

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie Electrique

Spécialité : **Machines électriques**

Présenté par

Rachid HADDAD

Thème

Gestion énergétique d'un système hybride éolien-photovoltaïque

Mémoire soutenu publiquement le 08/07/2018 devant le jury composé de :

Mme Ferroudja MEGHERBI-BITAM

Professeur, UMMTO, Présidente

Mr Salah HADDAD

Professeur, UMMTO, Encadreur

Melle Rahma KACHENOURA

MCB, UMMTO, Examinatrice

Mr Madjid SI BRAHIM

MCB, UMMTO, Examineur

Remerciements

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur HADDAD Salah, professeur à l'UMMTO pour m'avoir proposé ce sujet, pour son soutien permanent et les nombreux conseils et informations apportées, mais surtout pour la confiance qu'il m'a accordé.

J'adresse mes vifs remerciements à Mr SI BRAHIM Madjid, maitre de conférence à l'UMMTO non seulement pour m'avoir fait l'honneur d'examiner ce travail, mais aussi pour sa qualité humaine, son entière disponibilité, son aide et ses précieux conseils.

Je tiens aussi à remercier M^{me} LOUNIS Fatma et Mr ROUAS Rabah pour leurs entières disponibilités, leurs conseils et leurs aides qu'ils m'ont apportés.

Mes remerciements vont également à M^{me} MEGHERBI-BITAM Ferroudja, professeur à l'UMMTO pour m'avoir fait l'honneur d'accepter la présidence du jury de ma soutenance, ainsi qu'à M^{lle} KACHENOURA Rahma, maitre de conférence à l'UMMTO pour son aide, son encouragement et pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Ma sincère gratitude va aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à ma formation.

Enfin, que toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail, trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, à toute ma famille et mes amis, et à tous ceux qui me sont chers.

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les systèmes hybrides

I.1. Introduction	3
I.2. Définition des systèmes hybrides	3
I.3. Classification des systèmes hybrides	3
I.3.1 Le régime du fonctionnement	3
I.3.2 La structure du système hybride	4
I.4. Configuration des systèmes hybrides autonomes.....	4
I.4.1. Architecture série	4
a) Configuration à bus à courant continu	4
b) Configuration à bus à courant alternatif.....	5
I.4.2. Architecture parallèle	6
I.5. Le choix des énergies renouvelables	7
I.6. L'énergie solaire.....	8
I.6.1 C'est quoi l'énergie solaire ?	8
a) Thermique	8
b) Photovoltaïque	8
I.6.2. Principe de conversion	8
I.6.3. Rayonnement solaire.....	9
I.6.4. Cellule photovoltaïque	10
I.6.5. Générateur photovoltaïque.....	10
a) Association série	11
b) Association parallèle	11
c) Association série-parallèle	11
I.7. L'énergie éolienne.....	12
I.7.1 D'où vient le vent ?.....	12
I.7.2 Principe de conversion	12
I.7.3 Différents types d'éoliennes.....	12
a) Eoliennes à axe vertical	12
b) Eoliennes à axe horizontal	13
I.7.4 Principaux composants de l'éolienne.....	14

a)	Le mât	14
b)	La nacelle	14
c)	Le rotor.....	14
I.7.5	Les différentes machines asynchrones utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne.	15
a)	Les éoliennes connectées au réseau électrique	15
b)	Les éoliennes fonctionnant en site isolé ou autonome.....	17
I.8.	Système de stockage.....	18
I.9.	Source conventionnelle	18
I.10.	Conclusion.....	19

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion photovoltaïque

II.1.	Introduction	20
II.2.	Modélisation d'un module photovoltaïque	20
II.2.1.	Cas d'une cellule PV idéale	20
II.2.2.	Cas d'une cellule PV réelle :.....	23
II.2.3.	Cas d'un panneau réel :.....	24
II.3.	Caractéristiques d'un PV.....	24
II.4.	Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques d'un PV.....	26
II.5.	Modélisation des convertisseurs DC/DC	27
II.5.1.	Convertisseur BUCK	27
II.5.2.	Convertisseur BOOST	29
II.6.	Stratégie de gestion de puissance	29
II.6.1.	Algorithmes MPPT	30
a)	Algorithme Perturbation & Observation (P&O).....	30
b)	Incrément de conductance.....	31
II.6.2.	Algorithmes MPPT et suivi de référence.....	33
II.7.	simulation	37
II.8.	Conclusion.....	37

Chapitre III : Modélisation de la chaîne de conversion éolienne

III.1.	Introduction	38
III.2.	Principe de fonctionnement du GAEE.....	38
III.2.1.	Courbe caractérisant la saturation	38

III.2.2.	Choix du condensateur d'auto-amorçage	39
III.3.	Modèle dynamique de la GAAE	40
III.3.1.	Description :	40
III.3.2.	Définition des angles :	41
III.3.3.	Equations électriques (dans les axes a,b,c) :	41
III.3.4.	Ecriture matricielle des équations électriques :	42
III.3.5.	Transformation de Park :	42
III.3.6.	Equations magnétiques dans les axes a,b,c :	43
III.3.7.	Equations magnétiques dans les axes d et q	43
III.3.8.	Equations électriques dans les axes d et q :	44
III.4.	Modèle dynamique de la GAAE en tenant compte de la saturation	44
III.4.1.	Equations électriques	45
III.4.2.	Equations des flux	45
III.4.3.	Construction du modèle d'état	48
III.5.	Construction du schéma Matlab Simulink	48
III.6.	Modélisation du phénomène d'auto-amorçage.	50
III.7.	Choix du référence de travail	51
III.8.	La commande directe de puissance	52
III.8.1.	Le choix de la position angulaire du vecteur de tension dans le plan $\alpha\beta$	52
III.8.2.	Calcul des puissances instantanées	55
III.8.3.	Comparateurs à hystérésis	54
III.8.4.	Table de commutation	54
III.9.	Simulation de la chaîne de conversion éolienne	55
III.9.1.	Simulation des grandeurs de la machine	56
III.9.2.	Simulation de l'ensemble machine redresseur à MLI	57
III.10.	Conclusion.....	58

Chapitre IV : Gestion d'énergie du système hybride

IV.1.	Introduction	59
IV.2.	Chaîne de stockage.....	59
IV.2.1.	Modélisation du convertisseur bidirectionnel	59
IV.2.2.	Principe de fonctionnement.....	60
IV.3.	Présentation du système hybride global	61

IV.4. Régulation de la tension du bus	62
IV.5. Stratégie de gestion du système hybride	64
IV.6. Simulation	65
IV.7. Interprétation des résultats	71
IV.8. Conclusion	71

Conclusion générale

Conclusion générale	72
---------------------------	----

Références bibliographiques

Annexes

Glossaire

Abréviations

SH	Système Hybride
SHSER	Système Hybride à Sources d'Énergie Renouvelable
DC/CC	Courant Continu (Direct Current)
AC	Courant Alternatif (Alternative Current)
CDER	Centre de Développement des Énergies Renouvelables
PV	Panneau photovoltaïque
MAS	Machine Asynchrone
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PPM	Point de Puissance Maximale
P&O	Perturbation et Observation (Perturb and Observ)
FF	Facteur de Forme
GAAE	Génératrice Asynchrone Auto-Excitée
DPC	Commande Directe de Puissance (Direct Power Control)
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
F.é.m	Force électromotrice

