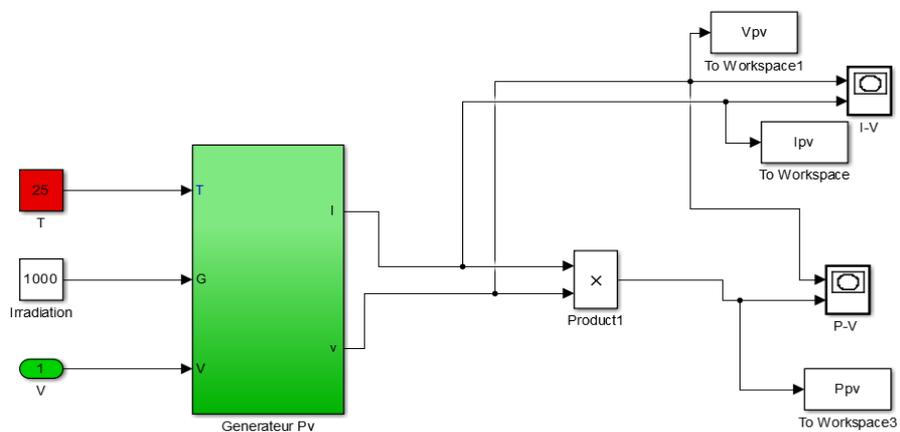


Figure I.7 :Schéma bloc du générateur photovoltaïque sous Matlab/Simulink.

I.3.4. PARAMETRES DE SIMULATION

La simulation du modèle photovoltaïque **KC200GT** sous MATLAB-SIMULINK dans les conditions standard du test ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$) :

Tableau I.1 : Caractéristiques électrique du module photovoltaïque du panneau KC200GT dans les conditions standards « CST »[9].

$V_{mp}(v)$	$I_{mp}(A)$	$P_{max}(w)$	$V_{co}(v)$	$I_{pv}(A)$	$I_{sc}(A)$	I_o	a	R_s	R_p
26.3	7.605	200	32.9	8.214	8.12	9.845.10	1.3	0.221	415.405

I.4. RESULTATS ET L'ANALYSE DE LA SIMUMLATION

Le module photovoltaïque **KC200GT**, utilisé dans les installations solaires, est constitué de 54 cellules en silicium Monocristallin. Ce module peut produire une puissance maximale de 200 Watts à 26.3 Volts.

Ceci nous a permis de déterminer l'allure des caractéristiques électriques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ de ce dernier dans les conditions standard du test ($G=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$).

Les caractéristiques non linéaires I-V et P-V de la cellule solaire sous les conditions standards :

a- Caractéristique I-V :

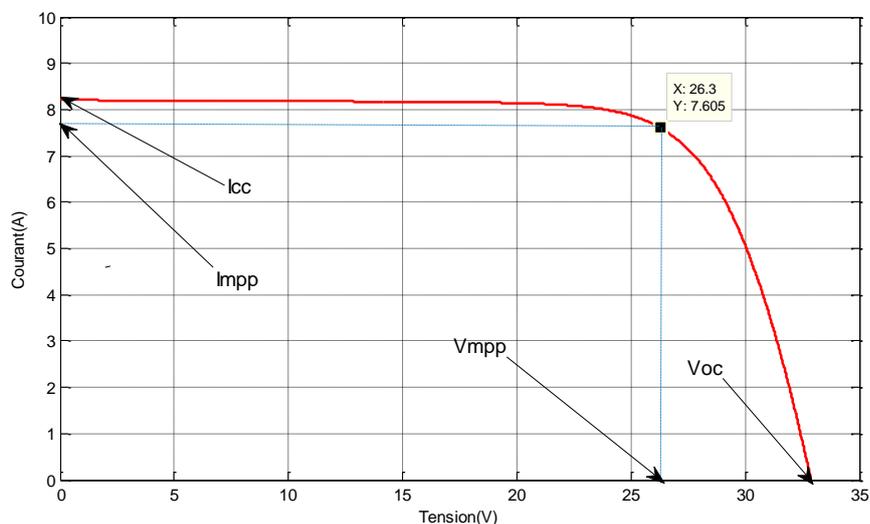


Figure I.8 :Caractéristique $I=f(V)$ du module photovoltaïque

La figure (**I.8**) représente trois zones essentielles la première zone le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur de courant, la zone qui suit est zone intermédiaire, elle représente la région préférée pour le fonctionnement du générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La dernière zone qui se distingue par une variation de courant correspondant à une tension presque

constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

b- Caractéristique P-V :

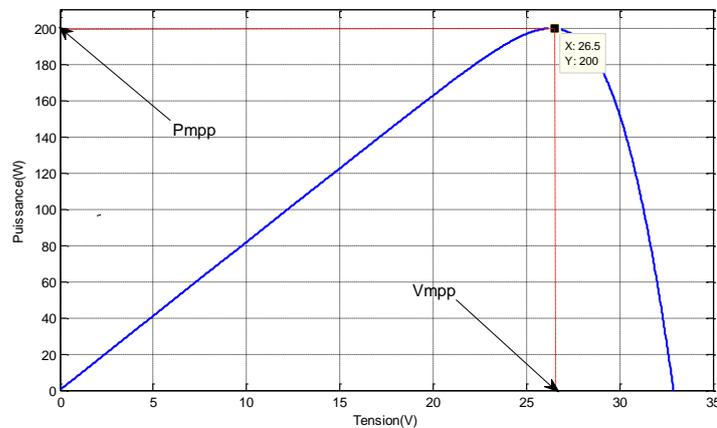


Figure 1.9: Caractéristique $P=f(V)$ du module photovoltaïque

La courbe caractéristique $P=f(V)$ d'un module photovoltaïque présente généralement la forme suivante :

1- Point de court-circuit (ISC) : Lorsque la tension est nulle (court-circuit), la puissance est également nulle. À ce point, le courant produit par le module est à son maximum, mais la puissance est nulle car aucun travail n'est effectué en l'absence de tension.

2- Point de circuit ouvert (VOC) : Lorsque le courant est nul (circuit ouvert), la puissance est également nulle. À ce point, la tension aux bornes du module est à son maximum, mais il n'y a pas de courant qui circule, donc aucune puissance n'est produite.

3- Point de puissance maximale (Pmax) : Ce point représente la tension et le courant pour lesquels la puissance de sortie du module est maximale. À ce point, le module fonctionne à son rendement maximal, produisant la puissance électrique maximale.

1.4.1 L'Influence de la variation des conditions météorologiques sur les caractéristiques de PV

a- L'influence de la température :

On s'aperçoit que le courant délivré par chaque cellule dépend de la température interne de la jonction PN qui constitue la cellule PV [10].

Les graphes suivants représentent des courbes $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante.

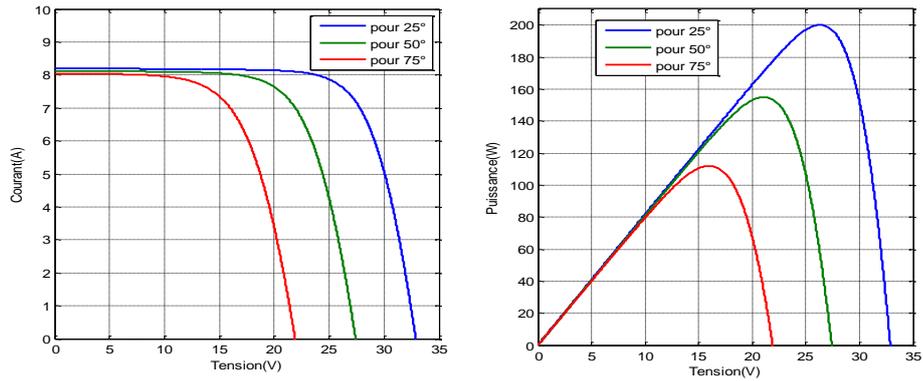


Figure I.10 : Caractéristique P(V) et I(V) pour différentes valeurs Temperature (T)

On s’aperçoit que la performance électrique de la cellule varie en fonction de la température ambiante, la tension à circuit ouvert (v_{co}) diminue avec l'augmentation de la température, tandis que le courant de court-circuit (I_{cc}) augmente légèrement. La puissance maximale (P_m) de la cellule diminue également avec l'augmentation de la température. Enfin, le rendement de la cellule diminue également avec l'augmentation de la température. Car La tension de circuit ouvert diminue généralement avec l'augmentation de la température. Cela est dû à la variation des propriétés des matériaux utilisés dans les cellules photovoltaïques. Une tension de circuit ouvert plus faible entraîne une réduction de la différence de potentiel disponible pour pousser le courant à travers la charge, ce qui réduit la puissance de sortie du module .

À des températures plus élevées, la résistance interne peut augmenter en raison de la conductivité réduite des matériaux utilisés. Cette augmentation de la résistance interne entraîne une chute de tension interne, réduisant ainsi la puissance de sortie

b- L'influence de l'éclairement

L'influence de l'éclairement désigne l'impact de la quantité de lumière solaire reçue sur le fonctionnement d'un système solaire photovoltaïque (PV). Les graphes suivants représentent les caractéristiques P(V) et I(V) respectivement d’un générateur photovoltaïque pour une température constante ($T=25^{\circ}C$) et un irradiation(G) variable.

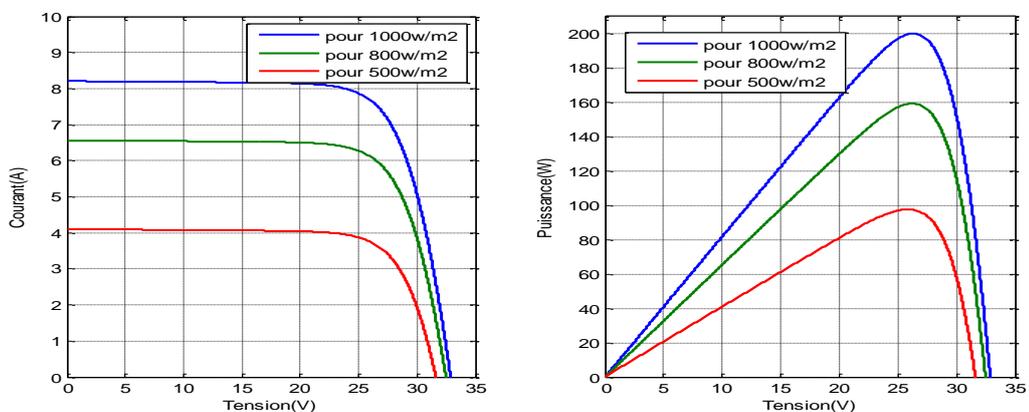


Figure I.11 : Caractéristique I(V) et P(V) pour différentes valeurs de G

On observe que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclaircissement. Le courant de court-circuit augmente avec l'éclaircissement car il y a une plus grande libération d'électrons dans le matériau semi-conducteur sous l'effet de l'énergie des photons. La tension en circuit ouvert reste relativement constante car elle est principalement déterminée par les propriétés intrinsèques du matériau semi-conducteur et ne dépend pas directement de l'éclaircissement.

La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclaircissement[4].

Pour régler en temps réel la tension de fonctionnement du module photovoltaïque afin de trouver et maintenir le point de puissance maximale, quelles que soient les conditions changeantes. On utilise un système MPPT (Maximum Power Point Tracking).

1.5. Commande MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une fonctionnalité de contrôle électronique utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la production d'énergie solaire. Le MPPT est un algorithme qui ajuste en continu la tension de sortie du panneau solaire pour maintenir le point de puissance maximale (MPP) de la cellule solaire.

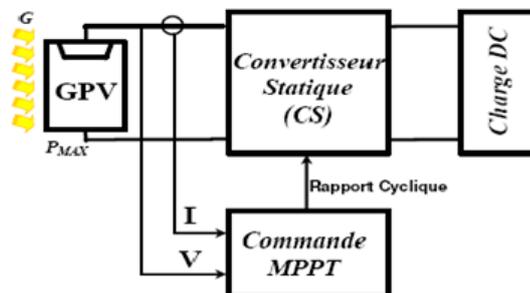


Figure I.12 : La chaîne de conversion photovoltaïque

L'algorithme MPPT utilise une stratégie de commande qui repose sur la modification du rapport cyclique du convertisseur statique (CS) en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée tels que le courant (I), la tension (V) et la puissance du générateur photovoltaïque (GPV), pour se placer sur le point de puissance maximale (MPP)[9].

a- Algorithme Perturber et observer, 'P&O'

La commande Perturbation et Observation (P&O) est une technique de commande utilisée pour rechercher le point de puissance maximale (MPP) d'un générateur photovoltaïque (GPV) dans le cadre de l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Cette méthode fonctionne en perturbant la tension ou le courant du GPV d'un petit montant et en observant l'effet de cette perturbation sur la puissance produite. En utilisant cette information, l'algorithme ajuste le rapport cyclique du convertisseur statique (CS) pour se rapprocher du MPP. Le processus de perturbation et d'observation est répété à intervalles réguliers

pour maintenir le système au MPP. C'est l'un des algorithmes de commande MPPT les plus couramment utilisés en raison de sa simplicité et de sa fiabilité.

- si $\Delta P > 0$ alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.
- Si $\Delta P < 0$ le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

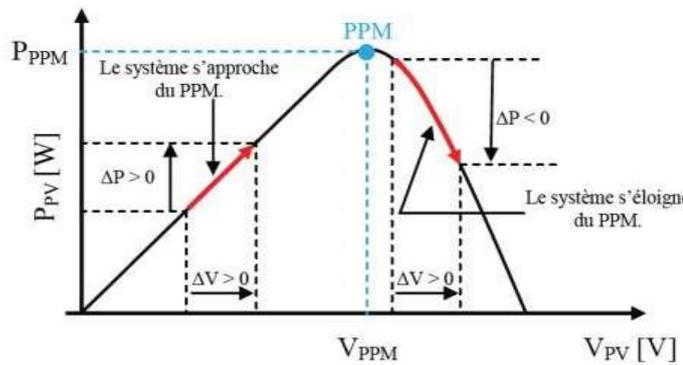


Figure I.13 :Caractéristique Ppv(Vpv) et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation

1.5.1. Organigramme Perturber et Observer (P&O)

Pour déterminer la puissance à tout moment, il est nécessaire de mesurer la tension et le courant à l'aide de deux capteurs. Cette mesure est utilisée dans l'organigramme de la commande MPPT de type P&O, qui est illustré dans la figure(I.14.)

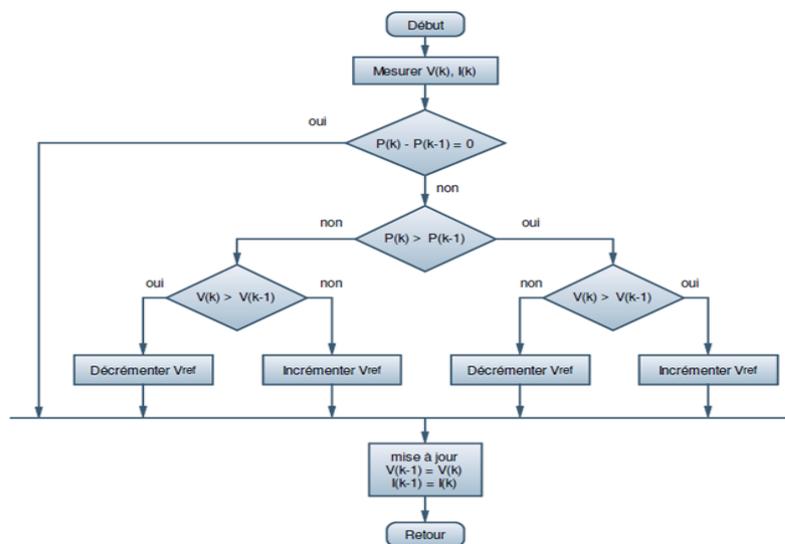


Figure I .14 :organigramme de la méthode P&O

D'après l'organigramme de la Figure précédente, on a réalisé le schéma bloc suivant :

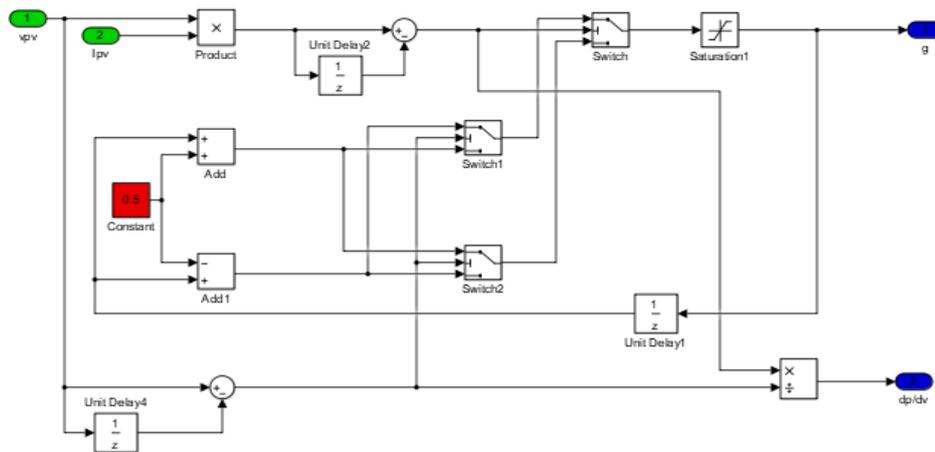


Figure I.15 : schéma bloc de la technique PO

1.6 Modélisation du convertisseur statique DC/DC

1.6.1 Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Un convertisseur statique DC/DC (Direct Current/Direct Current) est un dispositif électronique qui permet de convertir une tension continue (DC) d'une valeur donnée à une autre valeur de tension continue. Le convertisseur DC/DC joue un rôle crucial dans les systèmes photovoltaïques (PV) en permettant d'adapter la tension et le courant générés par les panneaux solaires à la charge, qu'elle soit une batterie de stockage ou le réseau électrique. Le convertisseur DC/DC assure en effet la régulation de la tension et du courant pour maximiser la puissance délivrée à la charge. Il existe différents types de convertisseurs statiques DC/DC :

- Élévateur de tension « BOOST » ou hacheur survolteur.
- Abaisseur de tension « Buck » ou hacheur dévolteur.
- Abaisseur/Élévateur de tension « BUCK-BOOST ».

1.6.2. Hacheur élévateur (Boost)

Un convertisseur boost, ou hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de valeur plus forte [10]. La Figure (I.16) représente le schéma de base d'un convertisseur boost.

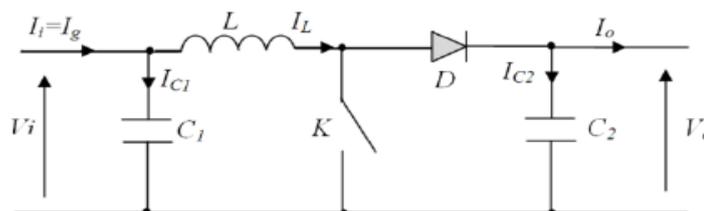


Figure I.16 :circuit électrique d'un hacheur boost

le principe de fonctionnement d'un convertisseur boost est divisé en deux phases distinctes selon l'état de l'interrupteur K:

-Lorsque l'interrupteur K est fermé (état passant) durant la période ($d.T_s$), le courant dans l'inductance va augmenter, et une énergie sous forme d'énergie magnétique est stockée. La diode est donc bloquée, et la charge sera déconnectée.

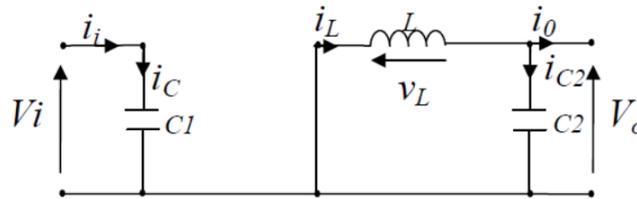


Figure I.17 :Schémas équivalents du hacheur survolteur K fermé

-Lorsque l'interrupteur est ouvert durant la période $(1-d).T_s$, l'inductance est alors en série avec le générateur et sa tension va s'ajouter à celle du générateur : c'est l'effet survolteur. L'énergie cumulée dans l'inductance va être donc transférée vers la capacité.