Notations

Panneau photovoltaïque

P_{pv}	Puissance d'un PV
P_{ref}	Puissance de référence ou de charge
I / I_{pv}	Courant d'une cellule ou d'un PV
I_{sc}	Courant de court-circuit de la cellule ou d'un PV à température réelle
I_{cc}	Courant de court-circuit de la cellule ou d'un PV à température nominale
$I_{p\ max}$	Courant correspondant à la puissance maximale d'un PV
I_{ph}	Photo-courant
I_D	Courant de jonction P-N du semi-conducteur
I_0	Courant de fuite de la diode
I_{0-Tn}	Courant de fuite de la diode à la température nominale
V / V_{pv}	Tension d'une cellule ou d'un PV
V_{oc}	Tension du circuit ouvert d'une cellule ou d'un Pv
$V_{p\ max}$	tension correspondant à la puissance maximale d'un PV
V_{0-Tn}	Le potentiel thermique à la température nominale
V_{0-Tr}	Le potentiel thermique à la température réelle
G	Eclairement relatif
$G_{réel}$	Eclairement réel
$G_{nominal}$	Eclairement nominal
T_r / T_c	Température réelle
T_n	Température nominale
N_s	Nombre de cellules en série
N_{ss}	Nombre de modules en série

N_{pp}	Nombre de modules en parallèle
a	Constante de non idéalité de la diode
k	Constante de Boltzmann
q	Charge de l'électron
α	Coefficient de température
E_g	Energie de la bande interdite du semi-conducteur

Génératrice asynchrone auto-excitée

θ_s	L'angle électrique de la transformation de Park pour la grandeur statorique
θ_r	L'angle électrique de la transformation de Park pour la grandeur rotorique
ω_s	Pulsation des courants statoriques
ω_r	Vitesse électrique du rotor
$[V_s], [V_r]$	Vecteur tension statorique et rotorique dans le plan (a, b, c)
$[i_s], [i_r]$	Vecteur courant statorique et rotorique dans le plan (a, b, c)
$[\varphi_s][\varphi_r]$	Vecteur flux statorique et rotorique dans le plan (a, b, c)
$P(\theta_s)$	Matrice de Park
$P(\theta_s)^{-1}$	Matrice inverse de Park
$[V_{ps}], [V_{pr}]$	Vecteur tension statorique et rotorique dans le plan $(d, q, 0)$
$[i_{ps}], [i_{pr}]$	Vecteur courant statorique et rotorique dans le plan $(d, q, 0)$
$[\varphi_{ps}][\varphi_{pr}]$	Vecteur flux statorique et rotorique dans le plan $(d, q, 0)$
$[R_s], [R_r]$	Matrice de résistance statorique et rotorique
$[L_{ss}]$	Matrice d'inductance statorique
$[L_{rr}]$	Matrice d'inductance rotorique
$[M_{sr}]$	Matrice d'inductance mutuelle stator-rotor
$[M_{rs}]$	Matrice d'inductance mutuelle rotor-stator
L_{as}	L'inductance propre d'une phase statorique
L_{ar}	L'inductance propre cyclique du rotor
M_{as}	L'inductance mutuelle entre deux phases du stator
M_{ar}	L'inductance mutuelle entre deux phases du rotor
M_{rs}	L'inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une autre du rotor
L_s	Inductance propre cyclique du stator
L_r	Inductance propre cyclique du rotor
L_m	Inductance magnétisante
i_m	Courant magnétisant
C	Condensateur de l'auto-amorçage

Commande directe de puissance

(S_a, S_b, S_c)	Vecteur de commande des interrupteurs
(S_p, S_q)	Les erreurs numérisées des puissance active et réactive
(e_α, e_β)	Les tensions biphasées dans le plan $(\alpha\beta)$
(e_{ca}, e_{ab})	Les tensions composées à la sortie de la machine
(e_a, e_b, e_c)	Les tensions simples à la sortie de la machine
V	Vecteur de tension dans le plan $(\alpha\beta)$
V_{dc}	Tension du bus continu du redresseur triphasé à MLI

(i_α, i_β)	Les courants biphasés dans le plan $(\alpha\beta)$
(i_a, i_b, i_c)	Courant débité par la machine
\hat{P}, \hat{q}	Les puissance active et réactive à l'entrée du redresseur
P, q	Puissance débitée par la machine
p^*, q^*	Les puissance active et réactive de référence
θ	Secteur de commande

Introduction Générale

Introduction générale

Le développement technologique, et l'évolution des techniques utilisées pour la conversion des énergies renouvelables en énergie électrique, elles sont aussi appelées les énergies vertes, alternatives ou propres, a apporté énormément de solutions aux problèmes rencontrés avec l'exploitation des énergies fossiles, qui sont à l'origine des émissions des gaz à effet de serre. Ces derniers sont néfastes pour la santé humaine et animale et pour la flore (pluies acides).

En effet, les énergies renouvelables présentent un impacte écologique positif, en plus elles répondent parfaitement aux normes internationales aux matières de la lutte contre la pollution (Protocole de KYOTO).

Au cours de notre travail nous nous intéresserons à l'étude de deux types d'énergies renouvelables qui sont :

- L'énergie photovoltaïque.
- L'énergie éolienne

Nous avons opté pour ce choix parce que ces deux énergies présentent l'avantage d'être facile à les convertir en énergie électrique.

La production de l'énergie photovoltaïque est issue du principe de l'effet photoélectrique qui correspond au phénomène de transformation de l'énergie de la lumière en énergie électrique [LAP2012], celle-ci repose sur la technique de l'installation d'un panneau construit à base de matériaux semi-conducteurs qui présentent la propriété de transformer l'énergie emmagasinée dans les photos en une DDP.

Quant à l'énergie éolienne, cette dernière consiste en la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par la rotation d'un arbre qui entraîne une génératrice.

Vu que ces énergies (photovoltaïque, éolien) dépendent respectivement du flux d'ensoleillement et de la présence du vent, l'exploitation de ces dernières devient irrégulière.

Alors que les installations électrique doivent fonctionner en permanence, cela mènes les ingénieurs à trouver des alternatives pour assurer la continuité de production de l'énergie électrique. En conséquence, on fait appel à l'électronique de puissance utilisant des dispositifs de conversion capable d'assurer la tache d'établir une liaison entre les source d'énergies renouvelables, la source de secours (générateur diesel), le système de stockage et la charge à alimenter, dont le seul objectif est d'obtenir une énergie électrique de même type (en forme et en valeur) et durable (permanent). Cette innovation est appelée système hybride.

Le système qui nous a été confié pour étude s'inscrit dans ce cadre et se propose de réaliser la gestion énergétique d'un système hybride complet composé de panneaux photovoltaïque, d'un générateur éolien, d'un système de stockage et d'un générateur de secours. Ce système est destiné à alimenter en énergie électrique un site isolé.

La problématique posée doit réaliser un triple objectif :

- Assurer une continuité de fonctionnement,
- Satisfaire la demande de la charge,
- Assurer une tension constante.

Dans le but de réaliser cette étude, nous avons divisé notre travail en quatre chapitres :

✓ Chapitre 01 : Généralité sur les systèmes hybrides

Ce chapitre est consacré à la description des systèmes hybrides, tout en précisant les spécificités de chacun des systèmes étudiés, ainsi que la définition des sources d'énergies formant la structure du système hybride que nous étudierons.

✓ Chapitre 02 : Modélisation et simulation de la chaîne de conversion photovoltaïque.

Ce chapitre est destiné à l'étude du processus de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, tout en établissant un algorithme permettant d'avoir un suivi sur la quantité d'énergie transmise en fonction du besoin.

✓ Chapitre 03 : Modélisation et simulation de la chaîne de conversion éolienne.

Durant ce chapitre nous étudierons la chaîne de conversion éolienne utilisant une machine asynchrone auto-excitée reliée à un redresseur triphasé MLI avec une commande directe de puissance qui nous permet d'élaborer un suivi de référence de puissance.