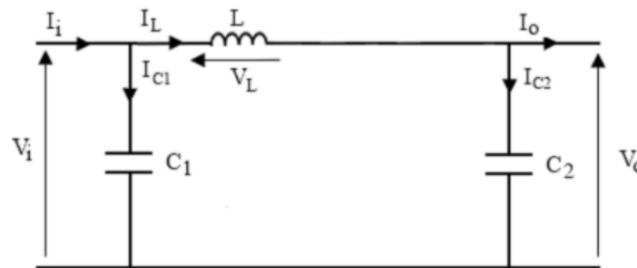


Figure I.18 :Schémas équivalents du hacheur survolteur K ouvert

L'application des lois de Kirchoff sur les circuits équivalents du convertisseur survolteur des deux phases de fonctionnement donne :

Pour la première période $d.T_s$:

$$I_{c1}(t) = C1 \frac{dvi(t)}{dt} = Ii(t) - Il(t) \tag{I.15}$$

$$I_{c2}(t) = C2 \frac{dvo(t)}{dt} = -io(t) \tag{I.16}$$

$$VL(t) = L \frac{dil(t)}{dt} = -Vi(t) \tag{I.17}$$

Pour la deuxième période $(1-d).T_s$:

$$I_{c1}(t) = C1 \frac{dvi(t)}{dt} = Ii(t) - Il(t) \tag{I.18}$$

$$I_{c2}(t) = C2 \frac{dvo(t)}{dt} = Il(t) - Io(t) \tag{I.19}$$

$$V(t) = L \frac{dil(t)}{dt} = Vi(t) - Vo(t) \tag{I.20}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période: T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left(\frac{dx}{dt}\right)Ts = \frac{dx}{dt}dT_s + \frac{dx}{dt(1-d)Ts}(1-d)Ts \quad (\text{I.21})$$

En appliquant la relation (I.21) sur les systèmes d'équations (I.19) et (I.20), on obtient Les équations qui régissent le système sur une période entière on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur

$$i_l = I_i(t) - C1 \frac{dvi(t)}{dt} \quad (\text{I.22})$$

$$I_o = (1-d)I_l - C2 \frac{dvo(t)}{dt} \quad (\text{I.23})$$

$$V_i = L \frac{dI_l(t)}{dt} + (1-d)V_o \quad (\text{I.24})$$

Le modelé de convertisseur DC-DC boost sous l'environnement Matlab/Simulink.

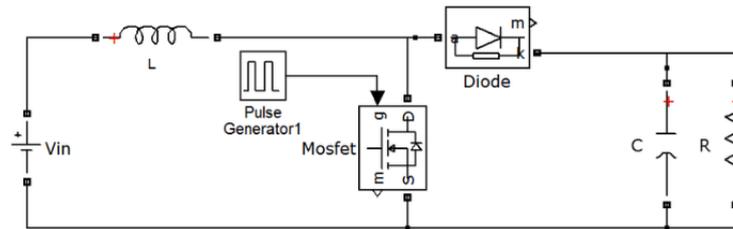


Figure I.19 :Schéma de simulation d'un hacheur boost

I.7.Résultats de simulation et interprétation

Nous avons effectué une simulation de notre système PV en utilisant MATLAB/Simulink.

Leurs paramètres dans les conditions standards de fonctionnement (un éclairage de $1000\text{W}/\text{m}^2$ et une température de 25°C) sont présentés dans le tableau de l'annexe.

La figure I.20 représente la et puissance de sortie de convertisseur DC-DC (P_s) :

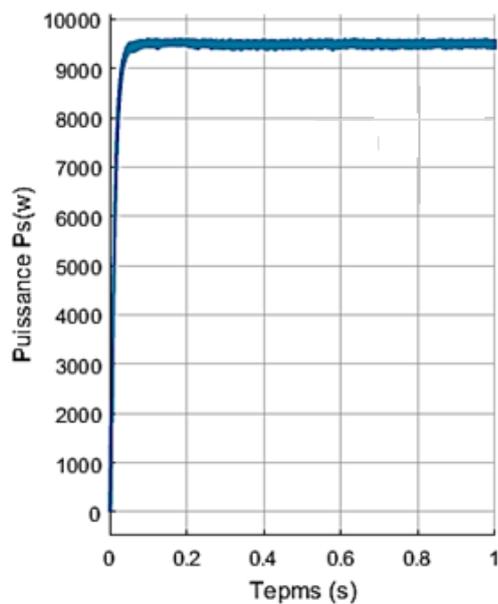


Figure I.20 :Allure de la puissance photovoltaïque P_{pv}

La figure I.21 représente la Tension de sortie de convertisseur DC-DC (V_s) :

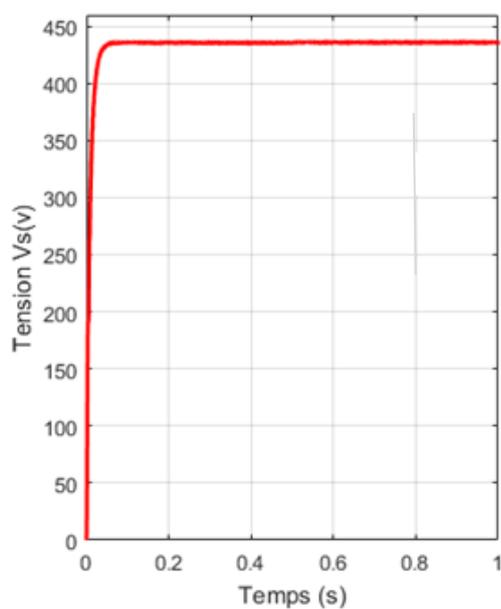


Figure I.21 :Allure de la tension photovoltaïque V_{pv}

La figure I.23 représente le courant de sortie de convertisseur DC-DC (i_s) :

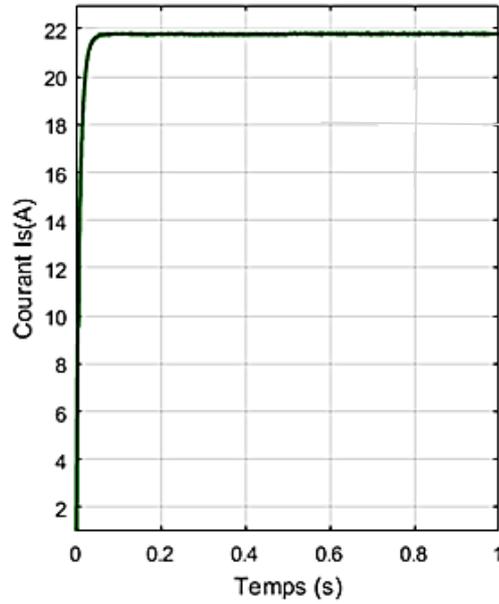


Figure I.22 : Allure de le courant photovoltaïque i_{pv}

Le fonctionnement du système sous une température fixe de 25°C et un éclaircissement variable ($500\text{W}/\text{m}^2$, $250\text{W}/\text{m}^2$) est illustré dans les figures suivantes :

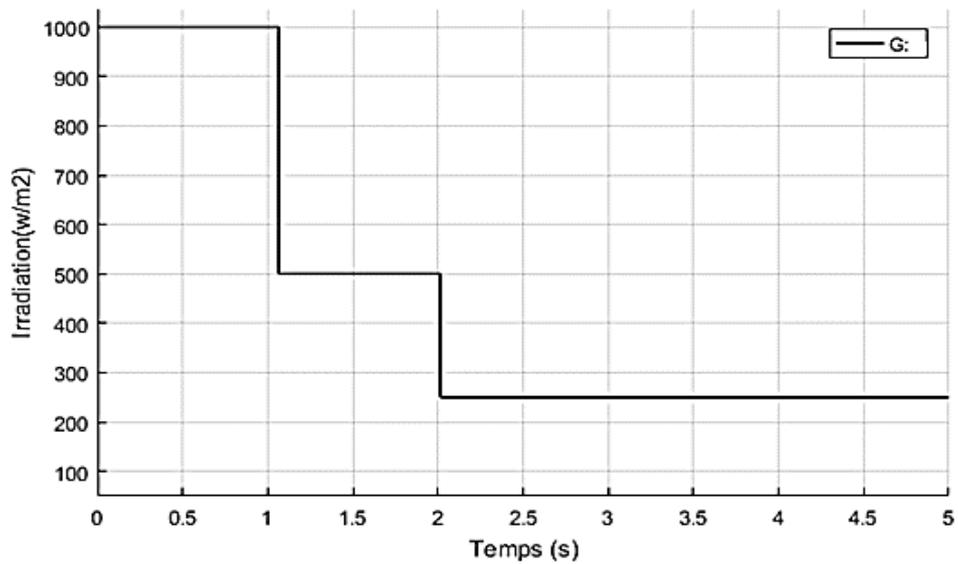


Figure I.23 :Allure de l' irradiation ($1000\text{w}/\text{m}^2$, $500\text{w}/\text{m}^2$, $250\text{w}/\text{m}^2$)

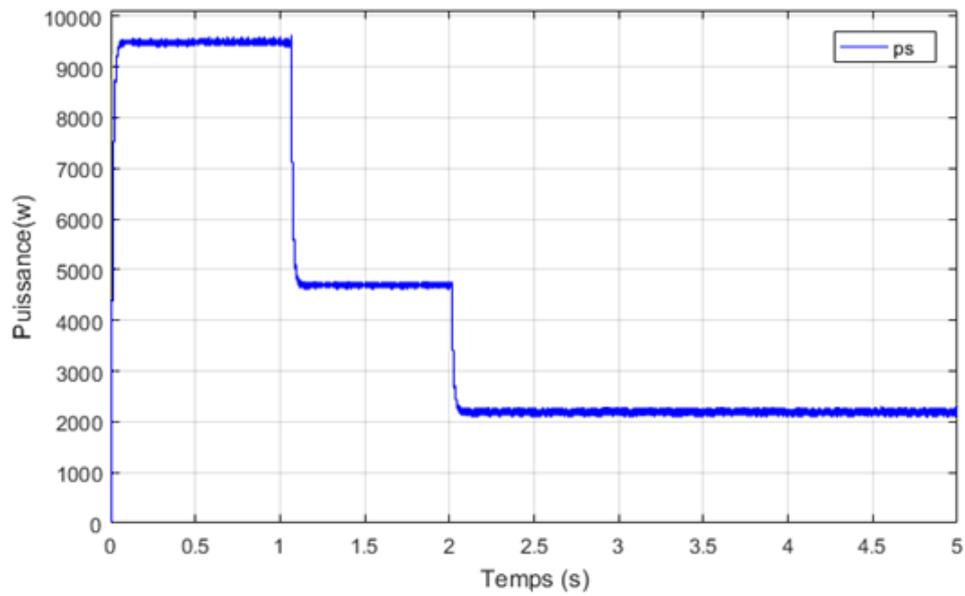


Figure I.24 : Allure de la puissance de sortie de convertisseur boost P_s

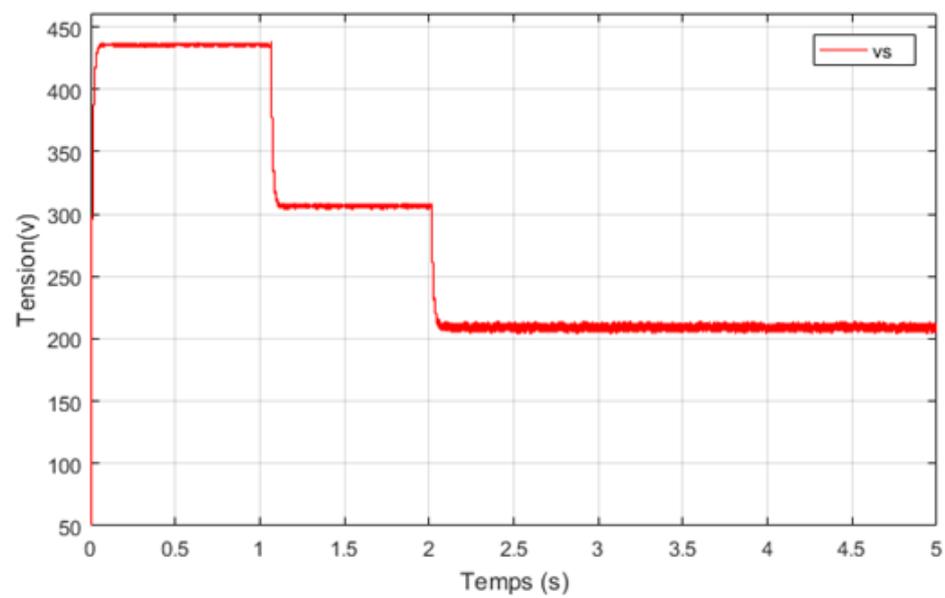


Figure I.25 : Allure de la tension de sortie de convertisseur boost V_s

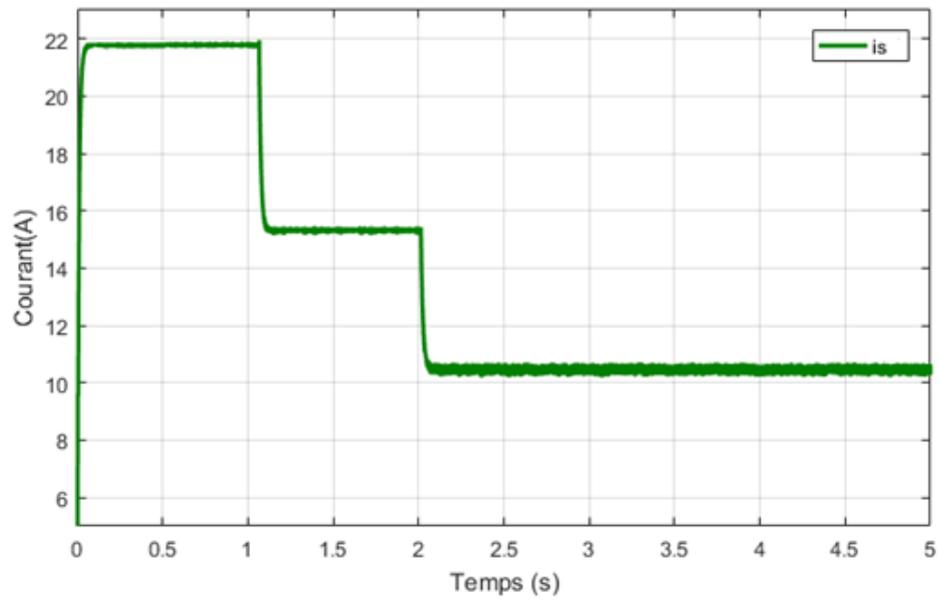


Figure I.26 : Allure de le courant de sortie de convertisseur boost i_s

Dans ce cas nous allons étudier le système sous un éclairement fixe de 1000W/m^2 et une température variable (10° et 40° et 25°). Les figures suivantes montrent les résultats obtenus :

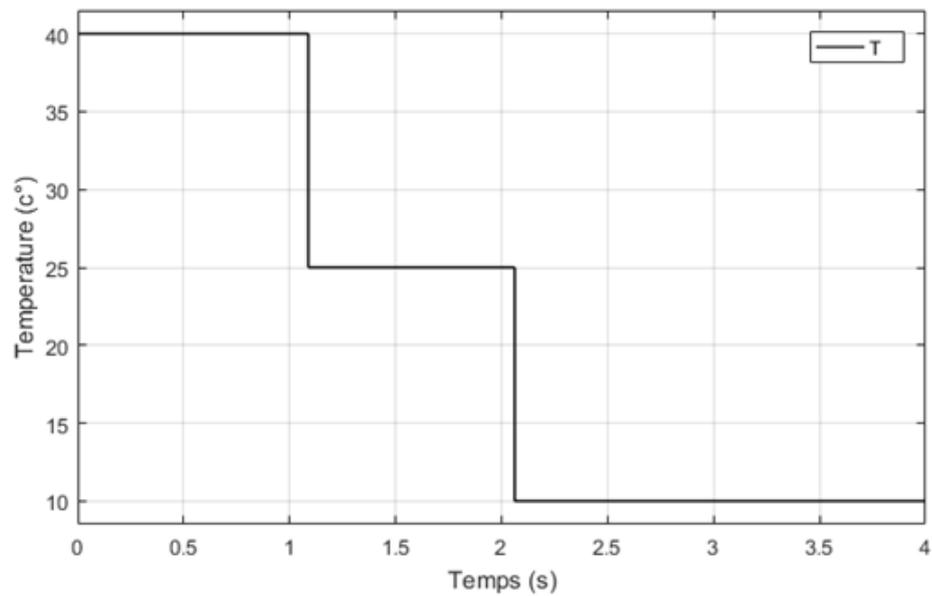


Figure I.27 : Allure de Température ($40^\circ, 25^\circ, 10^\circ$)

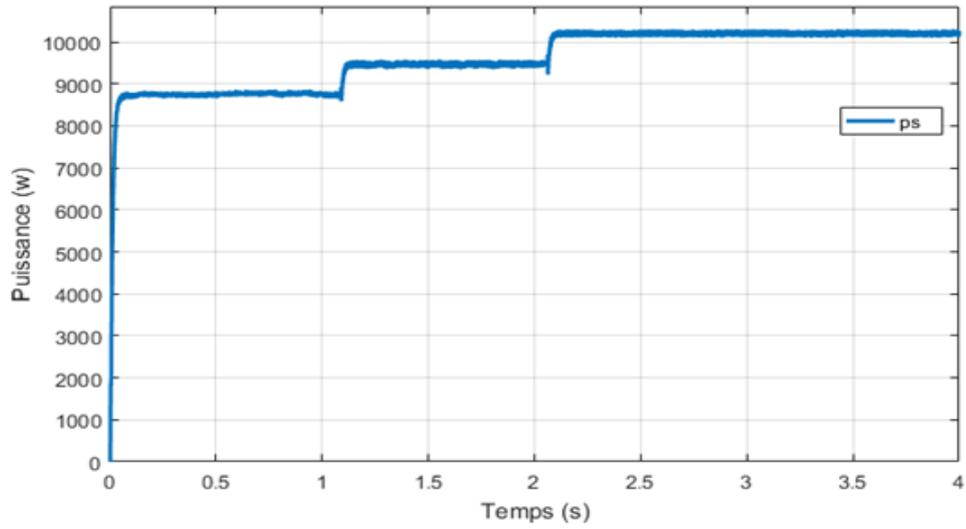


Figure I.28 : Allure de la puissance de sortie de convertisseur boost P_s

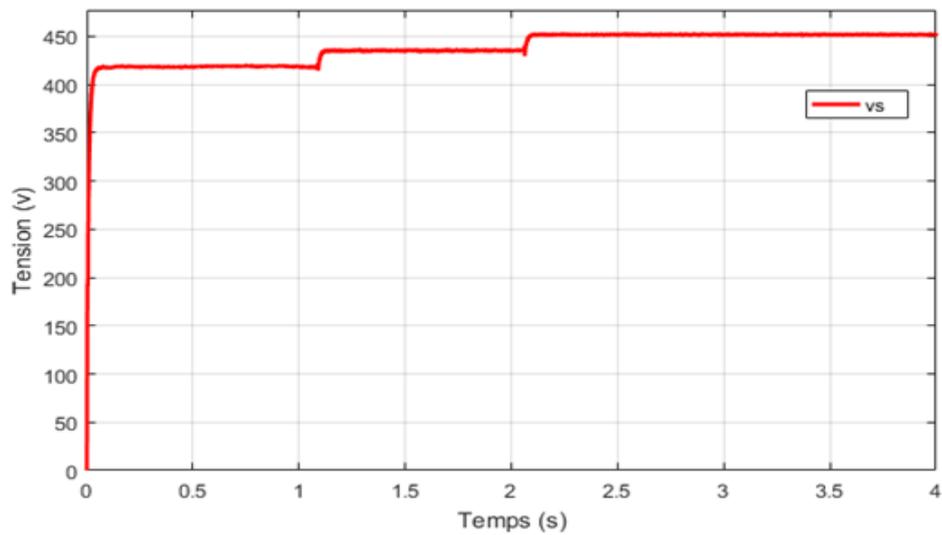


Figure I.29 : Allure de la tension de sortie de convertisseur boost V_s

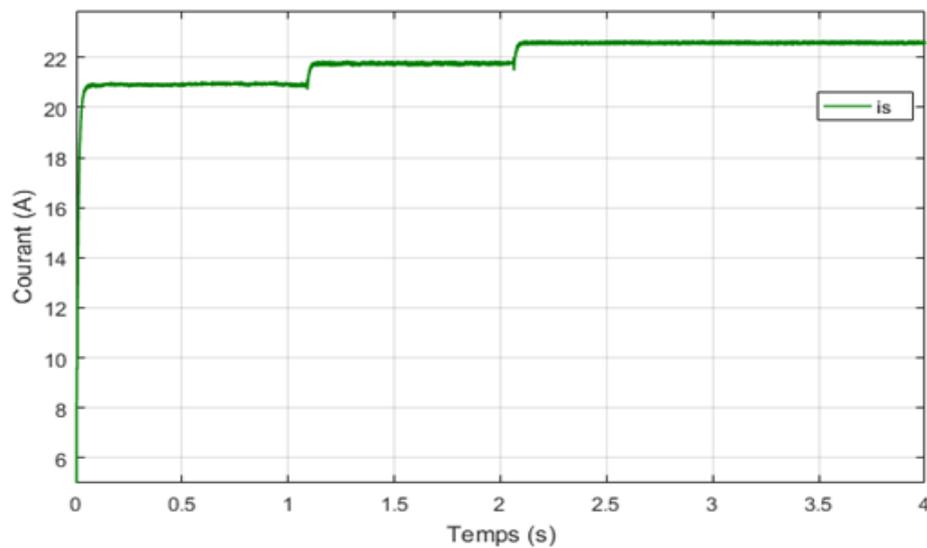


Figure I.30 : Allure de le courant de sortie de convertisseur boost i_s

I.7.1.interprétation des résultats :

On remarque que la tension est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement, ce qui signifie que lorsque l'intensité diminue, la tension diminue également. De même, la puissance dépend de la tension, donc lorsque les fluctuations de tension diminuent, la puissance diminue également.