✓ Chapitre 04 : Gestion d'énergie du système hybride

Au cours de ce chapitre, nous modéliserons la chaîne de stockage, par la suite nous simulerons le système hybride global sous différentes stratégies de gestion.

Enfin, nous résumerons nos principaux résultats dans une conclusion générale et nous dresserons une liste de travaux à réaliser dans le futur

Chapitre I

Généralités sur les systèmes hybrides

I.1. Introduction

Le développement des sources d'énergie dites propres de nos jours devient de plus en plus incontournable, mais face aux problèmes des puissances variables et non garanties produites par ces sources d'énergies renouvelables, les chercheurs du domaine ont passé par un couplage d'approvisionnement et à la formation d'un système dit hybride (SH) pour répondre aux critères de la demande en énergie et la continuité de service.

Ce chapitre est consacré à donner la définition du système hybride et des généralités sur les différentes sources d'énergies constituant la structure du système hybride qui sera l'objet de notre mémoire.

I.2. Définition des systèmes hybrides

Un système hybride à sources d'énergie renouvelables (SHSER) est un système électrique, comprenant plus d'une source d'énergie de nature différente, parmi lesquelles une au moins est renouvelable [STOY2011].

I.3. Classification des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont classifiés selon les critères choisis, dont nous citons les classifications les plus répandues:

I.3.1 Le régime du fonctionnement

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe, nous avons les systèmes hybrides qui fonctionnent en parallèle avec le réseau électrique (connectés au réseau). Ces systèmes contribuent à satisfaire la demande en puissance du pays, par contre les systèmes hybrides du deuxième groupe, sont en régime isolé ou en mode autonome. Ils sont conçus de tel sorte à répondre aux besoins des consommateurs qui ne peuvent pas avoir accès à un abonnement du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, etc...

I.3.2 La structure du système hybride

Les différentes structures des systèmes sont classées généralement selon trois critères, dont le premier est la présence ou non d'une source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel, une micro turbine à gaz, etc...

Un second critère est la présence ou non d'un dispositif de stockage. La présence d'un système de stockage permet d'assurer une continuité de service pendant les périodes de faible production d'énergie voir même l'absence totale d'une ressource primaire à convertir en électricité. Les dispositifs de stockage peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, etc...

La dernière classification est définie selon le type de source d'énergie renouvelable utilisée. La structure du système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique ou une combinaison de ces sources, un critère important pour la sélection de la source utilisée est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Un autre facteur déterminant est la demande en énergie. Son importance détermine la nécessité ou non d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle.

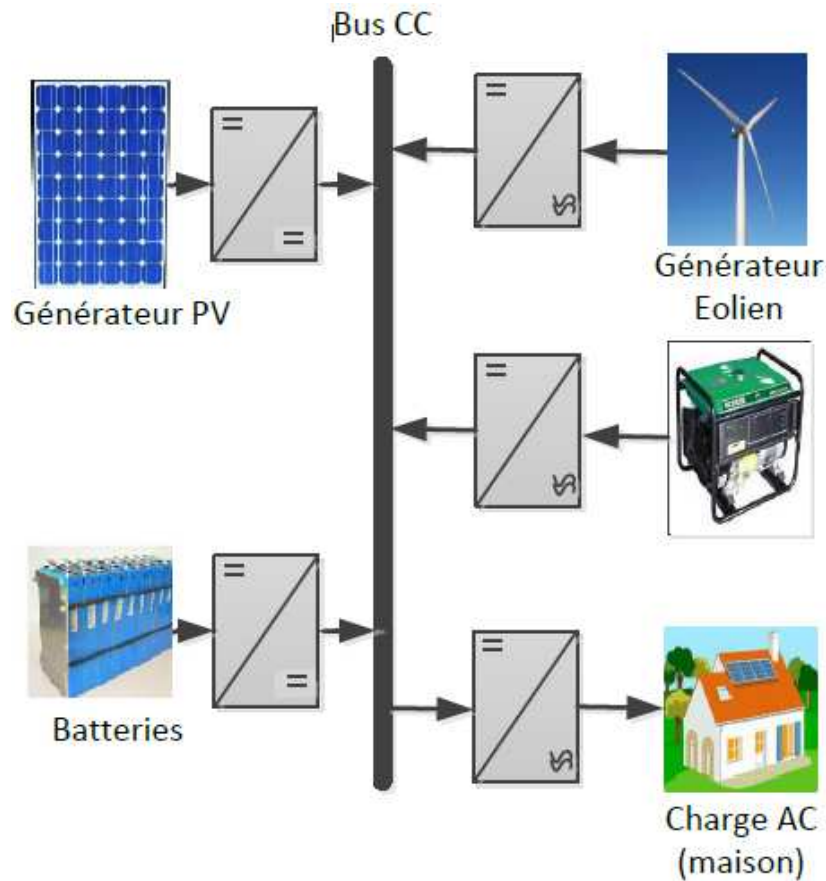
I.4. Configuration des systèmes hybrides autonomes

Face à l'émergence de l'électronique de puissance qui permet une optimisation pour les différents convertisseurs de puissance, les systèmes hybrides à énergies renouvelables ont pris de l'avance par rapport aux systèmes qui utilisent les sources conventionnelles, elle leurs a permis de réaliser des combinaisons importantes de deux ou plusieurs technologies d'énergies renouvelables comme le photovoltaïque et l'éolien à différentes architectures [TRA2016], [DAH2013] :

I.4.1. Architecture série

a) Configuration à bus à courant continu

Dans cette architecture (figure (1.1)), les sources de production d'énergie sont toutes connectées au bus à courant continu CC à travers des convertisseurs de puissance. Pour les sources de productions d'énergie à courant alternatif, leur tension est redressée (AC/DC) avant qu'elle ne soit connectée au bus tel que l'éolien et le générateur diesel. Par contre les sources à courant continu (PV, batterie) sont reliées à des convertisseurs DC/DC dans le but d'amplifier ou de réduire la tension d'entrée selon la tension du bus et pour pouvoir gérer le flux d'énergie à la fin.