Il est observé que la température a une influence sur la tension de sortie du convertisseur. En effet, lorsque la température augmente, la tension de sortie diminue. Cela signifie que la puissance délivrée diminue également avec une augmentation de la température.

D'après les courbes présentées pour les différentes simulations, il est observé que le hacheur Boost fournit une tension de sortie (V_s) supérieure à celle du générateur photovoltaïque. Cette observation suggère que le hacheur Boost remplit correctement son rôle.

Les résultats obtenus démontrent que la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) provoque des oscillations du point de fonctionnement du module photovoltaïque autour du point de puissance maximale (PPM), indépendamment des variations d'éclairement et de température. Cela suggère un bon fonctionnement du contrôleur P&O (Perturb and Observe). En outre, il est constaté que plus la température augmente, plus la tension délivrée par le module photovoltaïque est faible. De même, une augmentation de l'éclairement se traduit par une augmentation de la tension.

I.8.conclusion

Ce chapitre présente la modélisation, la commande et l'analyse d'un générateur photovoltaïque avec un étage d'adaptation connecté à une charge continue en courant continu (DC). Le système d'adaptation est composé d'un hacheur fonctionnant comme contrôleur du point de puissance maximale (MPPT). L'algorithme de perturbation et d'observation (P&O) est utilisé pour fournir des informations au système MPPT, et ce système est simulé dans l'environnement Matlab/Simulink.

Ce modèle permet d'étudier l'influence des conditions climatiques sur les caractéristiques électriques, telles que les courbes courant-tension (V-I) et tension-puissance (V-P) du générateur photovoltaïque. Les résultats de simulation démontrent la dépendance des grandeurs électriques d'un générateur photovoltaïque aux changements climatiques. Ils mettent en évidence la capacité du système d'adaptation MPPT basé sur la méthode P&O à ramener les grandeurs électriques (puissance, tension) à la sortie du générateur photovoltaïque vers un nouveau point de fonctionnement optimal. Ces résultats confirment ainsi le bon fonctionnement du système d'adaptation MPPT basé sur la méthode P&O.

I.9 références bibliographiques

[1] : Marsh, G., 2011. Partner in power: Part two: Whilst the micro-inverter revolution looks set to spread, central and string inverters remain the mainstream. Renewable Energy Focus 12 (3).

[2] : AmarouyacheMohamed, thèse doctorat en sciences en electrotechnique,(Contribution à l'optimisation

d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque), 02 / 03 / 2014.

[3] : S. M. Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[4] :BOUZEGANE Mhenna GAOUAOUI Ferhat,(Alimentation d'un moteur à courant continu par une source photovoltaïque), Faculté De Génie Electrique Et D'informatique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou

[5].Helali Kamelia « modélisation de la cellule photovoltaïque » mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou, 2012

[6] : C. Bernard, J.Chauvin, D. Lebrun, J.F Muraz, P. Stassi « Station solaire autonome pour l'alimentation des antennes de l'expérience de radio détection l'observatoire Pierre Auger ».2006.

[7] : D. Boukhers, « optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage », Magister en électronique, Université de Constantine, 2007

[8] : MAHOUZ hayet, "etude d'une chaîne photovoltaïque ", memoire de master option commande des systemes électrique, universite ibn khaldoun detiaret.2016

[9] : BENADEL Faiza, « Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV »mimoire de master Faculté De Génie Electrique UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA ; 2015 – 2016

Chapitre II : Modélisation et commande du système turbine et génératrice synchrone à aimant permanent

II.1 Introduction

En raison de l'industrialisation massive et de la forte pollution environnementale causée par la combustion des combustibles fossiles ces dernières années, la crainte d'une pénurie d'énergie à l'échelle mondiale a suscité un intérêt croissant pour les énergies renouvelables. L'énergie éolienne apparaît comme une solution viable pour atténuer ces problèmes, grâce à son faible impact sur l'environnement et au fait qu'elle soit renouvelable, offrant ainsi un potentiel de développement mondial. [1]

II.2 Les principaux composants d'une éolienne

Les éléments principaux qui composent une éolienne à axe horizontal sont représentés dans la figure ci-dessous

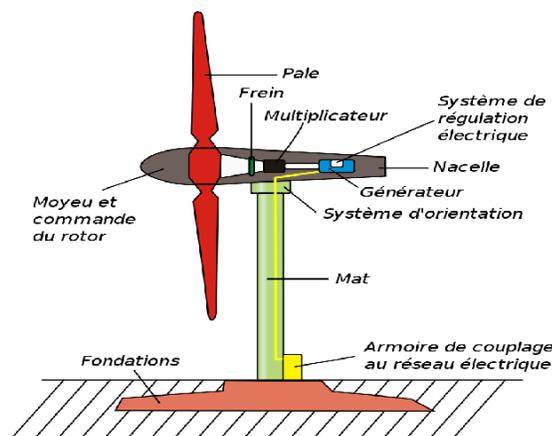


Figure II.1 : Les composantes d'une éolienne.

Le mât : Il est crucial que le mât de l'éolienne à axe horizontal soutienne la nacelle et le rotor de la turbine à une hauteur élevée pour profiter de la vitesse du vent en hauteur. Pour une éolienne de 500 kW, le mât mesure généralement de 40 à 60 mètres de hauteur et peut être de type plein ou tubulaire. Bien que les mâts tubulaires soient plus coûteux, ils offrent un accès facile à la nacelle pour la maintenance.[3]

Le rotor : Le rotor est responsable de la rotation du mécanisme d'entraînement et du générateur. Les pales doivent être suffisamment légères, solides et durables pour résister aux intempéries. Généralement, les pales sont fabriquées à partir de matériaux composites tels que la fibre de verre, le plastique renforcé ou le bois. Pour produire de l'électricité, le rotor doit tourner à une vitesse modérée, et la quantité d'électricité générée dépend de la taille des pales. Les rotors d'éoliennes sont souvent équipés de deux ou trois pales, bien que les rotors à trois pales soient plus coûteux, ils réduisent les contraintes mécaniques subies par le système.

Les pales : Les pales sont essentielles pour le bon fonctionnement et la longévité d'une éolienne, ainsi que pour son efficacité énergétique.[4] Plusieurs facteurs sont à prendre en compte pour concevoir des pales efficaces,

notamment leur longueur, leur largeur, leur profil, leur matériau et leur nombre.

La nacelle : Se trouve en haut de la tour et abrite l'ensemble des équipements de production d'électricité, tels que le multiplicateur, le(s) générateur(s), les systèmes de freinage et d'orientation de l'éolienne, ainsi que tous les équipements automatisés de contrôle de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. Cette structure est généralement en acier ou en fonte, et tous les éléments sont fixés à celle-ci.[4]

II.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne transforme l'énergie éolienne en électricité en utilisant la force aérodynamique des pales du rotor, qui fonctionnent comme une aile d'avion ou une pale de rotor d'hélicoptère. Lorsque le vent traverse la pale, la pression de l'air d'un côté de la pale diminue. La différence de pression d'air entre les deux côtés de la lame crée à la fois de la portance et de la traînée. La force de portance est plus forte que la traînée, ce qui fait tourner le rotor. Le rotor se connecte au générateur, soit directement (s'il s'agit d'une turbine à entraînement direct), soit via un arbre et une série d'engrenages (une boîte de vitesses) qui accélèrent la rotation et permettent un générateur physiquement plus petit. Cette traduction de la force aérodynamique à la rotation d'un générateur crée de l'électricité.[2]

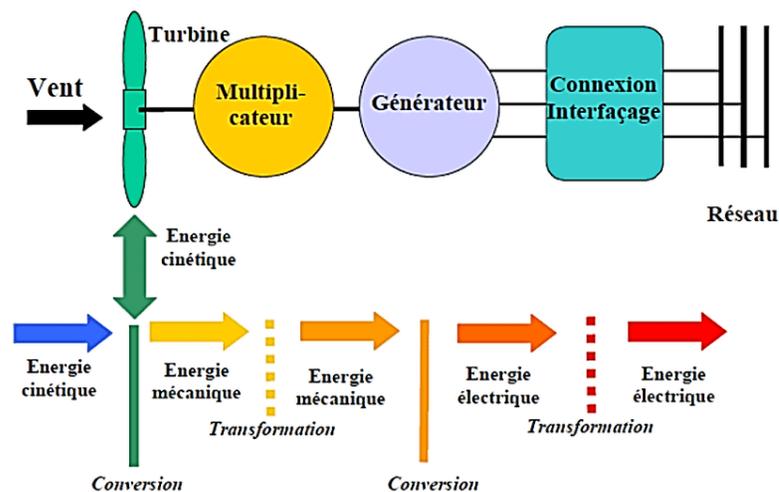


Figure II.2 : Schéma de conversion de l'énergie éolienne

II.4 Les éoliennes à vitesse variable [6]

Les systèmes à vitesse variable permettent aux éoliennes de fonctionner sur une plage plus large de vitesses de vent, maximisant ainsi la puissance produite pour chaque vitesse. On observe différents types d'éoliennes à vitesse variable, classés en fonction de la plage de variation des vitesses de vent qu'elles peuvent supporter.

II.4.1 Modélisation de la turbine

L'énergie captée par la turbine est transmise à la génératrice. Le système mécanique complet comprend donc les

éléments suivants [1] :

- Un moyeu sur lequel sont reliées les pales.
- L'axe lent.
- Le multiplicateur de Vitesse.
- L'axe rapide (rotor de la génératrice).

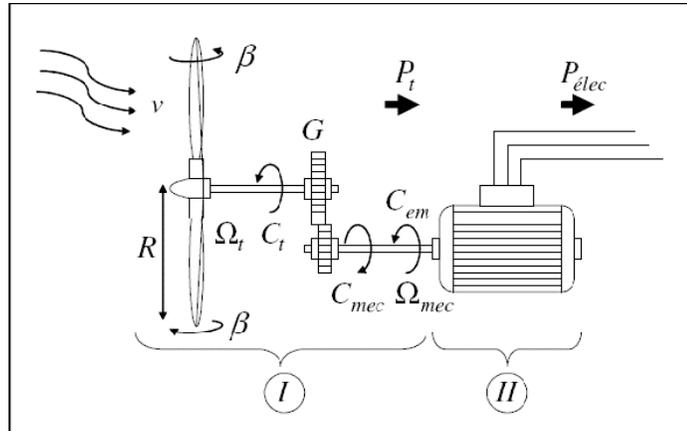


Figure II.3 : Eléments du système mécanique complets.

II.4.2 Modélisation du vent

La disponibilité de la ressource éolienne est cruciale pour les projets éoliens, car elle détermine la production d'électricité et la rentabilité. Comprendre les propriétés dynamiques du vent est essentiel pour étudier le système de conversion d'énergie, car la puissance éolienne varie en fonction du cube de la vitesse du vent dans des conditions optimales. Le modèle de vent utilisé est simplifié car il ne tient pas compte de la direction, mais plutôt d'une fonction scalaire qui évolue dans le temps. Pour cette étude, le profil de vent spécifique est basé sur des mesures réelles et modélisé de manière déterministe sous forme de somme d'harmoniques.[1]

$$V(t) = 6.5 + (0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t))$$

II.4.3 Bilan des forces sur une pale

La section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur est représentée dans la Figure II. Le vecteur \vec{V} représente la vitesse du vent qui arrive face à la pale, tandis que le vecteur \vec{V}_{rot} représente la composante de vent causée par la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} . L'impact du vent sur la pale crée une force \vec{F}_{res} qui se divise en une poussée axiale \vec{F}_{ax} compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation \vec{F}_{rot} qui produit le déplacement. Chaque turbine éolienne est dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale à une vitesse de vent donnée. Lorsque la vitesse de vent devient

trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.[1]

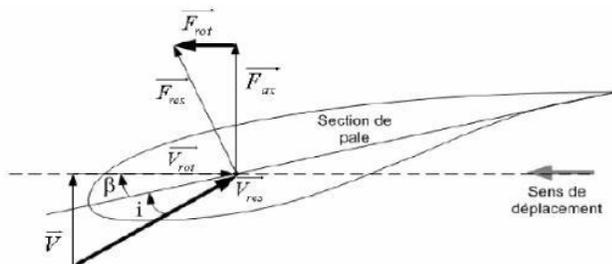


Figure II.4 : Bilan des forces sur une pale.

II.4.4 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation de la turbine

La partie mécanique de la turbine à étudier est constituée de trois pales orientables de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω turbine. Cet arbre est relié à un multiplicateur de gain G qui, à son tour, entraîne une génératrice électrique comme le montre la figure (II.5).[5]

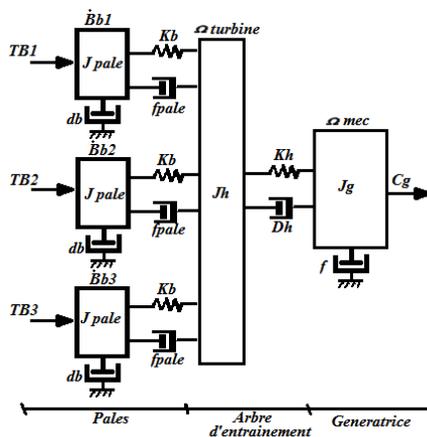


Figure II.5: Représentation du système mécanique de l'éolienne.

Les trois pales de conception identique possèdent la même inertie (J_{pale}), élasticité (K_b) et coefficient de frottement par rapport à l'air (db). Elles sont orientables et ont un coefficient de frottement identique par rapport au support ($fpale$). Les forces appliquées à chaque pale ($Tb1, Tb2, Tb3$) dépendent de la vitesse du vent qui leur est appliquée. L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par son inertie (J_h), élasticité (K_h) et coefficient de frottement par rapport au multiplicateur (D_h). Le rotor de la génératrice possède une inertie (J_g) et un coefficient de frottement (dg). Si l'on suppose une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. Le modèle mécanique résultant comporte deux masses, et leur validité par rapport au modèle complet a déjà été vérifiée. Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air (db) peut être négligé en raison de leur conception aérodynamique, tandis que les pertes de frottement du côté de la

génératrice sont plus importantes que les pertes par frottement de la turbine elle-même, en raison de sa vitesse très faible. [Usa 03]

II.4.5 Loi de Betz

L'éolienne est un système complet qui permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Trois facteurs sont à prendre en compte pour mesurer le taux de conversion de l'énergie mécanique : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. Les deux premiers sont des paramètres qui varient en fonction du site et du climat.[6] La loi de Betz, formulée pour la première fois par l'Allemand Albert Betz en 1929 [6], [7], permet de comprendre le processus d'extraction de l'énergie cinétique du vent. Elle stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 59% de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Un tube de courant entourant une éolienne à axe horizontal est représenté ci-dessous pour montrer les vitesses du vent en amont (V_1) et en aval (V_2) de l'aérogénérateur.

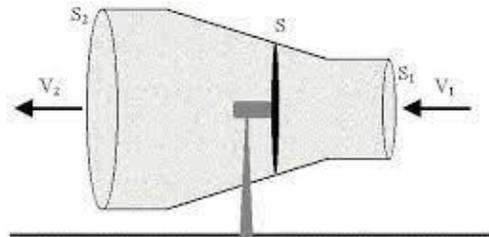


Figure II.6 : Canal de courant d'air autour d'une éolienne.

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par la relation

Suivante : [7],[8]

$$\mathbf{m_0} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II-1})$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval [9] :

$$\mathbf{P_m} = \frac{m_0 \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II-2})$$

En substituant l'expression de m_0 dans l'équation (II.2), on peut déduire l'expression de la puissance totale disponible sur la surface S :

$$\mathbf{P_{mt}} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II-3})$$

Le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est défini comme étant le coefficient de puissance, (C_p). [6], [7], [9] :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + (\frac{V_1}{V_2})) (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2}$$

La puissance aérodynamique est définie de la manière suivante :

$$P_{aér} = C_p P_{mt} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (II-4)$$

Le coefficient de performance, également connu sous le nom de coefficient C_p , est sujet à des variations qui dépendent de plusieurs facteurs, tels que la vitesse du vent, la vitesse de rotation de la turbine Ω_t et les caractéristiques des pales de la turbine, notamment l'angle d'incidence et l'angle de calage [6], [7], [8]. Ce coefficient peut être exprimé en termes de la vitesse spécifique λ . Selon les sources [6], [7], [8], la valeur maximale du coefficient de puissance possible, également appelée limite de Betz, correspond à $(16/27)$, soit 0,593.

En pratique, la limite de rendement théorique de BETZ n'est jamais entièrement atteinte, car les machines à axe horizontal bipales ou tripales ont une performance maximale de 60 à 65% de cette limite. Par conséquent, seulement 40% de l'énergie éolienne disponible peut être effectivement récupérée. L'expression du rendement aérodynamique est formulée de la manière suivante, conformément aux références [5] et [6] :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{pmax}$$

Le C_{pmax} est le rendement maximal qu'une turbine éolienne peut atteindre pour convertir l'énergie cinétique du vent en électricité. Il est influencé par la conception et les caractéristiques de la turbine ainsi que les conditions environnementales. Les fabricants d'éoliennes cherchent à améliorer constamment leur C_{pmax} pour augmenter la production d'énergie éolienne et leur rentabilité [6], [7].

II.4.6 Calcul du coefficient de puissance

Le $C_p(\lambda, \beta)$ est un indicateur de l'efficacité aérodynamique d'une éolienne et varie en fonction de ses caractéristiques. Plusieurs expressions de ce coefficient ont été suggérées dans des publications scientifiques [9, 10, 11] ainsi que par des fabricants d'éoliennes.

L'expression de coefficient de puissance utilisée dans notre étude est donnée par :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 * \left(C_2 * \frac{1}{\lambda_i} - C_3 * \beta - C_4 \right) * \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 * \lambda_i \quad (II-5)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008 * \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

$$C_1 = 0.5176 \quad C_2 = 116 \quad C_3 = 0.4 \quad C_4 = 5 \quad C_5 = 21 \quad C_6 = 0.0068$$

La variation du coefficient de puissance C_p , calculé à partir de l'équation (II.5), peut être représentée en fonction du rapport de vitesse λ pour différentes inclinaisons des pales β , comme illustré dans la figure (II.7).

Il est observé que le coefficient de puissance varie en fonction de l'angle d'orientation des pales et du ratio de vitesse, et qu'il atteint sa valeur maximale lorsque l'angle de calage des pales est de 0° et que le ratio de vitesse a une valeur optimale. Cette configuration permet de récupérer mécaniquement la puissance maximale de l'éolienne.