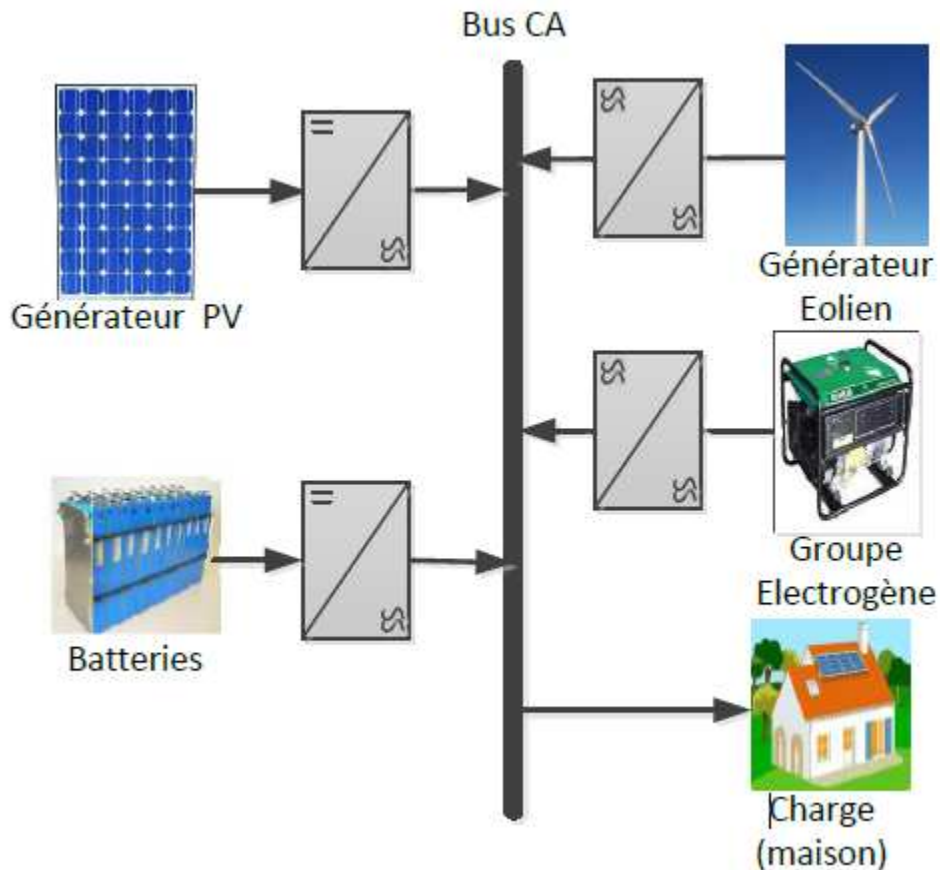


Fig(1.1) Configuration d'un système hybride à bus CC

L'avantage dans cette architecture réside dans sa simplicité, ce qui simplifie la mise en œuvre de sa commande. Cependant le rendement de l'ensemble du système est relativement faible à cause de certaines pertes au niveau des convertisseurs.

b) Configuration à bus à courant alternatif

L'architecture à bus à courant alternatif n'était pas possible auparavant, figure (1.2), c'est juste après l'optimisation des onduleurs qu'elle est devenue possible. La puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus alternatif. Pour les sources de production d'énergie alternative, leur sortie est connectée aux convertisseurs AC/AC et les générateurs continus sont reliés à des convertisseurs DC/AC, dont l'objectif est d'avoir des tensions de sortie de l'éolienne et du PV, commandable et régulée selon la tension efficace et la fréquence du bus, pour qu'elles soient connectables à ce dernier.



Fig(1.2) Configuration d'un système hybride à bus AC

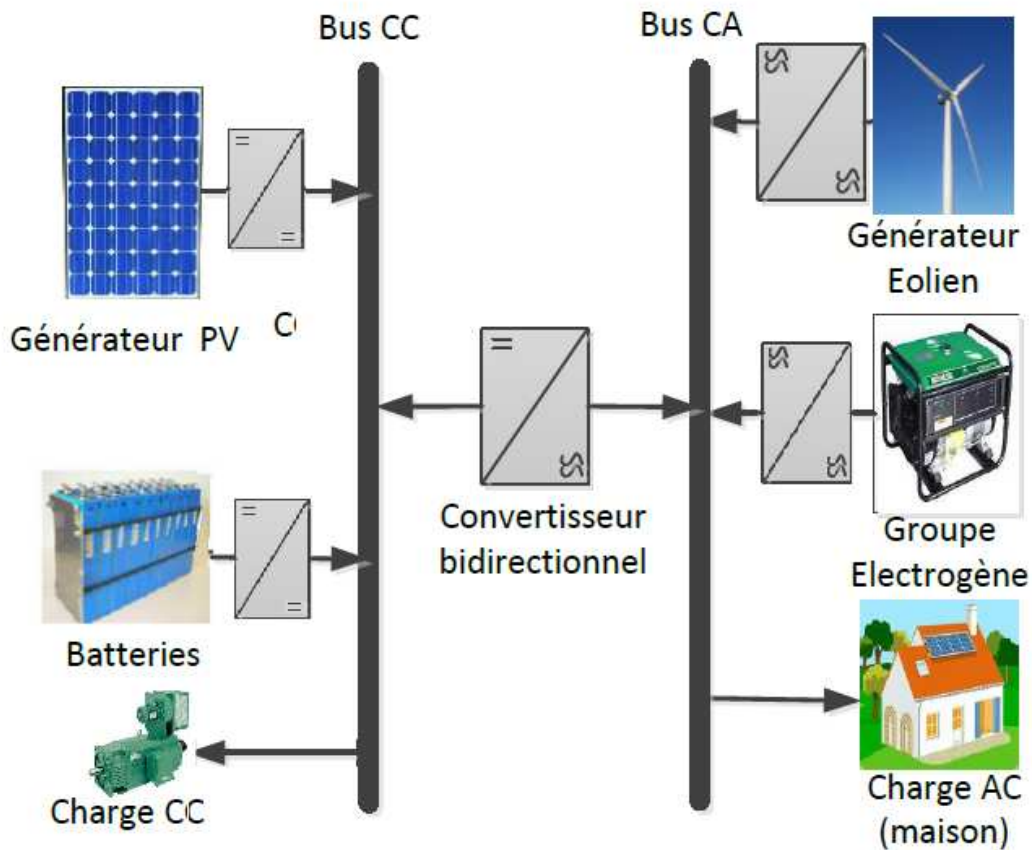
L'avantage de cette structure réside dans le fait que la tension du bus est alternative et assure continuellement l'alimentation de la charge. Par contre il est difficile d'accorder la tension et la fréquence de chaque source à celle du bus.

I.4.2. Architecture parallèle

La configuration parallèle dans figure (1.3) utilise deux bus : l'un est à bus continu où sont connectées les sources continu (batterie et PV) à travers des convertisseurs DC/DC variable pour en avoir la possibilité de varier la tension du bus et d'alimenter par la suite une charge à courant continu.

L'autre est à bus alternatif où sont connectées les sources à courant alternatif (éolienne et générateur diesel) à travers des convertisseurs AC/AC variable qui résoud le problème de connexion (fréquence et tension) entre les sources.

Les deux bus sont connectés par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel pour contrôler le transfert de l'énergie dans les deux cotés.



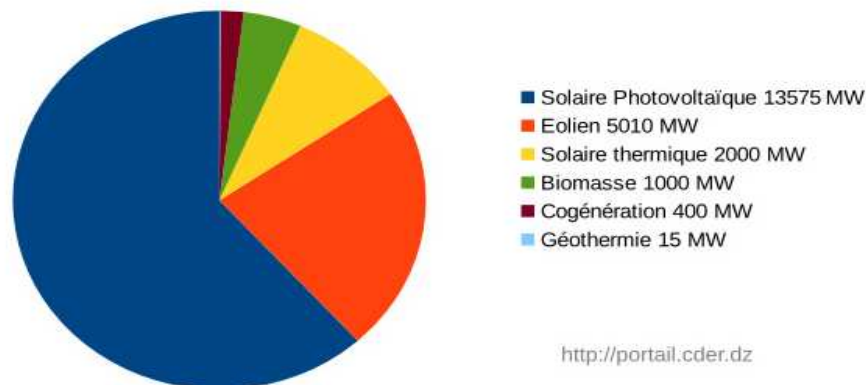
Fig(1.3). Configuration d'un système hybride à connexion parallèle

I.5. Le choix des énergies renouvelables

Le choix des énergies renouvelables se fait selon leurs abondances sur terre. Le soleil et le vent occupent le haut de l'échelle des sources renouvelables et elles sont les plus importantes (figure (1.4)). Leurs importances sont dues au fait qu'elles sont propres, gratuites et inépuisables, elles sont dotées d'un cycle de régénération beaucoup plus faible contrairement aux autres ressources renouvelables telles que la biomasse etc... et aux sources conventionnelles non renouvelables telles que le diesel, le charbon, etc...

Objectifs du programme algérien des Energies Renouvelables

22 GW à l'horizon 2030



Fig(1.4) Importance et choix des énergies renouvelables (CDER)

I.6 L'énergie solaire

I.6.1 C'est quoi l'énergie solaire ?

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie nous permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques.

a) Thermique

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie solaire. Elle désigne l'utilisation de l'énergie thermique du rayonnement solaire dans le but d'échauffer un fluide (liquide ou gaz). L'énergie reçue par le fluide peut être transformée par la suite en une énergie électrique.

b) Photovoltaïque

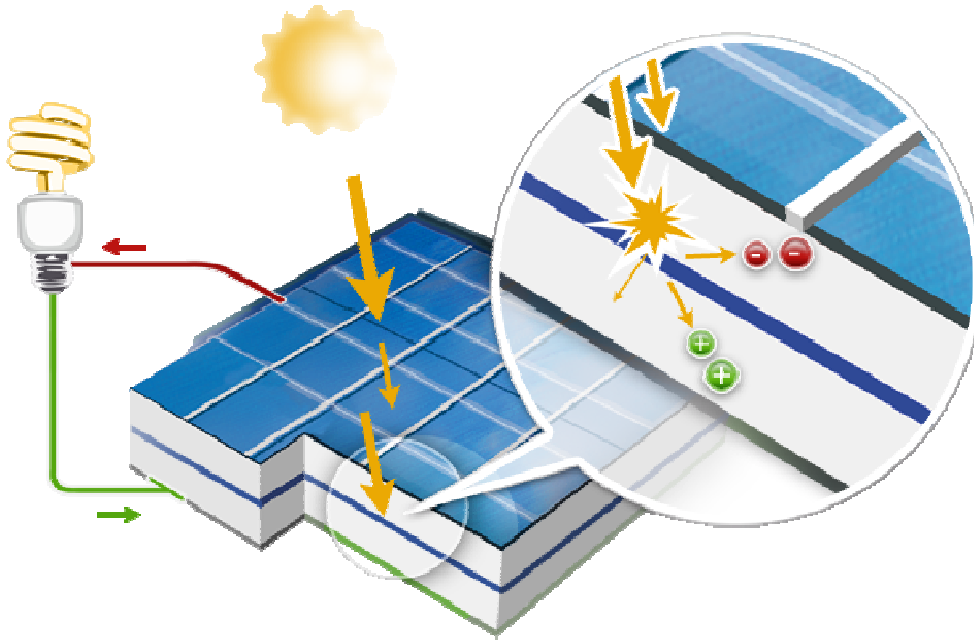
L'énergie photovoltaïque désigne la transformation d'une source d'énergie lumineuse directement en une énergie électrique. On parle généralement d'*énergie solaire photovoltaïque*, car le soleil est la source lumineuse la plus intense de notre planète. Mais certains préfèrent l'expression d'*énergie lumière*, pour insister sur le fait que toute source de lumière, même artificielle (lampes, tubes fluorescents...), peut générer de l'électricité à travers une cellule photovoltaïque [LAB2010].

I.6.2. Principe de conversion

L'effet photovoltaïque est basé sur un phénomène physique, quand un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière, il produit de l'électricité [LAP2012]. Ce phénomène se produit selon les étapes suivantes :

- ❖ Les rayons du soleil composés de photons entrent en contact avec la surface du matériau photovoltaïque,

- ❖ L'énergie des photons est transmise aux électrons dans le matériau et vont ce mettre en mouvement,
- ❖ Le mouvement des électrons provoque un courant continu dans les conducteurs qui se propage jusqu'au récepteur.



Fig(1.5) Principe de conversion photovoltaïque

I.6.3. Rayonnement solaire

Les rayons du soleil entrent en contact avec la surface du matériau photovoltaïque sous différents angles, figure (1.6). la somme de ces rayons est le rayonnement global que reçoivent les cellules photovoltaïques, qui sont :

- Le rayonnement direct : provient directement du soleil
- Le rayonnement diffus : est diffusé par le ciel et le milieu extérieur
- Le rayonnement albédo : est réfléchis par le sol ou la mer



Fig(1.6) Différents rayonnements solaires que reçoit un module photovoltaïque

I.6.4. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant électronique de type semi-conducteur absorbant une partie de l'énergie lumineuse et la transformant directement en énergie électrique.

Il existe différentes cellules et elles se distinguent en fonction des technologies de silicium qu'elles utilisent :

- ❖ Les silicium monocristallins

Les cellules en silicium monocristallin sont constituées d'un seul cristal de silicium, ce sont des cellules avec un grand rendement, il est de 12 à 18 %

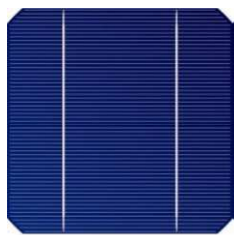
Leur coût ne permet pas de les utiliser dans des applications domestiques.

- ❖ Les silicium polycristallins

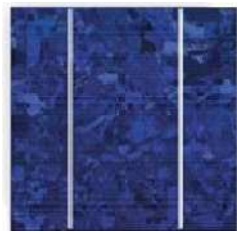
Les cellules en silicium polycristallin sont constituées de plusieurs cristaux de silicium, leurs rendement est 11 à 15 %, légèrement inférieur au rendement des monocristallins du point de vu du prix, elles sont les mieux adaptées aux applications domestiques.

- ❖ Le silicium amorphe

Les cellules en silicium amorphe sont réalisées avec du silicium amorphe, non cristallisé, étalé sur une plaque de verre. Il a un processus d'absorption des photons plus important que celui du silicium cristallin, ce qui permet la fabrication sous forme de couche mince, mais son rendement est plus faible, compris entre 6 et 8 %. Il est par contre compensé par un coût plus bas, il est principalement utilisé dans les appareils électroniques.



a) Cellule monocristalline



b) Cellule polycristalline



c) Cellule amorphe

Fig(1.7) Cellules photovoltaïques

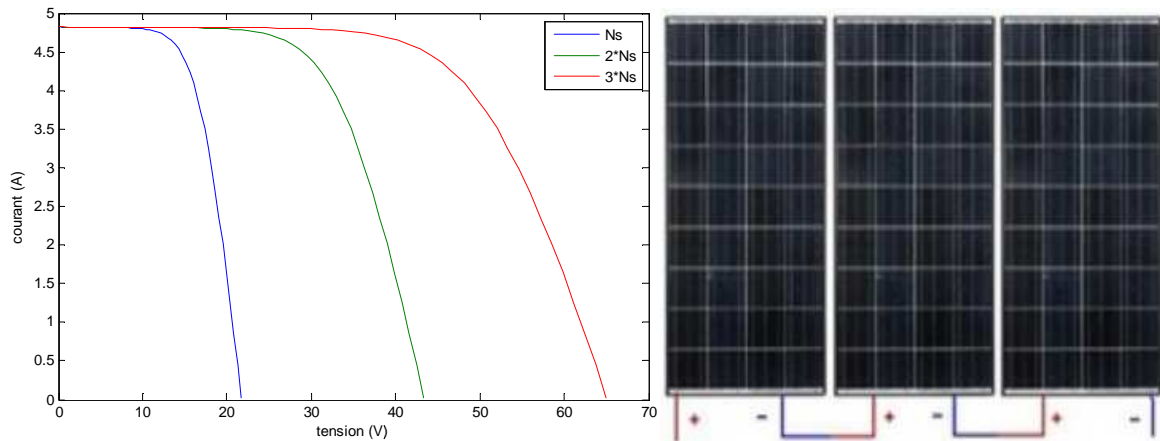
I.6.5. Générateur photovoltaïque

Une cellule solaire génère en général une puissance qui est de quelques watts, cette puissance est beaucoup trop faible pour en faire une application. Une réponse au problème a été donnée et réalisée par la suite, c'est de passer à l'association de ces cellules soit en série, soit en parallèle ou bien série-parallèle.