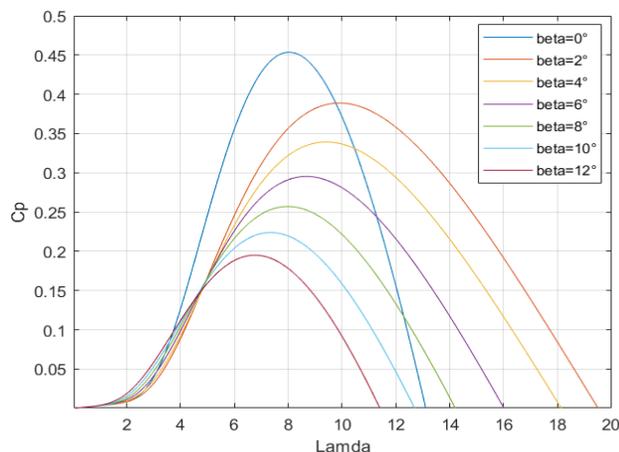


Figure II.7: Schéma du C_p en fonction du la vitesse spécifique.

II.4.7 Calcul de la vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio)

Le ratio de vitesse λ définit comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent, son expression est donnée comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R_t}{V} \quad (\text{II-6})$$

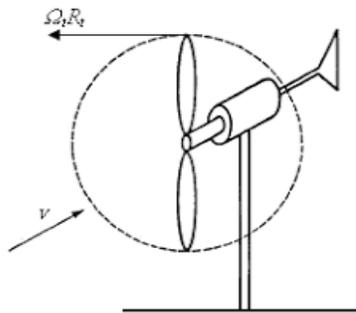


Figure II.8 : Représentation de la vitesse spécifique.

II.4.8 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est

modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$\mathbf{C}_g = \frac{\mathbf{C}_{aer}}{G} \quad (\text{II-7})$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (\text{II-8})$$

II.4.9 Équation dynamique de l'arbre

Le poids de la turbine éolienne est transféré à l'arbre de la turbine sous forme d'inertie, appelée $J_{turbine}$, qui comprend la masse des pales et du rotor de la turbine. Dans le modèle mécanique proposé, l'inertie totale J est prise en compte, composée de l'inertie de la turbine transmise au rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice elle-même.[5]

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (\text{II-9})$$

À partir du couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor, l'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique.

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II-10})$$

Le couple mécanique total considère le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , ainsi que le couple provenant du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II-11})$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II-12})$$

En utilisant les équations précédentes, nous sommes en mesure de construire le modèle de la turbine, dont le schéma bloc est représenté dans la figure ci-dessous. Les entrées du modèle de la turbine comprennent la vitesse du vent v , l'angle d'orientation des pales β et la vitesse de rotation de la turbine Ω_t .

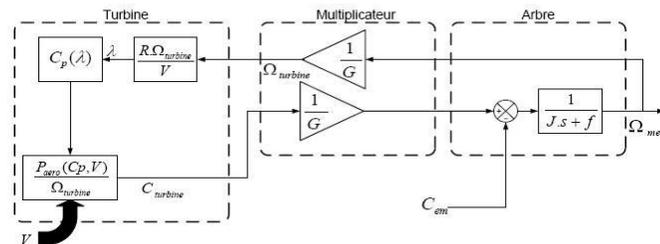


Figure II.9 : Schéma bloc de la turbine.

Le modèle de l'arbre analyse la dynamique de la vitesse mécanique et comporte ainsi deux variables d'entrées : le couple transmis par le multiplicateur et le couple électromagnétique généré par la génératrice.

D'après le modèle de l'arbre, la vitesse de la turbine peut être réglée en ajustant deux variables d'entrée : l'angle d'orientation des pales et le couple électromagnétique de la génératrice. Dans ce système, la vitesse du vent est considérée comme une perturbation externe.

II.4.10 Résultats de simulation en boucle ouverte

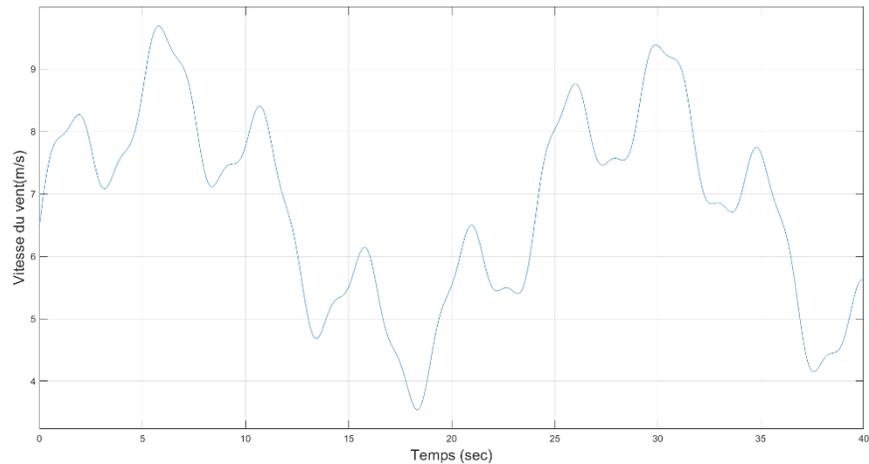


Figure II.10 : Allure de la vitesse du vent (m/s)

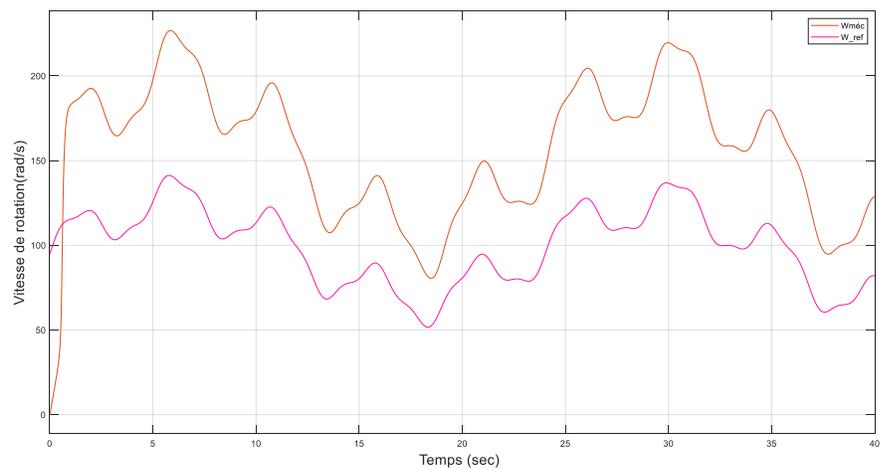


Figure II.11 : Allure de la vitesse de rotation (rad/s) .

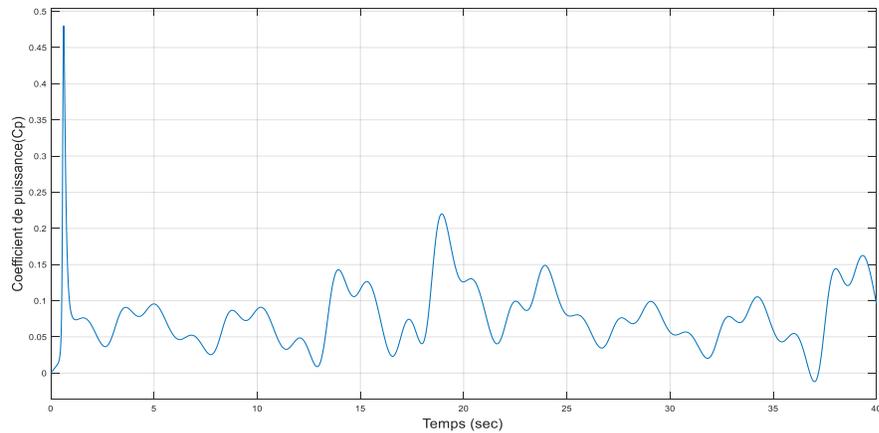


Figure II.12 : Allure du coefficient de puissance (Cp).

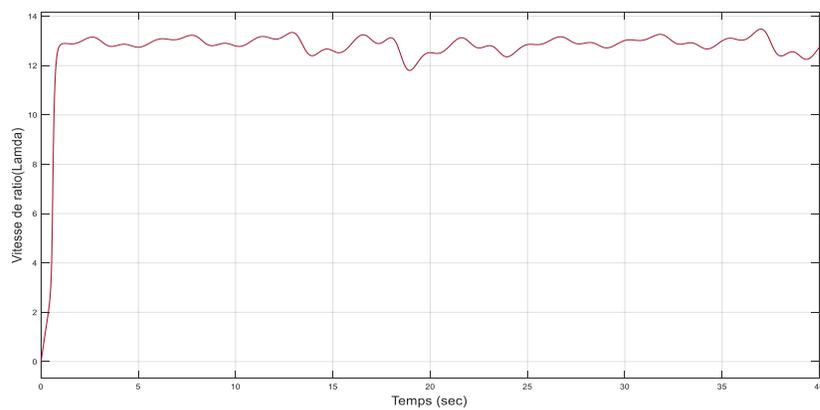


Figure II.13 : Allure de la vitesse spécifique.

Le modèle de la turbine a été vérifié par simulation dans l'environnement Matlab/Simulink. Nous avons obtenu ces résultats en boucle ouverte pour une puissance nominale de la turbine de 10 KW avec des paramètres bien précis, ces paramètres sont définis dans l'annexe A.

Le graphique (II.10) illustre le profil du vent avec une valeur moyenne de 6,5 m/s appliquée à la turbine.

En se référant à la Figure (II.11), on peut observer que la vitesse mécanique varie en fonction du vent, démontrant ainsi l'impact direct du vent sur la rotation de l'arbre. De plus, il est important de noter qu'il existe un écart considérable entre la vitesse mécanique et sa valeur de référence.

Les figures (II.12 et II.13) illustrent la variation du coefficient de puissance et de la vitesse spécifique au fil du temps. On peut observer que ces valeurs ne sont pas maintenues à leur niveau nominal ($C_{pnom} = 0.48$ et $\lambda_{nom} = 8.1$) et qu'elles varient en fonction des fluctuations du vent. Les performances dynamiques obtenues révèlent une sous-optimisation de la puissance extraite.

II.5 Stratégie de commande de la turbine

Les équations mathématiques de ce chapitre ont été utilisées pour modéliser la turbine de notre système. Les résultats ont montré que le système ne fonctionnait pas de manière optimale et suivait les fluctuations du vent. Afin d'optimiser la puissance extraite de la turbine, il est nécessaire d'appliquer la commande d'extraction du maximum de puissance (MPPT).

La MPPT est utilisée dans les systèmes éoliens pour maximiser la conversion de l'énergie éolienne en électricité. Elle trouve et maintient le point de puissance maximale (PPM) du générateur éolien, indépendamment des variations des conditions de vent. Le PPM est le point de fonctionnement optimal où la puissance de sortie est maximisée, dépendant de la vitesse du vent et des caractéristiques de l'éolienne. La MPPT utilise un algorithme de suivi qui mesure en continu la puissance de sortie du générateur éolien et ajuste les paramètres de fonctionnement, tels que la vitesse de rotation du rotor et l'angle des pales, pour maintenir le générateur proche du PPM. Le contrôleur MPPT compare la puissance de sortie actuelle avec la puissance maximale attendue à différentes vitesses de vent et ajuste les paramètres en conséquence pour rechercher et maintenir le point de puissance maximale. Grâce à la MPPT, l'énergie éolienne est convertie de manière plus efficace en électricité, augmentant ainsi la production et l'utilisation efficace de l'énergie éolienne, et maximisant le potentiel de génération d'électricité de l'éolienne.

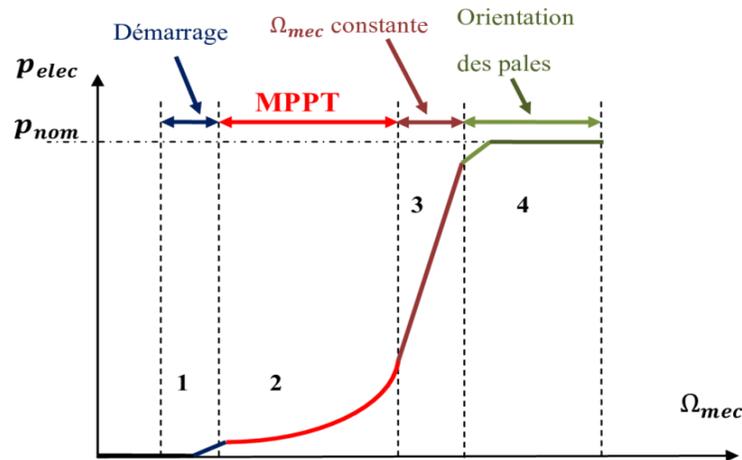


Figure II.14 : Caractéristiques puissance et vitesse éolienne.

Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées [1],[5] :

Zone 1 : La zone de démarrage de la machine débute lorsque la vitesse mécanique dépasse une valeur seuil appelée $\Omega_{cut} - in$.

Zone 2 : Une fois que la vitesse de la génératrice atteint un seuil prédéfini, un algorithme de commande est mis en œuvre pour maximiser l'extraction de puissance du vent. Pour atteindre ce maximum de puissance, l'angle des pales est maintenu à une valeur constante de 2 degrés. Ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'une certaine valeur

de vitesse mécanique soit atteinte.

Zone 3 : Au-delà de cette limite, l'éolienne maintient une vitesse constante. Pendant cette phase, la puissance générée par la génératrice augmente significativement, pouvant atteindre jusqu'à 90% de sa puissance nominale (P_{nom}).

Zone 4 : Une fois que la puissance générée atteint sa valeur nominale, une restriction est appliquée à l'aide du système d'orientation des pales appelé "pitch control". Lorsque la vitesse de rotation atteint $\Omega_{cut-out}$, un dispositif d'urgence est activé pour prévenir toute défaillance mécanique.

II.5.1 Maximisation de la puissance extraite dans la zone 2

L'objectif dans cette zone est d'optimiser la puissance éolienne en extrayant le maximum d'énergie du vent. Le système de contrôle est conçu pour ajuster la vitesse de rotation de l'éolienne afin de maintenir une valeur de vitesse spécifique $\lambda = \lambda_{opt}$, qui est optimale. Étant donné que l'angle de calage reste fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne atteint sa valeur maximale $C_{p_{max}}$ [10,13], ce qui permet de maximiser la puissance obtenue. Dans cette plage de fonctionnement à vitesse variable des éoliennes, la méthode utilisée pour optimiser la puissance est le MPPT (Maximum Power Point Tracking), une technique de contrôle fiable, robuste et simple à mettre en œuvre. Elle consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui génère le maximum de puissance. Afin d'avoir un contrôle total sur la vitesse de rotation de la turbine Ω_t , l'attention se porte sur la direction de variation de la grandeur $dP/d\Omega_t$. Lorsque nous atteignons le point de puissance maximale que nous recherchons, le gradient devient nul. Cette information est déduite de l'équation :

$$\frac{dP}{d\Omega_t} = \frac{dP}{dt} * \frac{d\Omega_t}{dt} \quad (\text{II-13})$$

Cette technique peut être résumée sur le tableau suivant :

Tableau II.1: Fonctionnement de la MPPT

dP/dt $d\Omega_t/dt$	<0	>0
<0	Ω croissante	Ω décroissante
>0	Ω décroissante	Ω croissante

II.5.2. Techniques d'extraction du maximum de la puissance

II.5.2.1 Bilan des puissances

L'équation (II-4) quantifie la puissance capturée par l'éolienne en fonction du coefficient C_p . L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable est préférable pour maximiser cette puissance, ce qui nécessite des stratégies de commande pour ajuster la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence, indépendamment de la vitesse du vent perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique $P_{aéro}$, après réduction des pertes telles que les frottements visqueux, est directement convertie en puissance électrique.[5]

$$P_{elec} = P_{aéro} - Pertes \quad (II-14)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J de l'arbre de la génératrice (P_{mec}) est définie comme le produit du couple mécanique (C_{mec}) et de la vitesse mécanique (Ω_{mec}) :

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (II-15)$$

II.5.2.2 Maximisation de puissance avec asservissement de la vitesse

Le vent est une variable aléatoire qui présente une forte fluctuation. Dans cette étude, nous ferons l'hypothèse que la machine électrique et son variateur sont idéaux, ce qui signifie que le couple électromagnétique développé est toujours égal à sa valeur de référence, indépendamment de la puissance générée.

$$C_{em} = C_{em_ref} \quad (II-16)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance visent à déterminer la vitesse optimale de la turbine en ajustant les trois couples (éolien, électromagnétique et résistant) pour maximiser la puissance générée. L'action conjointe de ces couples permet de réguler la vitesse mécanique de la turbine, avec le couple du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} comme principaux facteurs.

Le couple électromagnétique de référence C_{em_ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{em_ref} = C_{ass} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (II-17)$$

La vitesse mécanique de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer (Ω_{tur_ref}) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G \cdot \Omega_{tur_ref} \quad (II-18)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse $\lambda_{C_{pmax}}$ (à β constant et égal à 2°) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p .

$$\Omega_{tur_ref} = \frac{\lambda_{C_{pmax}} \cdot V}{R_t} \quad (II-19)$$

II.5.2.3. Conception de correcteur de vitesse par PI classique

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- ✓ Il est nécessaire de contrôler la vitesse mécanique afin de l'ajuster à sa valeur de référence.
- ✓ Il est nécessaire de réduire l'effet du couple éolien, qui agit comme une perturbation d'entrée.

Le régulateur PI est donné par la relation suivante :

$$C_{ass} = \frac{Kp_{-Wméc}}{S} \left(S + \frac{Ki_{-Wméc}}{Kp_{-Wméc}} \right) \quad (\text{II-20})$$

Par compensation pole par zéro en obtient :

$$\frac{f}{J} = \frac{Ki_{-Wméc}}{Kp_{-Wméc}} \quad (\text{II-21})$$

Voici la fonction de transfert en boucle fermée :

$$G(S) = \frac{Wméc}{Wref} = \frac{\frac{Kp_{-Wméc}}{J}}{S + \frac{Kp_{-Wméc}}{J}} \quad (\text{II-22})$$

La fonction de transfert du système de premier ordre est exprimée de la manière suivante :

$$G(S) = \frac{1}{\tau S + 1} \quad (\text{II-23})$$

Avec :

$$\tau = \frac{J}{Kp_{-Wméc}}$$

D'où :

$$Kp_{-Wméc} = \frac{J}{\tau} \quad \text{et} \quad Ki_{-Wméc} = \frac{f}{\tau}$$

En se basant sur les formulations de la turbine éolienne exposées dans ce chapitre, on peut dériver le schéma bloc pour maximiser la puissance extraite tout en maintenant un asservissement de la vitesse mécanique.

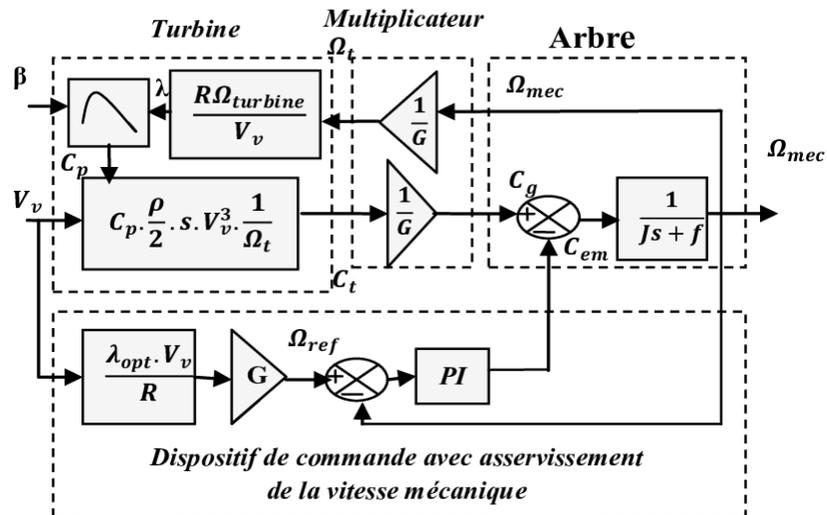


Figure II.15 : Schéma bloc de la MPPT avec asservissement de la vitesse.

II.5.3 Résultats de simulation

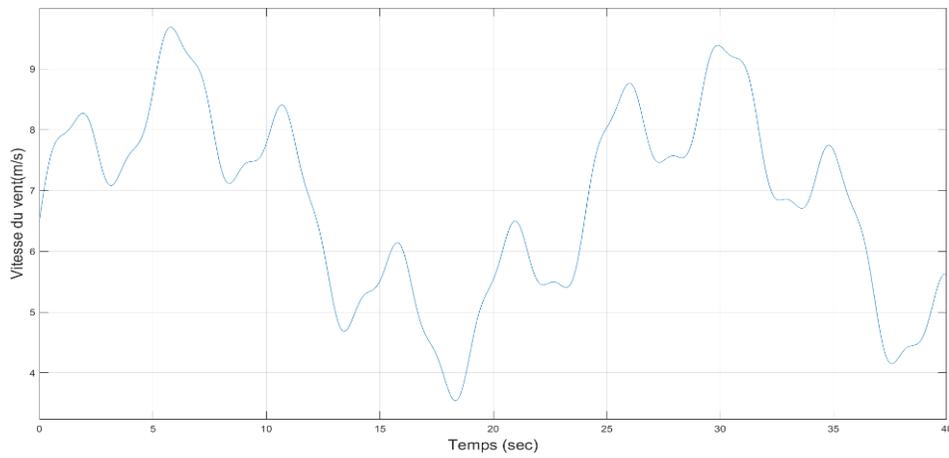


Figure II.16 : Profil du vent.

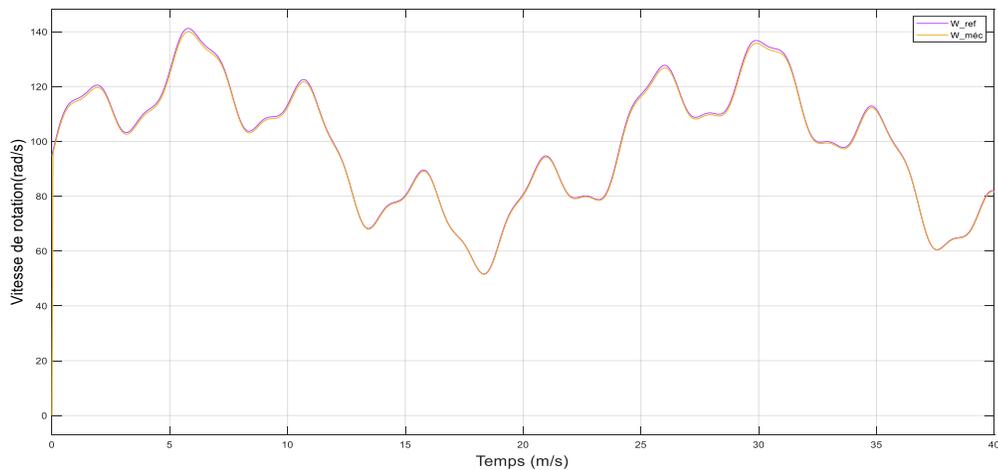


Figure II.17 : Vitesse de rotation

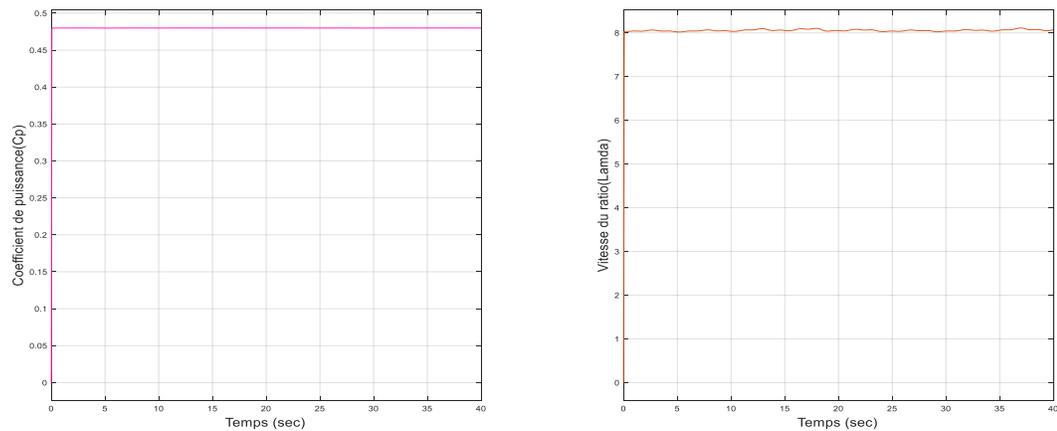


Figure II.18 : coefficient de puissance et la vitesse spécifique

La figure (II.17) : représente la vitesse réelle de rotation de la turbine éolienne avec la vitesse de référence souhaitée. L'objectif est de maintenir la vitesse réelle aussi proche que possible de la vitesse de référence, ce qui indique que la stratégie adaptée présente une bonne capacité d'asservissement ..

La figure (II.18) : montre l'évolution du coefficient de puissance de la turbine éolienne et la vitesse spécifique. Les courbes du coefficient de puissance et de la vitesse spécifique montrent une certaine stabilité à leur valeur optimale ce qui indique une bonne optimisation de la turbine pour maximiser la puissance de sortie.

En interprétant ces graphiques, on peut évaluer l'efficacité de l'asservissement de vitesse et la maximisation de la puissance dans la simulation de la turbine éolienne.

II.6 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

II.6.1 Introduction

La demande croissante d'énergie dans l'industrie est largement due à l'augmentation de l'utilisation des machines électriques dans divers domaines. Les alternateurs basés sur les machines synchrones sont la principale source d'énergie électrique, qu'ils soient entraînés par des turbines hydrauliques, à vapeur ou éoliennes. Ces machines constituent les plus grands convertisseurs d'énergie au monde. Dans le cas de la machine à aimants permanents MSAP, les aimants remplacent l'inducteur. Le champ d'excitation généré par les aimants permanents présente l'avantage d'éliminer les balais et les pertes rotoriques. Dans cette partie étudions cette machine afin de la contrôler, ce qui nécessite de la représenter sous la forme d'un modèle mathématique. [14]

II.6.2 Description de la machine

L'alternateur se compose de deux parties : une partie fixe et une partie rotative. Le stator, également appelé induit, est constitué d'un noyau en tôles laminées prenant la forme d'un cylindre creux. Les bobines constituant cet enroulement sont décalées de $2\pi/3$ radians. Le rotor, ou inducteur, est composé de p pôles nord et p pôles sud qui sont disposés de manière alternative. Ces pôles sont créés soit par des bobines alimentées en courant continu, soit par des aimants permanents. Le rotor peut être soit à pôles saillants, c'est-à-dire avec des pôles distincts, soit à pôles lisses, où les pôles sont plus uniformes et réguliers. [15,16]

II.6.3 Principe de fonctionnement de la GSAP

Le stator de la génératrice synchrone, qui est entraîné mécaniquement, génère un champ magnétique qui varie dans les enroulements du stator. Les forces électromotrices (f.é.m.) induites dans ces enroulements provoquent la circulation de courants induits, qui à leur tour, engendrent un champ magnétique dans l'entrefer du stator. Ce champ magnétique tourne à la même vitesse que le champ inducteur. [15,16]

II.6.4 Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents

Le modèle mathématique de la machine synchrone suit certaines hypothèses fondamentales simplificatrices [17],[18] :

- ✓ L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- ✓ La FMM (Force Magnétomotrice) générée par les enroulements du stator se présente sous la forme d'une distribution sinusoïdale.
- ✓ L'effet de l'hystérésis est négligé en présence des courants de Foucault et de l'effet de peau.
- ✓ L'effet d'encochage est négligeable.

- ✓ La température n'a pas d'impact sur la résistance des enroulements.

La configuration de la machine synchrone à aimants permanents comprend un enroulement triphasé au niveau du stator. L'excitation du rotor est assurée par des aimants permanents fixés sur le rotor.

II.6.5 Équations de la GSAP dans le repère abc :

Les équations électriques des machines électriques sont formulées dans un repère fixe attaché au stator, comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II-24})$$

Les enroulements statoriques de la machine synchrone sont connectés en étoile avec un neutre isolé. En conséquence, la somme instantanée des courants statoriques est égale à zéro et il n'y a pas de courant homopolaire.

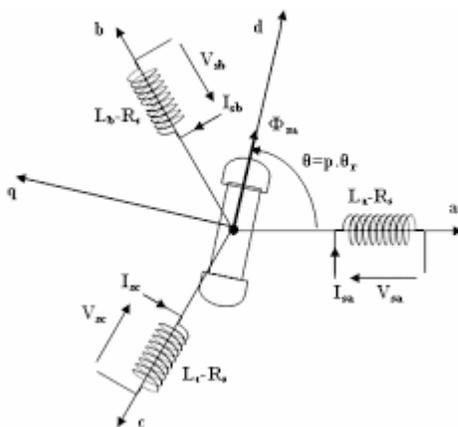


Figure II.19 : Représentation de la GSAP dans le repère triphasés

II.6.6 Modèle de la machine synchrone dans le repère de PARK

Pour simplifier le modèle dynamique de la machine, nous effectuons un changement de repère. Cette transformation mathématique convertit les trois bobines statoriques fixes, déphasées de $2\pi/3$, en deux bobines fictives équivalentes, déphasées de $\pi/2$.

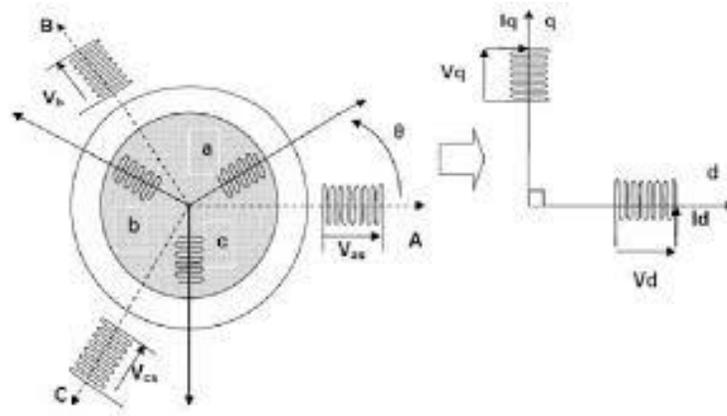


Figure II.20 : Passage du repère triphasés à repère du park

Les deux bobines d et q, en tournant avec le rotor, engendrent le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q) nous permettent de passer du repère naturel au repère de Park, ce qui simplifie relativement le modèle de la machine [14].

La matrice de Park s'exprime par :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-25})$$

La transformation inverse de Park est donné par :

$$P(\theta)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II-26})$$

II.6.6.1 Equations magnétiques

Les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, présentes les grandeurs électriques Φ_{sd} et Φ_{sq} sont directement proportionnelles aux courants I_{sd} et I_{sq} :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_d I_{sd} + \Phi_f \\ \Phi_{sq} = L_q I_{sq} \end{cases} \quad (\text{II-27})$$

L_d et L_q sont les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de θ .

En utilisant la convention génératrice ; on inverse le sens des courant d i et q i dans les repères de Park, et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} - L_d \frac{d}{dt} I_{sd} + \omega L_q I_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} - L_q \frac{d}{dt} I_{sq} - \omega L_d I_{sd} + \omega \Phi_f \end{cases} \quad (\text{II-28})$$

II.6.6.2 Équation du couple électromagnétique

La détermination du couple électromagnétique C_{em} se fait en prenant la dérivée partielle de l'énergie électromagnétique stockée par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [14] :

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = p \frac{dW_e}{d\theta_e} \quad (\text{II-29})$$

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par :

$$P_t = \frac{3}{2} (V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq}) \quad (\text{II-30})$$

En remplaçant V_d , V_q par leurs expressions, on aura :

$$P_t = \frac{3}{2} \left[-R_s (I_{sd}^2 - I_{sq}^2) - \left(I_{sd} \frac{d\phi_{sd}}{dt} + I_{sq} \frac{d\phi_{sq}}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}) \right] \quad (\text{II-31})$$

$\frac{3}{2} [-R_s (I_{sd}^2 - I_{sq}^2)]$: Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \left(I_{sd} \frac{d\phi_{sd}}{dt} + I_{sq} \frac{d\phi_{sq}}{dt} \right)$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

$\frac{3}{2} \left[\frac{d\theta}{dt} (\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}) \right]$: Représente la puissance électromagnétique.

Sachant que:

$$\omega = p\Omega \quad \text{et} \quad P_{em} = C_{em}\Omega \quad (\text{II-32})$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p (\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II-33})$$

On peut écrire :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p [(L_q - L_d) I_{sd} I_{sq} + I_{sq} \Phi_f] \quad (\text{II-34})$$

II.6.6.3 Equations mécaniques

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit :

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II-35})$$

II.7 Commande vectorielle de la Génératrice Synchrones à aimants permanents

La commande des machines à courant alternatif présente des obstacles en raison de la non-linéarité du modèle mathématique du système et de son fort couplage [19].

Pour atteindre les objectifs de contrôle, il est nécessaire d'insérer régulateurs, qui maintiennent les variables réglées à des valeurs spécifiques, même en présence de perturbations. En définissant leurs propres procédures et paramètres, il est possible d'obtenir le comportement désiré en boucle fermée, ce qui détermine les performances du système. Parmi ces régulateurs, le régulateur PI est une combinaison d'un régulateur proportionnel et d'un régulateur intégral. En les ajustant correctement, les avantages de l'un compensent les inconvénients de l'autre [20].

II.7.1. Principe de la commande vectorielle

La commande vectorielle fonctionne de la même manière que la commande d'une machine à courant continu avec excitation séparée. Cependant, il est nécessaire de se référer à un système de coordonnées spécifique où le couple électromagnétique peut être simplement exprimé en fonction des courants le long des deux axes (axe d et axe q). La composante d'axe 'd' du courant statorique est utilisée pour réguler le flux dans la machine, jouant ainsi le rôle de l'excitation. La composante d'axe 'q', quant à elle, agit comme le courant d'induit et permet de contrôler le couple [21].

Pour appliquer la commande vectorielle, il est nécessaire que l'axe de la composante iq soit décalé de 90 degrés par rapport au flux rotorique. Par conséquent, la composante id du courant statorique doit être alignée avec le flux rotorique. Si le courant id a la même direction que le flux rotorique, le flux statorique le long de l'axe 'd' s'ajoute au flux des aimants, ce qui entraîne une augmentation du flux d'entrefer (sur-excitation). D'autre part, si le courant id est négatif, le flux statorique s'oppose à celui du rotor, ce qui entraîne une diminution du flux d'entrefer (sous-excitation). Le courant id doit être nul lorsque le système fonctionne à un couple constant [22].

$$I_d = 0 \quad \text{et} \quad I_q = I_s \quad (\text{II-36})$$

Donc :

$$\Phi_d = \Phi_f \quad (\text{II-37})$$

La forme du couple électromagnétique à flux constant est de la forme suivante :

$$C_{em} = K_t I_q \quad (\text{II-38})$$

Avec :

$$K_t = \frac{3}{2} p \Phi_f$$

On remarque que le couple est directement proportionnel à I_q .

II.7.2 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Elle est précise et rapide ✓ Elle est basée sur le modèle transitoire ✓ Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Présence de transformation de coordonnées dépendant d'un angle θ_s estimé. ✓ Faible robustesse aux variations paramétriques.

II.7.3 Conception du correcteur de courants par un PI classique

Selon le modèle de la GSAP :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} - L_d \frac{d}{dt} I_{sd} + \omega L_q I_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} - L_q \frac{d}{dt} I_{sq} - \omega L_d I_{sd} + \omega \Phi_f \end{cases} \quad (\text{II-39})$$

les courants i_{sd} et i_{sq} sont liés entre eux. Les termes $p \Omega_{mec} L_d i_{sq}$ et $p \Omega_{mec} L_q i_{sd}$ représentent les termes de couplage entre les axes d et q.

Ces termes de couplage sont souvent considérés comme des perturbations internes et sont généralement compensés par les régulateurs de courant en régime permanent à l'aide d'intégrateurs. Cependant, leur réponse est souvent lente. Il est donc possible de les compenser en utilisant une méthode de découplage, qui comprend d'ajouter des termes identiques mais de signes opposés à la sortie des régulateurs de courant, afin de séparer complètement les boucles de régulation des axes d et q, comme illustré dans la Figure (II.21) [1].

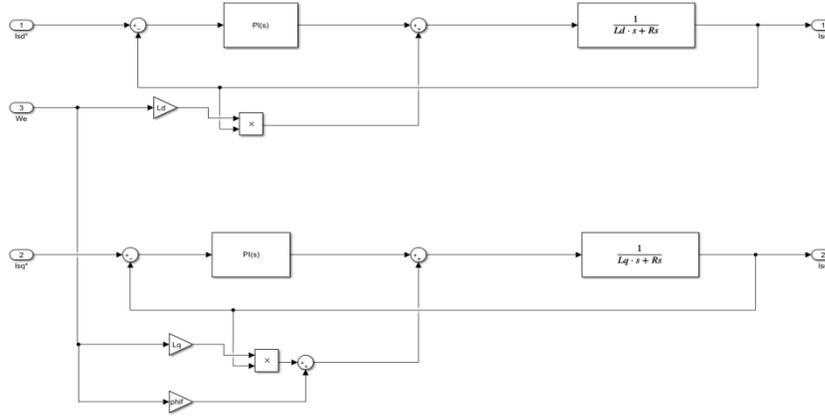


Figure II.21: Schéma bloc du découplage

Avec :

$$ed = -\omega L_d I_{sd} \quad et \quad eq = \omega(L_q I_{sq} + \phi_f)$$

II.7.3.1 Synthèse du régulateur de courant Isd

Pour assurer la régulation du courant, un régulateur PI est utilisé, comprenant une action proportionnelle qui ajuste la vitesse de régulation et une action intégrale qui élimine l'erreur statique entre la grandeur mesurée et la grandeur de référence. Le dimensionnement du régulateur PI repose sur la dynamique en boucle fermée, en utilisant la technique de l'imposition de pôle.