Pour produit davantage de puissance, plusieurs cellules doivent être assemblées afin de créer des modules photovoltaïques, l'association de ces derniers donne un panneau photovoltaïque [SING2010].

a) Association série

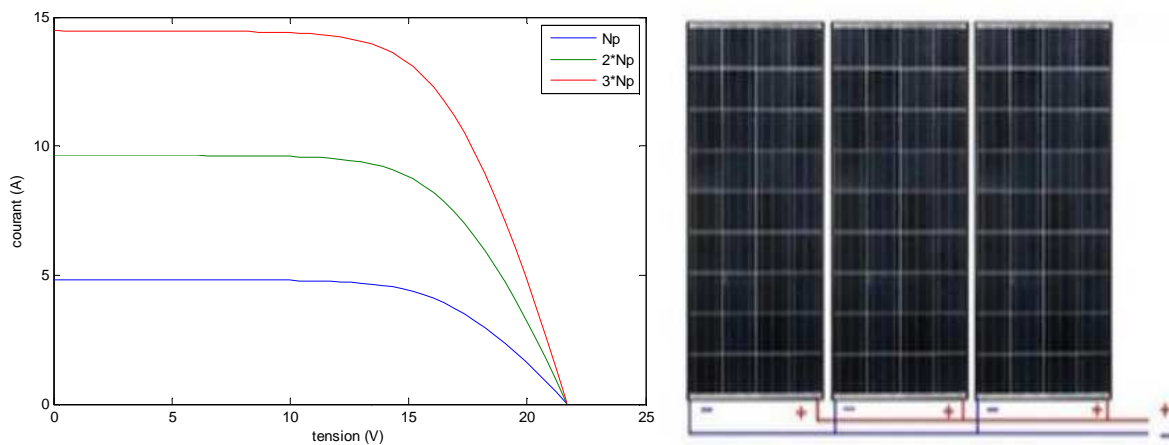
La connexion en série des modules permet d'augmenter la tension de l'ensemble, l'intensité est la même dans tous les modules qui est maintenue à celle du panneau de plus faible production



Fig(1.8) Connexion série des modules

b) Association parallèle

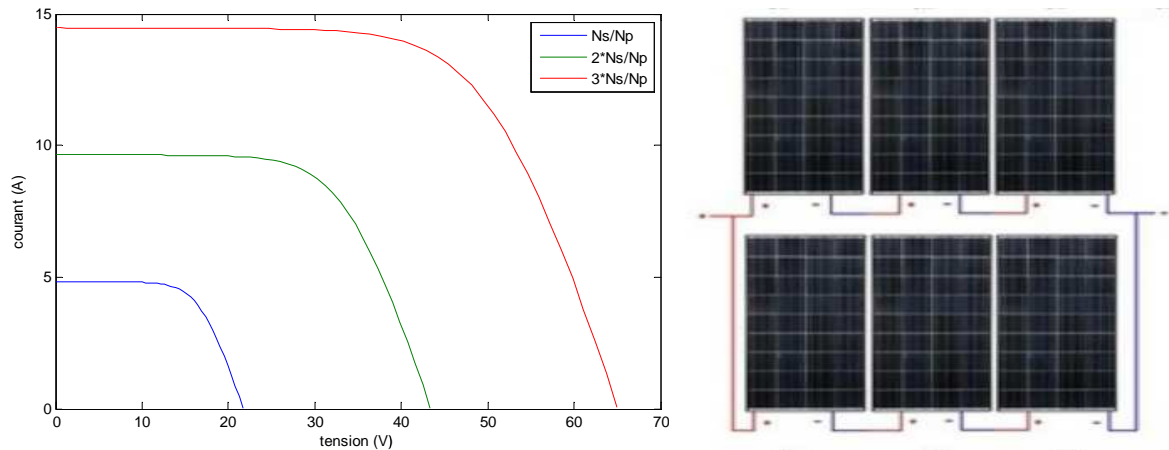
L'association parallèle des modules permet d'amplifier le courant selon le nombre de modules utilisé



Fig(1.9) Association parallèle des modules

c) Association série-parallèle

Pour répondre à la demande en puissance, nous sommes amenés à associer les modules en série et parallèle dans le but d'obtenir un générateur photovoltaïque aux caractéristiques souhaitées



Fig(1.10) Caractéristiques résultantes d'un générateur associant des modules en série et en parallèle

I.7. L'énergie éolienne

I.7.1. D'où vient le vent ?

Sous l'action des différences de pression atmosphérique créées indirectement par le soleil. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres. l'air ne peut jamais être au repos mais se déplace pratiquement en permanence. Le courant correspondant constitue le vent [LE-G2011].

I.7.2. Principe de conversion

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif de conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre qui entrainera par la suite la génératrice et celle-ci s'occupe à la fin de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique [POIT2003].

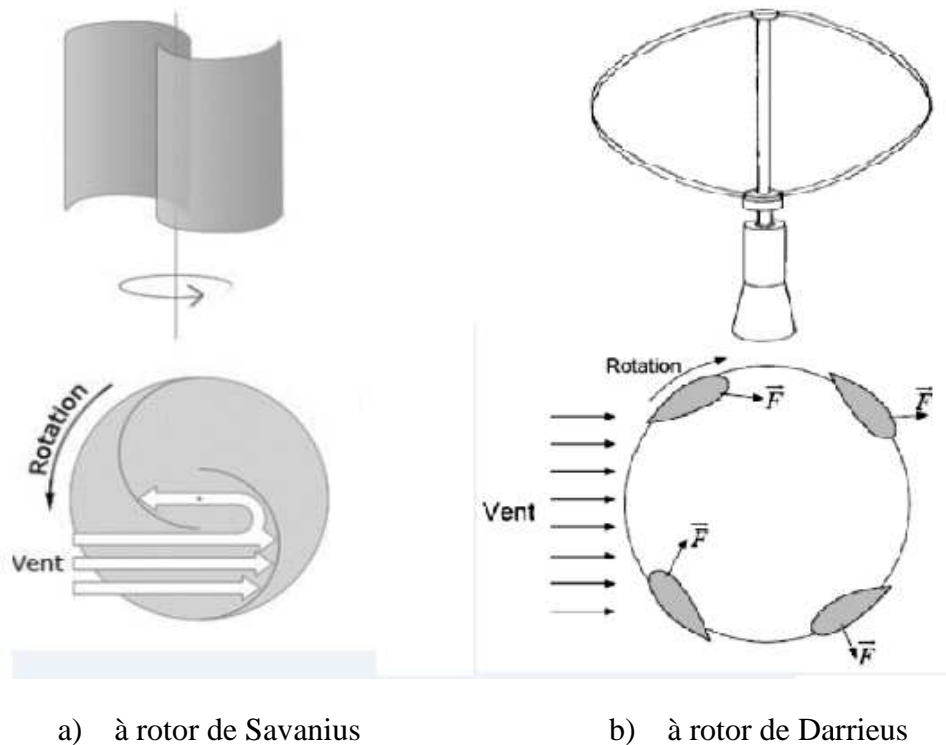
I.7.3. Différents types d'éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, il existe deux grandes familles d'éoliennes et elles sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice ; l'éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [YAK2016]. Aujourd'hui, pratiquement la majorité des applications et expériences qui se font, sont sur les aérogénérateurs à axe horizontal, c'est par rapport à leurs pouvoir de l'extraction de la puissance du vent.

a) Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Plusieurs prototypes on vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation.