La dynamique de la machine relative à la partie électrique est égale à :

$$A(S) = \frac{1}{L_d S + R_s} = \frac{b}{S + a} \quad (II-40)$$

$$\text{Avec : } a = \frac{R_s}{L_d} \quad et \quad b = \frac{1}{L_d}$$

La constante du temps et le temp de réponse sont définis en boucle ouverte par les deux relations suivantes :

$$\tau_{isd_BO} = \frac{1}{a} \quad t_{risd_BO} = 3\tau_{isd_BO} = \frac{3}{a} \quad (II-41)$$

Par compensation on trouve :

$$\frac{K_{i_isd}}{K_{p_isd}} = a \quad (II-42)$$

La fonction de transfert du régulateur devient :

$$\frac{i_{sd}}{i_{sd}^*} = \frac{K_{p_isd} * b}{K_{p_isd} * b + S} \quad (\text{II-43})$$

Avec une constante de temps :

$$\tau_{isd_BF} = \frac{1}{K_{p_isd} * b} \quad (\text{II-44})$$

Et un temps de réponse :

$$t_{risd_BF} = 3\tau_{isd_BF} = \frac{3}{K_{p_isd} * b} \quad (\text{II-45})$$

Il est généralement préférable que le temps de réponse en boucle fermée soit plus rapide que celui en boucle ouverte, ce qui conduit à l'équation suivante :

$$t_{risd_BF} = \frac{t_{risd_BO}}{h} \quad (\text{II-46})$$

h : constant supérieure à 1

$$\text{Donc : } K_{p_isd} = \frac{3}{t_{risd_BF} * b} \quad \text{et} \quad K_{i_isd} = a * K_{p_isd} \quad (\text{II-47})$$

II.7.3.2 Synthèse du régulateur de courant Isq

De la même manière que le réglage précédent, on obtient :

$$t_{risq_BF} = \frac{t_{risq_BO}}{h} \quad (\text{II-48})$$

$$K_{p_isq} = \frac{3}{t_{risq_BF} * b} \quad \text{et} \quad K_{i_isq} = a * K_{p_isq} \quad (\text{II-49})$$

II.8 Simulation de la cascade (Turbine, Génératrice synchrone à aimants permanents)

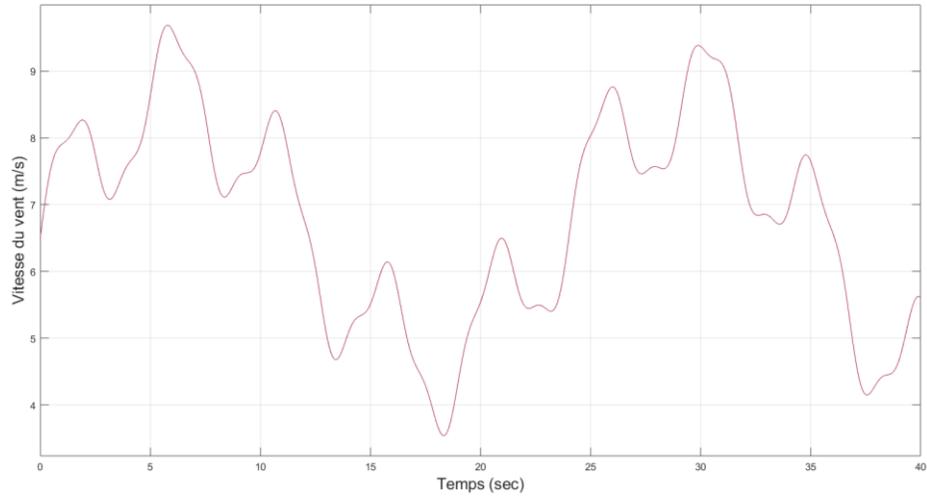


Figure II.22: Profil du vent

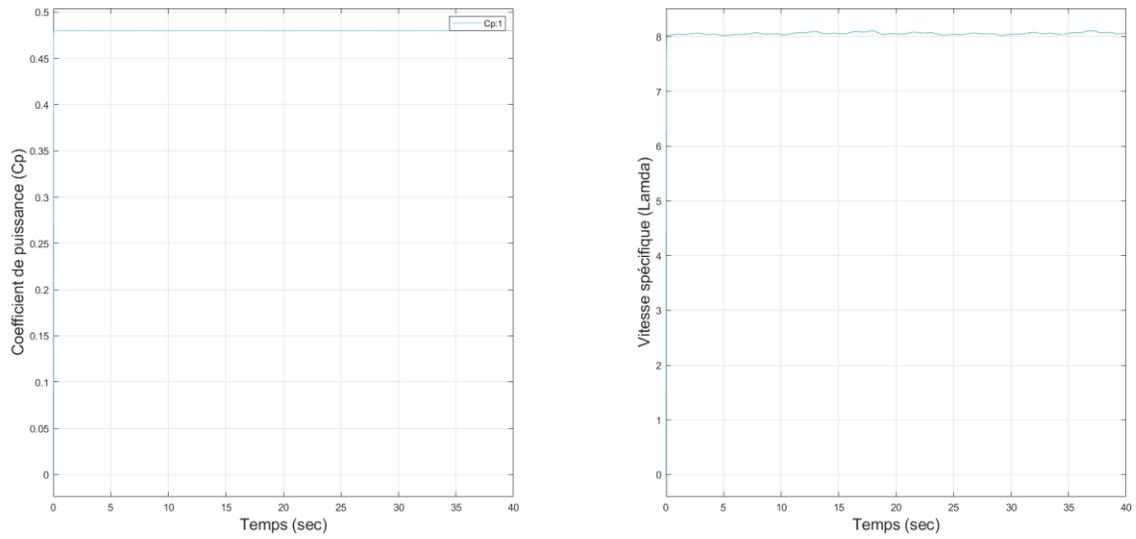


Figure II.23: coefficient de puissance et la vitesse spécifique

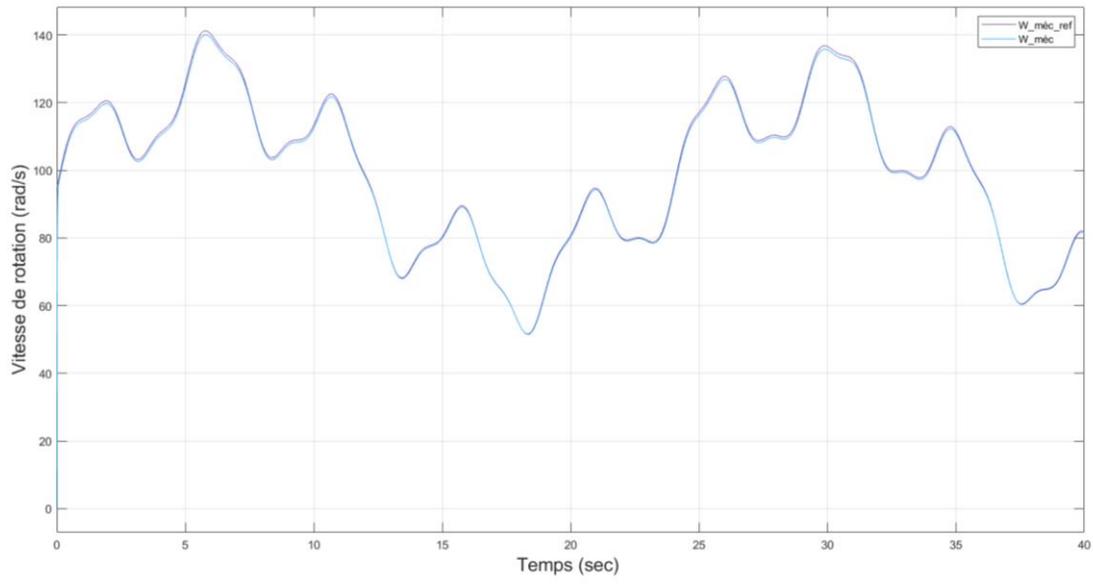


Figure II.24: Vitesse de rotation

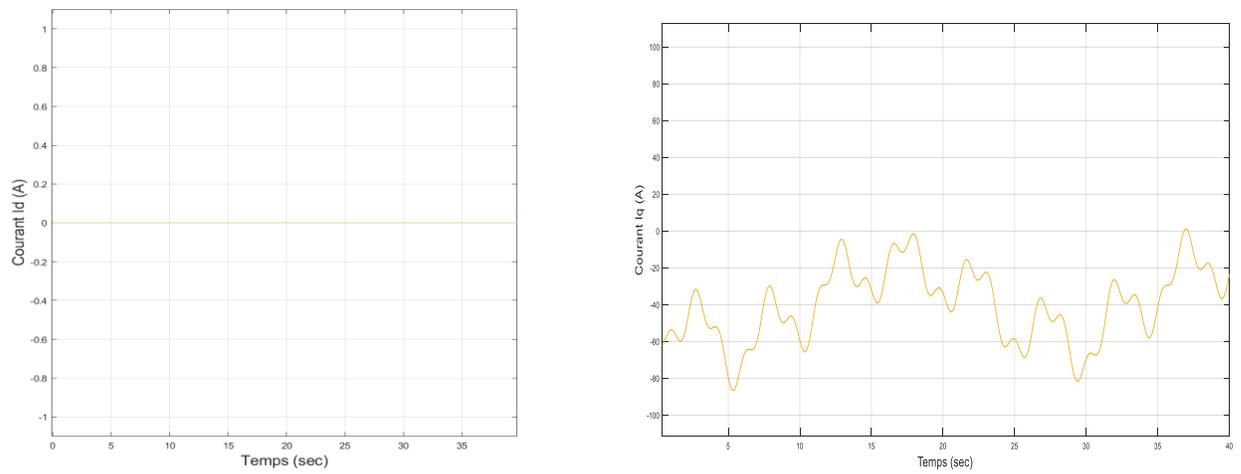


Figure II.25: Courants direct et quadrature

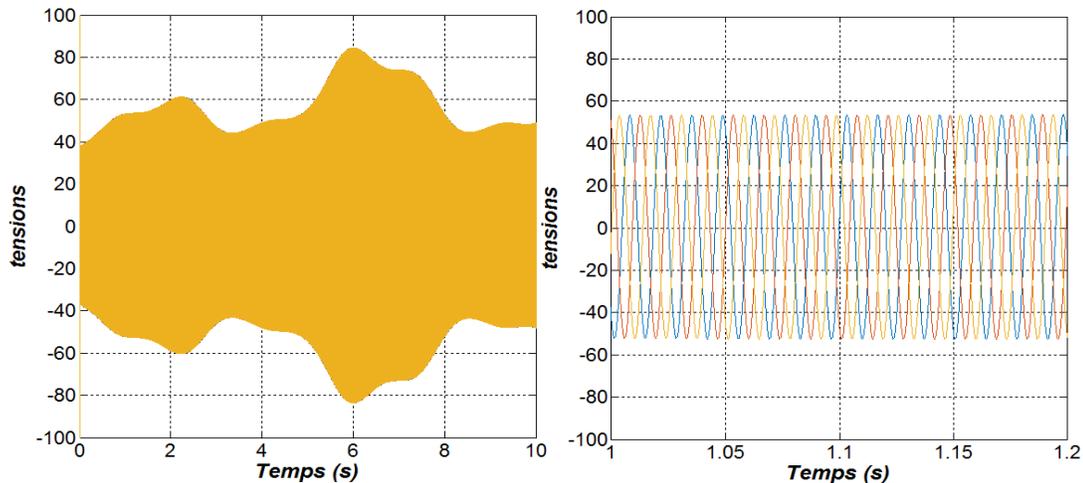


Figure II.26: Tensions triphasées Vabc

II.8 .1.Interprétation des résultats

La figure (II.22) : Ce graphe montre comment la vitesse du vent fluctue au cours de cette simulation. Elle est variable avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Nous observons les variations de la vitesse du vent, qui peuvent être dues à des conditions météorologiques changeantes.

La figure (II.23) : Ce graphe indique que le coefficient de puissance est constant avec une valeur de 0.48. Cela signifie que l'éolienne maintient un niveau d'efficacité constant pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique tout au long de la simulation. Et la vitesse spécifique est constante avec une valeur de 8.1. Cette vitesse spécifique est une mesure de la relation entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation de l'éolienne. Une valeur constante indique que la conception de l'éolienne est optimisée pour cette condition spécifique.

La figure (II.24) : Ce graphe représente la vitesse de rotation au fil du temps. Nous observons les variations de la vitesse de rotation qui sont influencées par les variations de la vitesse du vent et les caractéristiques de l'éolienne.

La figure (II.25) : Ce graphe montre les courants dans les axes d- et q- de la génératrice synchrone à aimant permanent. Les courants Idq sont représentés, avec Id égal à zéro et Iq ayant une valeur négative. Ces graphiques reflètent les fluctuations des courants qui sont générés en fonction des variations de la vitesse de rotation et du vent, et le bon asservissement de la technique appliquée.

La figure (II.26) : Ce graphe représente les tensions triphasées qui sortent de la génératrice synchrone à aimant permanent. On remarque qu'elles suivent la fluctuation du vent, ce qui représente un impact néfaste si on veut coupler notre système au réseau.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi les modèles de deux composants essentiels du système de conversion

éolienne. La première partie concernait la turbine. Quant à la deuxième partie, elle concernait la machine synchrone à aimants permanents en fonctionnement génératrice. En modélisant ces deux parties, nous avons constaté que le modèle de la turbine est fortement influencé par les variations du vent, tandis que le modèle de la machine synchrone à aimants permanents correspond à un système à plusieurs variables fortement couplées. C'est pourquoi il était nécessaire de mettre en place des stratégies de contrôle.

II.10 références bibliographiques

- [1] S.ZINE « Commande d'une éolienne à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents » thèse de doctorat de l'université des sciences et de technologie d'Oran.2017
- [2] [<https://www.energy.gov/eere/wind/how-do-wind-turbines-work#learn,23:30>]
- [3] ZIANE, Khaled. Analyse, Évaluation et Réduction des Risques d'un Parc Éolien. 2017. Thèse de doctorat. Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed.
- [4] MELLOUL, A : Simulation et diagnostic d'une machine asynchrone à double alimentation d'une éolienne. Mémoire de magister, Université de Sétif, 2011
- [5] Salma EL AIMANI. modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. Thèse de doctorat. Université des sciences et technologies de Lille.2010
- [6] M. Messaoud, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent ». Thèse de Magistère de l'université de Batna. 2008
- [7] Dr. Gary L. Johnson, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov, 2001
- [8] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éoliennes », Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [9] N. Laverdure, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». thèse doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble, 2005.
- [10] B. Boukhezzar. « Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable ». Thèse de doctorat, université paris XI, France 2006.
- [11] S. Gassab, « Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne » mémoire de magister de l'Université Ferhat Abbas – Sétif, décembre 2011
- [12] S. Hassaine, « Application des nouvelles techniques de commande de la machine synchrone à aimants permanents » thèse de doctorat de l'université des sciences et de technologie d'Oran.2008
- [13] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier, " Introduction à l'électrotechnique approfondie ", Technique et documentation, Paris, 1981, ISBN 2-85206-089-2..
- [14] H. Camblong. « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable ». Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'arts et Métiers, France 2003.
- [15] M. MAYOUF « ETUDE comparative des architectures et stratégies de contrôle d'un aérogénérateur

synchrone a aimants permanents » Université d'Al Hadj Lakhdar –Batna 2014.

[16] S. Mme HAMECHA, Ep.BOUREKACHE« Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents » Mémoire de Magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2013.

[17] F. DIONE, « étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne a base de machine synchrone a aimants permanents » Mémoire de master Université d'annaba 2018.

[18] R. Abdessamad, M. Kaoudji, « Modélisation des Machines Electriques », Presses de l'Université de Batna 1997.

[19] B. N. Mobarkah, « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne' des paramètres », thèse de doctorat de l'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001.

[20] S. ZEGHOUDI, « Commande Par Passivite De La Machine Synchrone A Aimants Permanents », Mémoire de master, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen,2015.

[21] I.Touaimi Med ,A.Douaer Med, « Commande Par Passivite De La Machine Synchrone A Aimants Permanents », Mémoire de master , Université de Djilali BOUNAÂMA Khemis Miliana– Tlemcen,2016/2017.

[22] M. Latereche « Commande floue de la machine synchrone à aimant permanant utilisée dans un système éolien », thèse de Magister en électrotechnique. Le 24/06/2012..

[Usa 03]] J. Usaola, P. Ledesma, J. M. Rodriguez, J. L. Fernadez, D. Beato, R. Iturbe, J. R. Wihelmi, "Transient stability studies in grids with great windpower penetration. Modelling issues and operation requirements", 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas (USA), CD.

[Lou-16] M. Loucif, « Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur », Thèse de doctorat en Modélisation et commande, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2016.

[Mas-18] S. Massoum, « contrôle avec les techniques de l'intelligence artificielle d'une source d'énergie éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation », thèse de doctorat en commande électrique, université DJILLALI LIABES de Sidi-Bel-Abbès, Algérie, 2018.

Chapitre III

Raccordement de la chaîne hybride au Réseau

III.1 Introduction

Une chaîne hybride éolienne-photovoltaïque connectée au réseau est un système qui combine à la fois des éoliennes et des panneaux solaires pour capturer l'énergie disponible dans le vent et le rayonnement solaire.

Les systèmes de génération éolienne et photovoltaïque sont les plus prometteurs parmi les technologies de production d'énergie renouvelable. Les systèmes d'énergie hybrides sont adaptés à une production connectée au réseau ou bien décentralisée, ils peuvent contribuer à résoudre plusieurs problèmes d'approvisionnement énergétique[1][2].

Les convertisseurs sont utilisés pour raccorder différents types de systèmes électriques au réseau électrique principale et permet d'adapter la fréquence du courant afin de le rendre compatible avec le réseau électrique.

Ce chapitre se penche sur le raccordement d'un système hybride combinant l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque, afin de les interconnecter à un réseau à travers un même bus continu à l'aide de convertisseurs[3].

III.2. Description de système hybride

un système hybride est un système qui combine différentes sources d'énergie ou technologies pour répondre aux besoins énergétiques de manière plus efficace, fiable et durable. Ces systèmes sont de plus en plus utilisés dans divers domaines tels que les systèmes de production d'énergie renouvelable. La classification d'un système hybride dépendra de sa configuration spécifique, de son contexte d'application et de ses caractéristiques. la figure 3.1 présente la classification des systèmes hybrides.

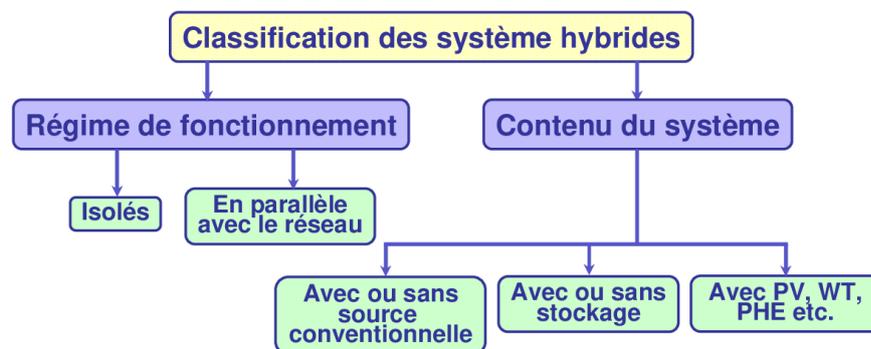


Figure III.1. Classification des systèmes hybrides

III.2.1 MODELISATION DE CONVERTISSEUR MLI1 :

Le redresseur de tension utilise un contrôle en boucle fermée pour maintenir la tension du bus

continu à une valeur de référence souhaitée. Pour cela, la tension du bus continu (V_{dc}) est mesurée et comparée à une référence (V_{dc-ref}). Le signal d'erreur issu de cette comparaison est utilisé pour activer et désactiver les interrupteurs du redresseur. Ainsi, la puissance peut circuler dans les deux sens en fonction de la tension du bus continu mesurée aux bornes du condensateur C.

Lorsque le courant i_{dc} est positif, indiquant le fonctionnement du redresseur, le condensateur C se décharge. Le signal d'erreur demande au bloc de commande de fournir plus de puissance provenant de la source alternative. Le bloc de commande génère ensuite un signal MLI approprié pour les six interrupteurs du système. Cela permet un flux de courant plus élevé de la source alternative vers le côté continu, ce qui entraîne la récupération de la tension du condensateur C. Inversement, lorsque le courant i_{dc} devient négatif, indiquant le (fonctionnement de l'onduleur), le condensateur C se surcharge. Le signal d'erreur demande alors au bloc de commande de décharger le condensateur, renvoyant ainsi la puissance vers la source alternative[6].

Les tensions d'entrée entres phases du redresseur peuvent être décrites par :

$$V_{sab} = (S_a - S_b) \cdot V_{dc} \quad (\text{III -1})$$

$$V_{sbc} = (S_b - S_c) \cdot V_{dc}$$

$$V_{sca} = (S_c - S_a) \cdot V_{dc}$$

La variation des tensions absorbés, dans le cas d'un réseau triphasé équilibré, est alors donnée par les équations du system suivant :

$$V_{sa}(t) = \frac{Ldi_a(t)}{dt} + V_a(t) + Ri_a(t) \quad (\text{III -2})$$

$$V_{sb}(t) = \frac{Ldi_b(t)}{dt} + V_b(t) + Ri_b(t) \quad (\text{III -3})$$

$$V_{sc} = \frac{Ldi_c(t)}{dt} + V_c(t) + Ri_c(t) \quad (\text{III -4})$$

Les tensions simples s'expriment en fonction des ordres de commande par la relation ci-dessous :

$$\begin{matrix} V_a(t) \\ V_b(t) \\ V_c(t) \end{matrix} = \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-5})$$

En substituant l'équation (V.2) dans (V.3) et on écrit sous forme matricielle :

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa}(t) \\ V_{sb}(t) \\ V_{sc}(t) \end{bmatrix} - \frac{v_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

Après la transformation de Laplace on obtient:

$$(Ls + R) \begin{bmatrix} ia(t) \\ ib(t) \\ ic(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Vsa(t) \\ Vsb(t) \\ Vsc(t) \end{bmatrix} - \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Sa \\ Sb \\ Sc \end{bmatrix} \quad (III-7)$$

Le courant débité par le redresseur est donné en fonction des courants prélevés sur le réseau par l'expression ci-après:

$$i_l = sa * isa + sb * isb + sc * isc \quad (III-8)$$

Le schéma fonctionnel du redresseur est représenté comme suit :

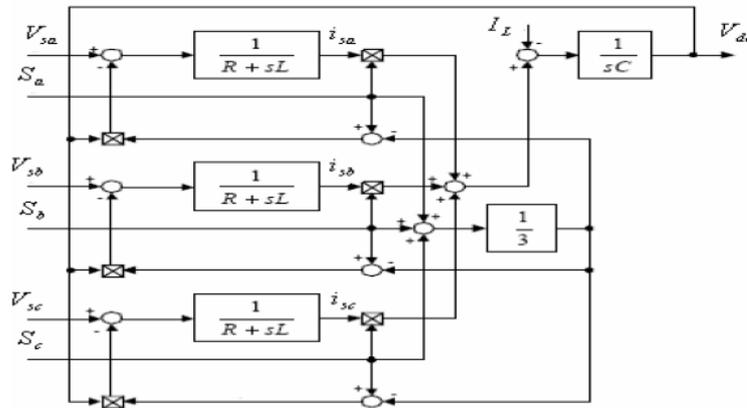


Figure III.2 : Schéma du redresseur

III.2.2. Commande en tension par MLI sinus-triangle

la méthode (MLI) sinus-triangle est une méthode utilisée pour contrôler la tension de sortie d'un convertisseur de puissance en comparant une onde sinusoïdale de basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse triangulaire de haute fréquence. Les points d'intersection entre la porteuse et la tension de référence déterminent les instants de commutation des interrupteurs, fixant ainsi la fréquence de commutation.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres : l'indice de modulation m, et le taux de modulation r tel que :

L'indice de modulation (m), égal au rapport des fréquences de modulation et de références.

$$m = \frac{f_p}{f} \quad (III-9)$$

Le coefficient de réglage en tension (r), égal au rapport de l'amplitude de la référence et de la valeur de crête de modulation .

$$r = \frac{Am}{Amp} \quad (III-10)$$

III.2.3. Modélisation de bus continu

Le bus continu est le condensateur situé entre les deux convertisseurs ; sa fonction est de maintenir une tension continue stable [8]. Le modèle de bus continu est exprimé par :

L'évolution temporelle de la tension à ses bornes est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif [9]:

$$V_{dc} = \frac{1}{C} \int_0^t I_c \cdot dt \quad (\text{III-11})$$

Le courant dans le condensateur est issu d'un nœud à partir duquel circulent les courants modulés par la source hybride et le CCR :

$$I_c = I_{hyb} - I_{CCR} = (I_{eol} + I_{pv}) - I_{CCR} \quad (\text{III-12})$$

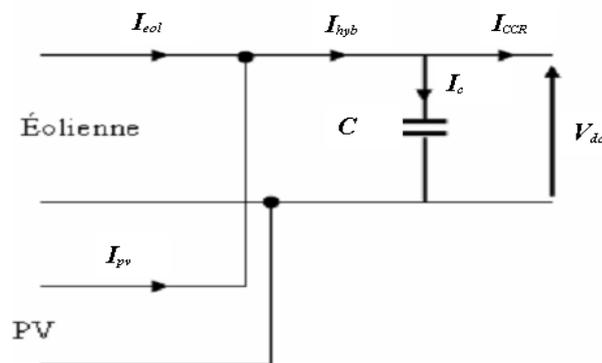


Figure III.3 : Schéma du bus continu

III.2.4 Régulation de bus continue

La régulation de la tension du bus continu dans un système hybride solaire-éolien pour les bus est essentielle pour maintenir une tension constante. Cela est généralement réalisé à l'aide d'une boucle de régulation avec un correcteur proportionnel intégral (PI). Le PI ajuste la tension en fonction de l'écart entre la tension mesurée et la référence. Cette boucle de régulation permet de contrôler le processus de charge et de décharge du condensateur, assurant ainsi un fonctionnement stable du système. La régulation du bus continu garantit une utilisation efficace de l'énergie solaire et éolienne tout en maintenant une tension optimale pour les composants électriques du bus[4].

À partir de cette comparaison est employé pour produire une forme d'onde pour la référence du courant.

$$I_{max} = Gc(V_{dc_{ref}} - V_{dc}) \quad (\text{III-13})$$

Avec Gc représente un correcteur de type PI

Le diagramme de contrôle de la ligne DC est présenté sur la Figure III.3 :

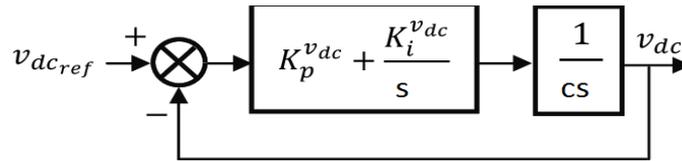


Figure III.4 : Boucle de la régulation du bus continu.

Calcul des paramètres de régulateur PI :

La fonction de Transfert en boucle fermée

$$G_c = \frac{(K_p s + K_i)}{Cs^2 + K_p + K_i} \quad (\text{III-14})$$

14)

Le calcul des paramètres du régulateur seront calculés en comparant la FTBF avec celle d'un deuxième ordre, On trouve :

$$G_c = \frac{\left(\frac{K_i}{C}\right)}{s^2 - \left(K \frac{1}{pC}\right)s + \frac{K_i}{C}} \quad (\text{III-15})$$

On obtient :

$$K_p = 2\zeta\omega_n C \quad (\text{III-16})$$

$$K_i = \omega_n^2 C \quad (\text{III-17})$$

III.2.5 MODELISATION DE CONVERTISSEUR MLI2

Le redresseur à MLI de tension est basé sur une structure d'onduleur de tension représentée sur la figure (I.1). Chaque interrupteur est constitué d'un IGBT (composant commandé l'amorçage et au blocage) et une diode anti parallèle. Cet interrupteur est unidirectionnel tension et bidirectionnel en courant. Ainsi, ce convertisseur, de part sa structure, est réversible en courant. Il peut donc contrôler de façon instantanée la forme d'onde de courants prélevés sur le réseau. Il alimente alors une charge (active ou passive) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant absorbé étant sinusoïdal et éventuellement en phase avec la tension réseau correspondante. Ce redresseur à MLI permet d'atteindre un facteur de puissance très proche de l'unité et régler, via la commande, la direction du flux et l'énergie réactive absorbée ou fournie [7].

Un onduleur est un convertisseur qui permet de convertir un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif, il est doté de la même structure que le redresseur à MLI [4].

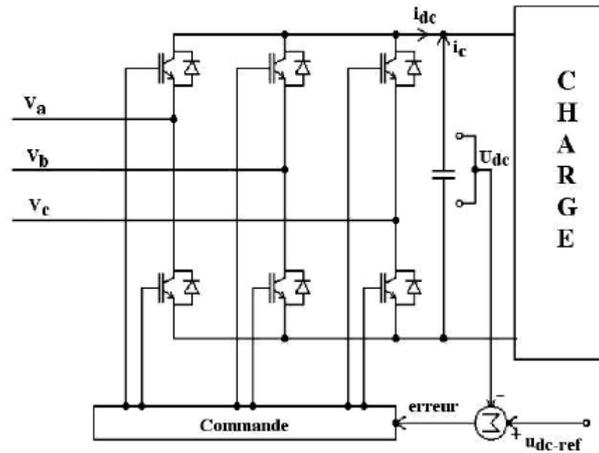


Figure III.5 :structure du Redresseur triphasée à MLI

III.2.6 Modélisation du filtre

Pour limiter la propagation des harmoniques dans le réseau électrique, l'onduleur est connecté au réseau à l'aide d'un filtre passif série (Rt, Lt), comme le montre la figure suivante :

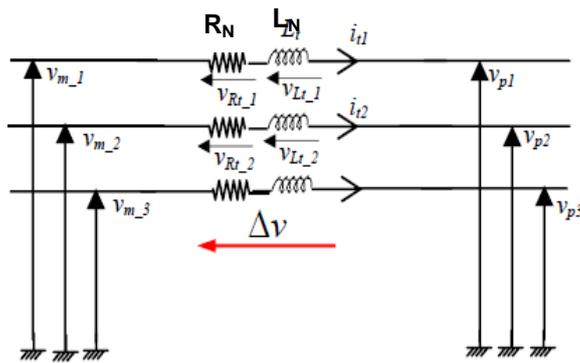


Figure III.6: Schéma d'un filtre

Il est possible de formuler les équations différentielles qui définissent le filtre de la manière suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{m-1} \\ V_{m-2} \\ V_{m-3} \end{bmatrix} = R_N \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ I_{t3} \end{bmatrix} + L_N \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{t1} \\ I_{t2} \\ I_{t3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \end{bmatrix} \tag{III-18)$$

En appliquant la transformation de Park au système d'équations précédent, on obtient :

$$\begin{cases} V_{Nd} = V_{id} - R_N I_{Nd} - L_N \frac{d}{dt} I_{Nd} + \omega_N L I_{Nq} \\ V_{Nq} = V_{iq} - R_N I_{Nq} - L_N \frac{d}{dt} I_{Nq} + \omega_N L I_{Nd} \end{cases} \tag{III-19)$$

III.6.1 Contrôle des courants envoyés au réseau

$$\begin{cases} P_g = V_{Nd} I_{Nd} - V_{Nq} I_{Nq} \\ Q_c = V_{Nq} I_{Nd} - V_{Nd} I_{Nq} \end{cases} \quad (\text{III-20})$$

20)

En analysant l'équation précédente, on peut observer que les puissances active et réactive sont dépendantes des courants injectés. Par conséquent, il est possible de réguler ces puissances en contrôlant les courants i_{Nd} et i_{Nq} .

III.6.1.1 Régulation des courants

Les équations précédente présentent un couplage causée par les deux derniers termes des tensions de compensation, ce qui rend difficile le contrôle indépendant des deux courants. Afin d'obtenir les courants souhaités, les tensions de compensation sont considérées comme des perturbations, et les tensions de référence peuvent être exprimées sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \Delta V_d^* = \Delta V_d - L_N \omega_N I_{tq} \\ \Delta V_q^* = \Delta V_q + L_N \omega_N I_{td} \end{cases} \quad (\text{III-21})$$

21)

Avec :

ΔV_d et ΔV_q termes de compensation.

$$\begin{cases} \Delta V_d = R_N I_{Nd} + L_N \frac{d}{dt} I_{Nd} \\ \Delta V_q = R_N I_{Nq} + L_N \frac{d}{dt} I_{Nq} \end{cases} \quad (\text{III-22})$$

22)

Lorsque l'on effectue la transformée de Laplace sur les équations, deux fonctions de transfert identiques se manifestent.

$$H(s) = \frac{I_N(s)}{\Delta V_d} = \frac{1}{R_N + L_N s} \quad (\text{III-23})$$

23)

Les paramètres des régulateurs seront calculés de la même façon que pour la commande vectorielle.

$$A(s) = \frac{1}{L_N s + R_N} = \frac{b}{a + s} \quad (\text{III-24})$$

Ou

$$a = \frac{R_N}{L_N} \text{ et } b = \frac{1}{L_N}$$

La constante de temps en boucle ouvert est :

$$\tau_{iNd_{BO}} = \frac{1}{a} \quad t_{riNd} = 3\tau_{iNd_{BO}} = \frac{3}{a} \quad (\text{III-25})$$

Par compensation on trouve :

$$\frac{K_{iNd}}{Kp_{iNd}} = a \quad (\text{III-26})$$

La fonction de transfert de régulateur devient :

$$\frac{i_{Nd}}{i^*_{Nd}} = \frac{K_{iNd} * b}{Kp_{iNd} * b + s} \quad (\text{III-27})$$

Avec une constante de temps :

$$\tau_{iNd_{BF}} = \frac{1}{Kp_{iNd} * b} \quad (\text{III-28})$$

Et un temps de reponse :

$$t_{riNd_{BF}} = 3\tau_{iNd_{BF}} = \frac{3}{Kp_{iNd} * b} \quad (\text{III-29})$$

On impose généralement un temps de réponse en boucle fermé plus rapide que celui du courant en boucle ouverte, on trouve :

$$t_{riNd_{BF}} = t_{riNd_{BO}} / h \quad (\text{III-30})$$

h : coefficient supérieur à 1

Ce qui permet de déterminer :

$$K_{p_{isd}} = \frac{3}{t_{riNd_{BF}}} \quad \text{et} \quad K_{i_{isd}} = a * K_{p_{isd}} \quad (\text{III-31})$$

De la même manière que le réglage précédant on trouve :

$$t_{riNq_{BF}} = t_{riNq_{BO}} / h \quad (\text{III-32})$$

$$K_{p_{isq}} = \frac{3}{t_{riNq_{BF}}} \quad \text{et} \quad K_{i_{isq}} = a * K_{p_{isq}} \quad (\text{III-33})$$

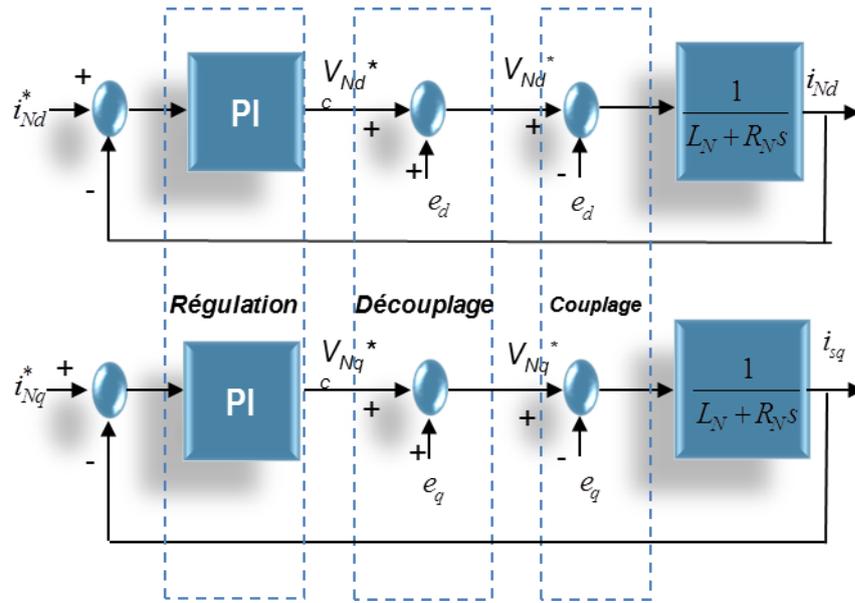


Figure III.7: schéma bloc du découplage.

III.7. Résultats de simulation de la chaîne globale

En décortiquant notre système par l'utilisation de l'environnement MATLAB /Simulink, notre modèle chaîne hybride photovoltaïque éolienne rattaché au réseau peut être représenté comme suit :

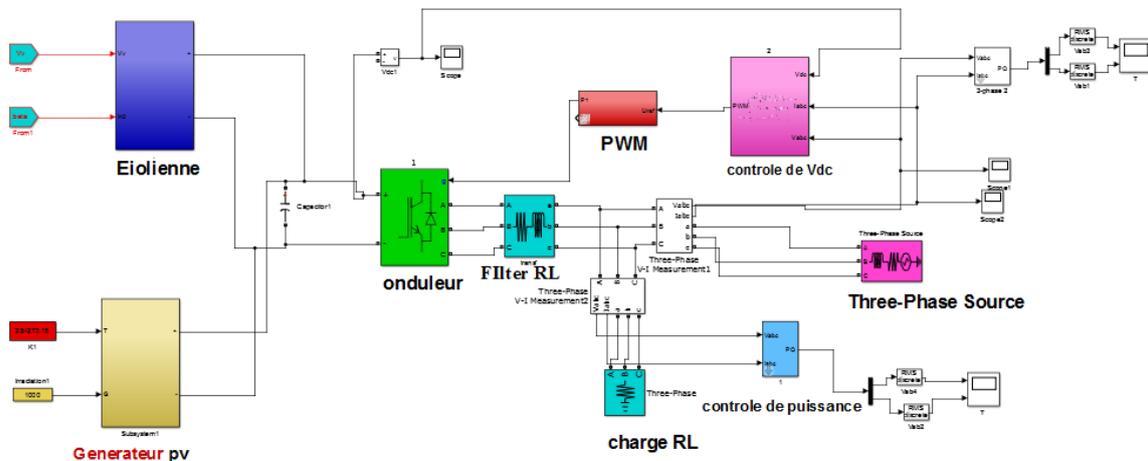


Figure III.8 : schéma bloc de la chaîne globale rattaché au réseau

La connexion en parallèle de deux chaînes de conversion est effectuée de telle sorte que la tension délivrée en charge tout le temps est la plus grande des deux chaînes de valeur. Si par exemple la tension PV est plus petite, elle agit comme un récepteur [9].

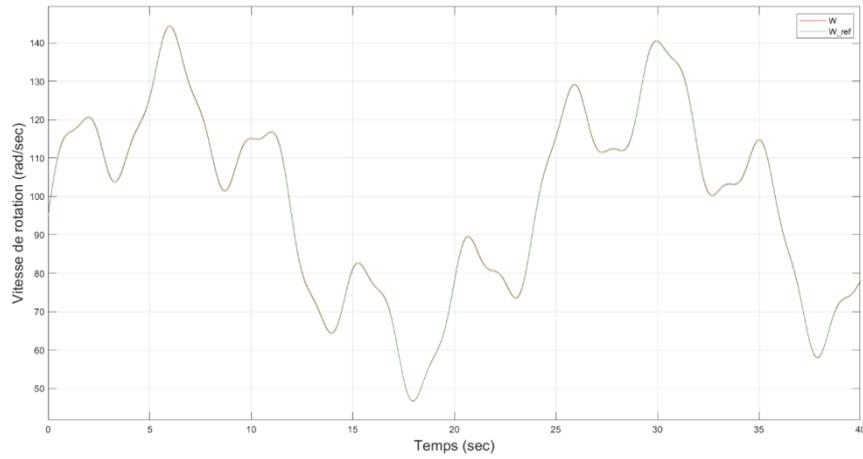


Figure III.9 : Allure de la vitesse de rotation (rad/s)

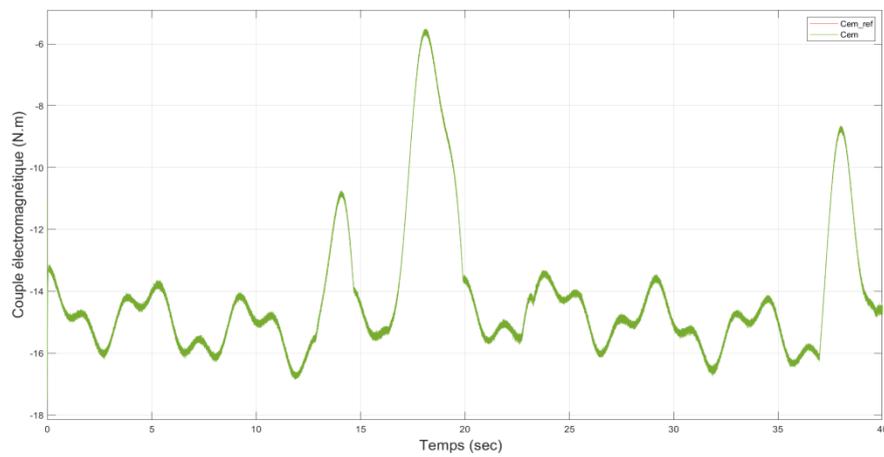


Figure III.10 : Allure du couple électromagnétique (N.m)