Les différents prototypes de ces éoliennes sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles : les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savanius)

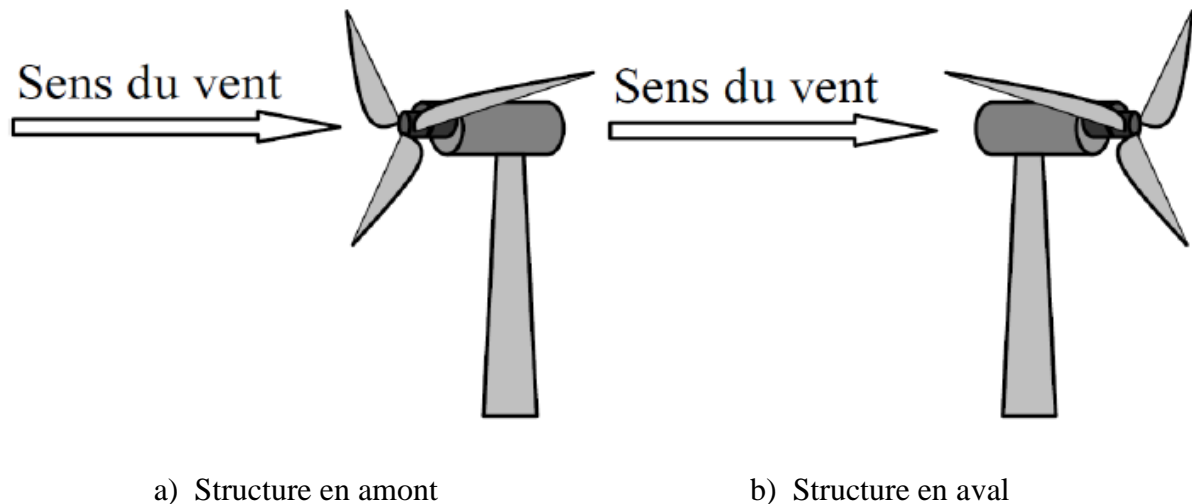


Fig(1.11) Différents Aérogénérateurs à axe vertical

b) Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. C'est le type d'éoliennes qui est le plus répandu actuellement, sans doute à cause de son rendement aérodynamique qui est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical [SI_B2015], elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent.

L'énergie cinétique du vent est récupérée grâce à l'effet de la portance au niveau des pales du rotor de deux structures différentes de l'éolienne : structure en amont et en aval.



Fig(1.12) Aérogénérateurs à axe horizontal

I.7.4. Principaux composants de l'éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences structures. Néanmoins, une éolienne « classique » est généralement constituée de trois éléments principaux [POIT2003], [TAM2015] :

a) Le mât

Généralement est un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique sur lequel sont placés le rotor et la nacelle, il doit être le plus haut possible selon les puissances des éoliennes utilisées, pour qu'elles soient en présence d'un vent plus puissant et éviter les perturbations près du sol.

b) La nacelle

Elle regroupe le générateur électrique et tous les éléments mécaniques qui permettent l'entraînement du générateur:

- Le multiplicateur de vitesse qui est l'intermédiaire de deux arbres (lent et rapide) dont le rôle est d'adapter la vitesse à celle du générateur,
- Un convertisseur d'énergie permettant de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, qui est dans notre cas une machine asynchrone auto-excitée,
- Une armoire de contrôle qui sert à réguler la vitesse à travers les systèmes d'orientation des pales,
- Un moteur d'orientation de la nacelle dont l'objectif est d'orienter la nacelle pour que la surface balayée par l'aérogénérateur soit perpendiculaire à la direction du vent,
- le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

c) Le rotor

Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Le nombre de pales varie généralement de 1 à 3. Le rotor tripales est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

I.7.5. Les différentes machines asynchrones utilisées dans la conversion de l'énergie éolienne

Dans cette partie, nous citerons une liste non exhaustive de différentes structures ou chaînes de conversion éoliennes utilisant les machines asynchrones, dont nous diviserons le travail en deux grandes familles ; il s'agit des éoliennes connectées au réseau et celles qui fonctionnent en site isolé [SI_B2015].

a) Les éoliennes connectées au réseau électrique

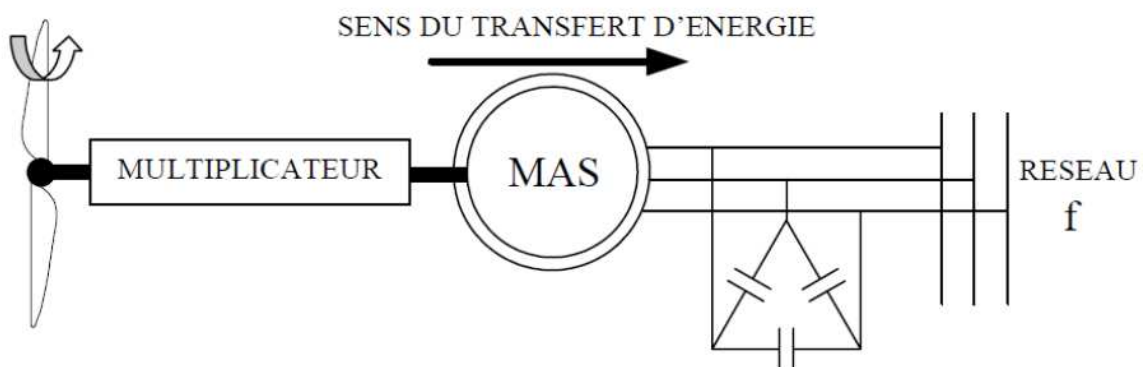
Sachant que la vitesse du vent est une grandeur variable et aléatoire, la connexion de l'éolienne au réseau était un déficit majeur (la tension obtenue doit être une sinusoïdale avec une valeur efficace constante fonctionnant à une fréquence 50 Hz). Deux solutions ont été adoptées pour résoudre la problématique ; c'est de les faire fonctionner en vitesse fixe, nécessitant des dispositifs de réglage de vitesse et en vitesse variable, nécessitant une interface d'électronique de puissance pour la régulation de la tension et la fréquence.

a.1) Fonctionnement à vitesse fixe

❖ Machine asynchrone à cage

Avant l'émergence de l'électronique de puissance, les premières éoliennes de grandes puissances mise en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil associée à une batterie de condensateur directement couplée sur le réseau électrique, figure (1.13).

La forme d'onde est imposée par le réseau. La vitesse de l'arbre est fixée par la fréquence qui doit être proche de la vitesse de synchronisme, ce qui ne permet pas à l'éolienne de fonctionner sur une large plage de vitesse.



Fig(1.13) Eolienne à base d'une MAS connectée au réseau

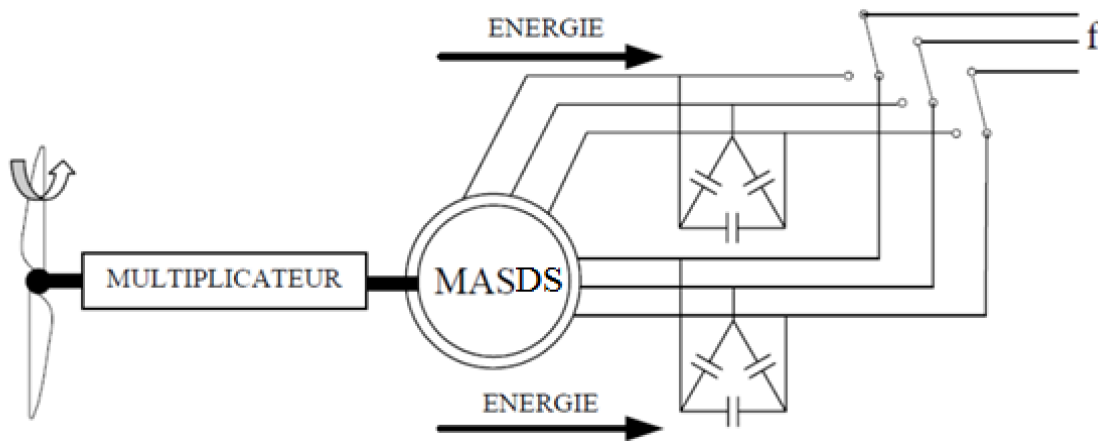
Parmi les différents avantages que représente cette structure on cite :

- Elles ont un système électrique plus simple,
- Elles représentent une grande fiabilité,
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne,
- Moins cher.