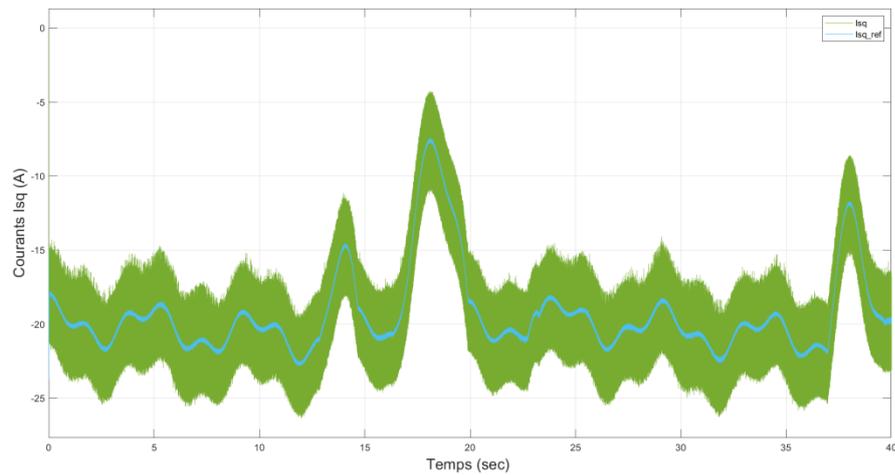


Figure III.11 : Allure du courants quadrature

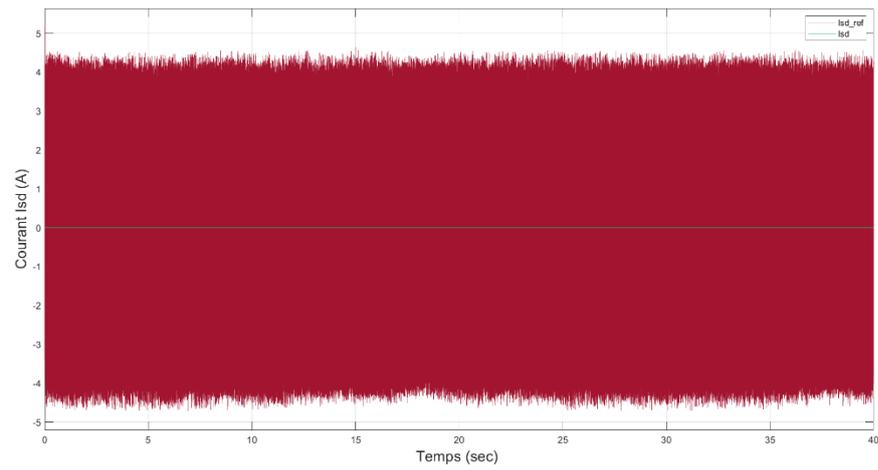


Figure III.12: Allure du courant direct (A)

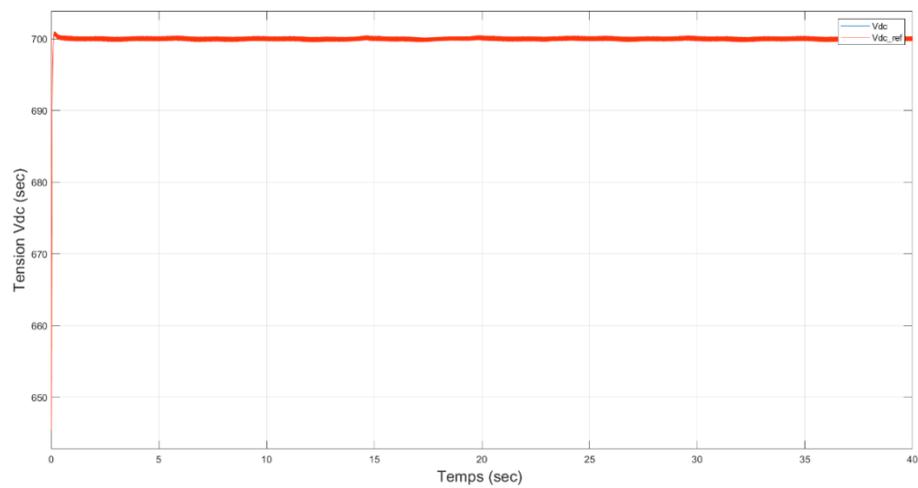


Figure III.13: Allure de tension du bus continue (V)

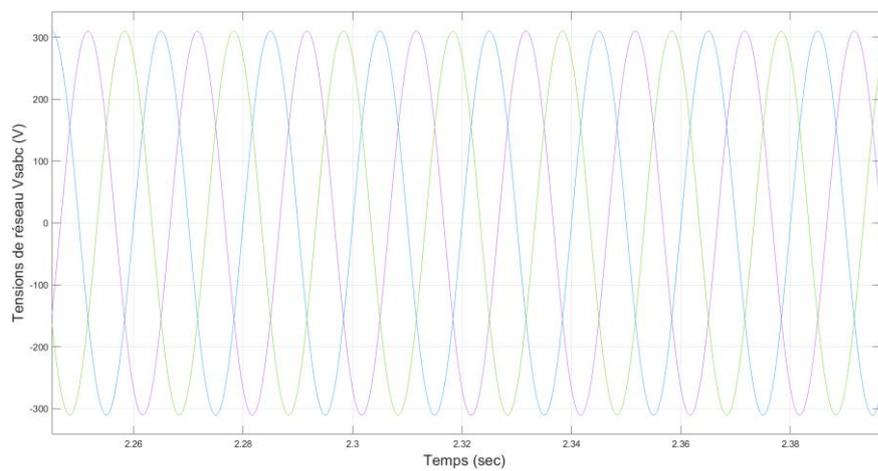


Figure III.14: Allure des tensions triphasés (V)

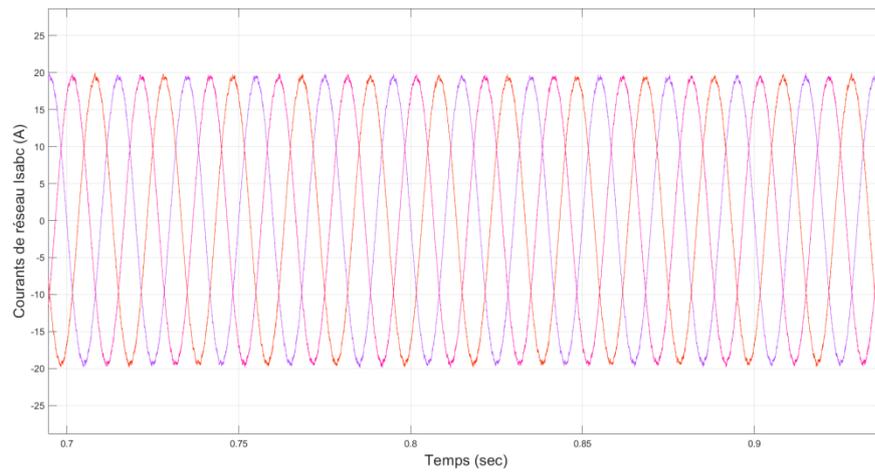


Figure III.15 : Allure des courants triphasés (A)

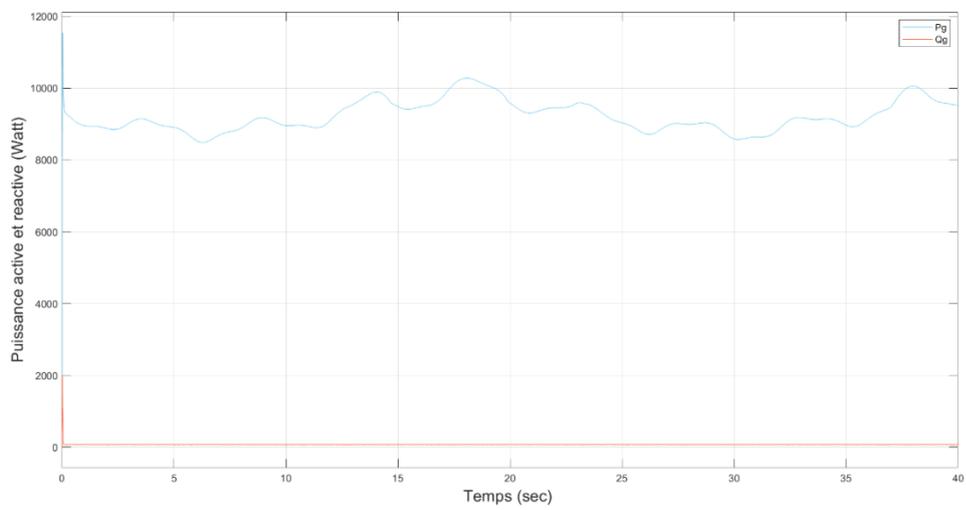


Figure III.16 : Allure des puissances active et, réactive du réseau

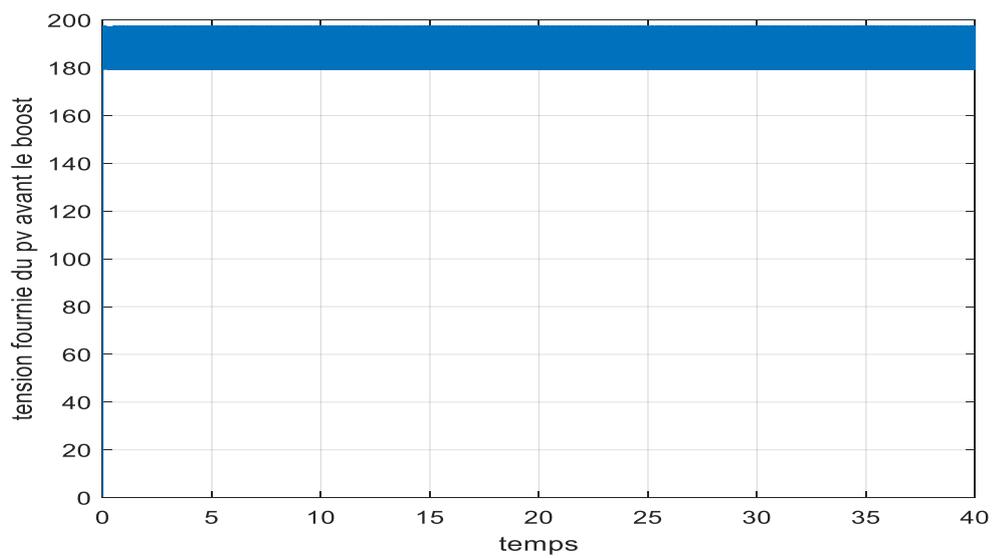


Figure III.16 : Allure de la tension du pv avant le boost

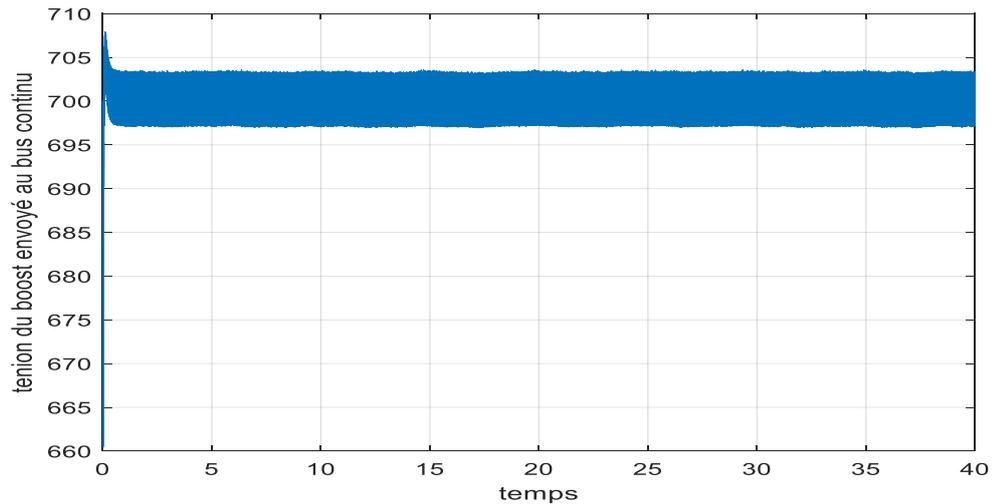


Figure III.18 : Allure de la tension du boost transmise au bus continu

III.7. 1. Interprétation des résultats de simulation

La tension dirigé vers le réseau est claire et représente une forme d'onde acceptable, mais entaché des harmoniques, influent légèrement sur la forme du courant. Comme le montre la figure III.12

Les figures (III.11 , III.14), montrent respectivement que la tension du bus continu et la puissance active et réactive qui transitent au réseau électrique suivent bien leurs références correspondantes. Cela est obtenu par le contrôle direct de la puissance appliquée au convertisseur coté réseau CCR. Nous remarquons que la tension du bus continu présente un court régime transitoire et en suite elle se stabilise à sa valeur de consigne imposée $V_{dc_ref} = 700V$.

III.8 Conclusion

Dans cette section, nous avons introduit un système d'énergie électrique hybride comprenant une combinaison d'une éolienne et de panneaux photovoltaïques. Nous avons d'abord présenté une vue d'ensemble de ce système, puis nous avons interconnecté ces éléments à un bus continu commun en utilisant des convertisseurs. Cette configuration permet de gérer la puissance et de maintenir une tension constante sur le bus continu, même en présence de variations de charge.

Ensuite, nous avons procédé à une simulation complète du système et obtenu des résultats significatifs. Les résultats de cette simulation ont démontré une réponse satisfaisante du système aux fluctuations climatiques.

III.9. Références bibliographiques

[1] : V. Quaschnig. "Understanding Renewable Energy Systems". Livre Edition Earthscan, Grande Bretagne, 2005.

[2] : B. Multon. "Production d'Énergie Électrique par Sources Renouvelables". Techniques de l'ingénieur,

traité Génie électrique D 4 005.

[3] :Rabah Rouas « etude d'un system hybride eolienne photovoltaïque » these de doctorat université mouloud mammeri de tizi-ouzou 2018

[4] :These doctorat zine souhila

[5] : B. Imane, S. Fadhila, « Contrôle direct de puissance appliqué au filtre actif parallèle», thèse de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, Juin 2014.

[6] S. Hassaine, "Application des nouvelles techniques de commande de la Machine synchrone à aimants permanents", Thèse Doctorat, Université des Sciences et de Technologie d'Oran, 2008

[7] : Mr. GADOUCHE Zoubir , «Contrôle de puissances active et réactive d'un réseau électrique de source mixte photovoltaïque et éolienne ».these de doctotat UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET Année universitaire 2022/2023.

[8] : Mecekar faical et loukkas nassim « Etude et commande d'un system hybride éolienne photovoltaïque connecte au réseau » Projet de Fin d'Étude Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue HASSEN Badi, 16200 El Harrach, Alger.2013

[9] : R. Redjem , K. Nabti et A. Bouzid « Amélioration de la qualité de l'énergie électrique d'une chaîne de production hybride photovoltaïque éolienne connectée à un site isolé ». Université Mentouri, Route Ain El Bey, 25000 Constantine, Algérie.(accepté le 28 Décembre 2017)

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail est l'exploitation de l'énergie offerte par la combinaison de deux sources d'énergie éolienne et photovoltaïque qui exige son adaptation au réseau auquel elle doit être connectée. La combinaison de ses deux sources n'imposent pas l'amplitude de la tension et ne règle pas le rapport puissance fréquence, ce qui a pour effet de perturber la stabilité du réseau. Avec l'utilisation de l'électronique de puissance, de nouvelles technologies de commandes sont apparues pour optimiser cette nouvelle génération d'énergie.

Afin d'exploiter ce type d'énergie, il est impératif de modéliser et de commander les différentes parties de ce système. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système .

L'étude des deux sources a permis de réaliser une modélisation complète et globale du système de conversion d'énergie. Cette modélisation traite deux parties essentielles ; la première partie consiste à l'amélioration du rendement d'un système d'alimentation photovoltaïque, cela ne peut être qu'à la présence d'un processus de poursuite de point de puissance maximale, connu sous le nom du contrôleur MPPT, qui s'avère indispensable pour une meilleure adaptation source/charge.

La deuxième partie traite la modélisation du système de conversion éolienne qui est divisée en deux parties ; la partie mécanique qui contient la turbine et l'arbre de la génératrice, la deuxième partie, inclue la machine synchrone à aimants permanents. Le modèle de la GSAP, basé sur des équations différentielles périodiques, est simplifié par la transformation de PARK. Afin d'avoir un meilleur rendement l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" avec régulateur PI pour la turbine ainsi que la commande vectorielle de la machine synchrone à aimants permanents sont réalisées.

Le raccordement de deux systèmes photovoltaïques (PV) et éolien avec un bus continu intermédiaire est une approche courante pour intégrer ces deux sources d'énergie renouvelable et faciliter leur connexion au réseau électrique, Le système hybride sont soumis à des variations naturelles telles que l'ensoleillement et la vitesse du vent. En utilisant un bus continu intermédiaire il est possible de lisser les variations de production et de fournir une alimentation plus stable au réseau électrique.

Les résultats obtenus confirment l'efficacité de la stratégie du contrôle utilisé pour le contrôle du système de conversion complet et atteste les performances désirées. Ainsi, elle nous a permis d'atteindre les objectifs voulus à savoir

- Réglage de la vitesse de rotation de la turbine pour optimiser le rendement aérodynamique.

Conclusion générale

- L'extraction du maximum de puissance active en fonction de la vitesse du vent, et de l'ensoleillement.

- Assurer une bonne qualité d'énergie générée

ANNEXES

Tableau Paramètres de simulation du système global

Parties du système	Désignations	Valeur
Générateur PV	<ul style="list-style-type: none"> -Cellules en série - Cellules en parallèle -Puissance maximale -Tension maximale -courant maximale 	<ul style="list-style-type: none"> -Ns = 7 -Np = 7 -Pmax = 9.5KW -Vppm = 430V -Ippm = 21.8A
Hacheur BOOST	<ul style="list-style-type: none"> -condensateur d'entrée -l'inductance du hacheur -condensateur de sortie 	<ul style="list-style-type: none"> -Cpv= 1000e-6 F -Lh = 0.00175 H -Cdc = 2600e-6 F
GSAP	<ul style="list-style-type: none"> -puissance nominale -Résistance statorique -Inductance statorique -Flux des aimants permanent -Moment d'inertie -Le nombre de pair de pole 	<ul style="list-style-type: none"> - 10kw -Rs = 0.18 Ω -Ld = Lq = 2 mH -$\phi_f = 0.123$ Wb -J = 0.48 Kg.m² -p = 4
Turbine	<ul style="list-style-type: none"> -Rayon des pales -Masse volumique -Moment d'inertie -coefficient puissance optimal -Ration optimal -coefficient de frottement -puissance nominal 	<ul style="list-style-type: none"> -R = 3 m -$\rho = 1.22$ -$J_{tur} = 0.042$ Kg.m² -$Cp_{opt} = 0.48$ Kg.m² -$\lambda_{opt} = 8.1$ -f = 0.017 N.m.s⁻¹ -P = 10 KW
Réseau électrique	<ul style="list-style-type: none"> -Tension du bus continu -Capacité -Inductance -Résistance 	<ul style="list-style-type: none"> -V_{dc} = 700 V -C = 2200 μF -L_N = 0.02 H -R_n = 0.8 Ω

Résumé

Ces dernières années, les performances de l'énergie photovoltaïque ont permis le développement du système hybride photovoltaïque-éolien (PV-E) pour la production d'électricité. Ce système combine deux technologies distinctes, l'énergie éolienne et le photovoltaïque, afin de générer simultanément de l'électricité. La conversion de l'énergie en courant électrique s'effectue grâce à un convertisseur statique et un onduleur, permettant ainsi de connecter les installations solaires hybrides au réseau et de charger la batterie.

Mots-clés : Énergies renouvelables - Turbine éolienne - GSAP - Redresseur MLI - Régulateur PI - commande vectorielle - simulation – modélisation - système hybride (PV-E).

ملخص

في السنوات الأخيرة ، سمح أداء الطاقة الكهروضوئية بتطوير نظام الرياح الكهروضوئية الهجين لإنتاج الكهرباء (الكهروضوئية و الهوائية) . يجمع هذا النظام بين تقنيتين متميزتين ، طاقة الرياح والخلايا الكهروضوئية ، لتوليد الكهرباء في نفس الوقت. يتم تحويل الطاقة إلى تيار كهربائي باستخدام محول ثابت وعاكس ، مما يجعل من الممكن توصيل التركيبات الشمسية الهجينة بالشبكة وشحن البطارية.

Summary

In recent years, the performance of photovoltaic energy has allowed the development of the hybrid photovoltaic-wind system (PV-E) for the production of electricity. This system combines two distinct technologies, wind power and photovoltaics, to simultaneously generate electricity. The conversion of energy into electric current is carried out using a static converter and an inverter, thus making it possible to connect the hybrid solar installations to the network and to charge the battery.