❖ Machine asynchrone à double stator

Pour avoir un rendement plus performant du dispositif utilisant la machine asynchrone à cage, certains constructeurs sont passés à un système à base d'une machine asynchrone à double stator, figure (1.14) ; l'un des deux stators est de faible puissance à grand nombre de paires de pôles destiné à fonctionner avec les petites vitesses du vent et l'autre est de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées, de sorte à avoir une même fréquence dans les deux cas

Ce système est intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe possédant deux points de fonctionnements différents. Il sera couplé au réseau par l'intermédiaire d'un commutateur sélectionnant le point de fonctionnement selon la vitesse du vent.



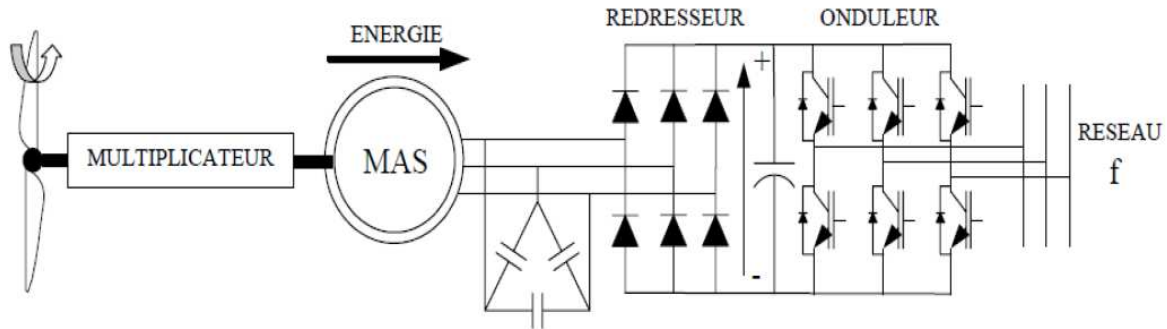
Fig(1.14) Eolienne à base d'une Machine asynchrone à double stator

a.2) Fonctionnement à vitesse variable

L'éolienne à vitesse variable connectée au réseau utilise la même structure qu'à vitesse fixe, de plus cette dernière est connectée au réseau via un convertisseur d'électronique de puissance destiné à assurer les conditions de couplage, celle-ci était valable juste après l'émergence de l'électronique de puissance.

❖ Machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

La structure représentée sur la figure (1.15) autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension que débite cette dernière est redressée en tension continue, l'onduleur permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne [SI_B2015].



Fig(1.15) Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur-onduleur à fréquence fixe

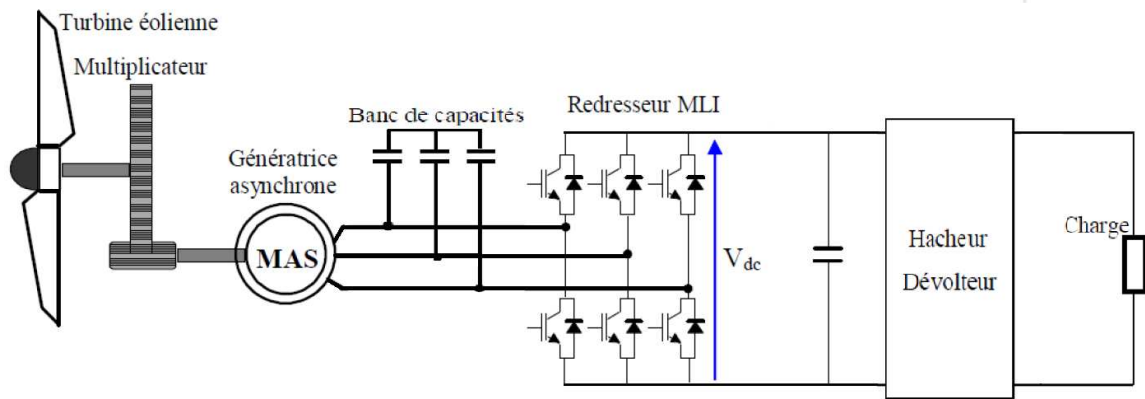
Les différents avantages principaux des éoliennes à vitesse variable comparées aux éoliennes à vitesse fixe sont les suivants [KEL2011] :

- Elles génèrent une puissance électrique d'une meilleure qualité,
- Elles fonctionnent à de larges plages de variation de vent,
- Elles réduisent le bruit lors de fonctionnement à faible puissance car la vitesse est alors lente,
- Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique,
- Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien.

b) Les éoliennes fonctionnant en site isolé ou autonome

Dans la plupart des régions ventées et qui n'ont pas accès au réseau électrique, l'énergie éolienne constitue la principale source d'énergie électrique. Avec la baisse continue des prix, la disponibilité des aérogénérateurs de différentes puissances et l'évolution de la technologie de l'électronique de puissance, l'exploitation de l'énergie du vent devient alors disponible à la portée de tout le monde et son utilisation est de plus en plus courante dans ces régions isolées.

Plusieurs structures ont vu le jour après la disponibilité des éoliennes de différentes puissances comme nous l'avons cité auparavant dans les différentes configurations des systèmes hybrides, dont nous donnons l'exemple qui sera l'objet de notre mémoire :



Fig(1.16) Machine asynchrone auto-excitée connectée sur une charge DC par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur-hacheur série

I.8. Système de stockage

Le dispositif de stockage est un élément essentiel dans un système hybride en site isolé. Sans lui, la garantie de l'autonomie du site ne peut pas être assurée. Ce dispositif sert de réservoir d'énergie lorsque les sources produisent en excédent et la restitue lorsque les sources ne produisent pas assez. Mais au-delà de cet aspect de réservoir d'énergie, un dispositif de stockage joue à chaque instant un rôle très important dans l'équilibre des puissances produites par un système hybride non connecté au réseau et celle consommée par la charge.

Le principe de conservation impose que la puissance produite par les sources corresponde à la somme de la puissance consommée par l'utilisateur et de celle absorbée par le système lui-même. A un instant donné, il ya peu de chance d'avoir la puissance produite correspondant exactement à celle consommée. L'une des solutions pour ce cas de figure est d'utiliser un système de stockage pour assurer l'équilibre des puissances [DAH2013], [CRO2014].

I.9. Source conventionnelle

Les énergies dites conventionnelles sont des formes d'énergie principales les plus utilisées auparavant pour répondre aux besoins de production et consommation humaines. Parmi ces énergies, les plus utilisées sont l'énergie nucléaire et l'énergie issue des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz naturel).

L'apparition des énergies alternatives qui visent à être une source primaire de production ont fait diminuer l'utilisation des énergies conventionnelles en utilisant des systèmes hybrides à énergie renouvelables. Mais à ce jour les sources conventionnelles occupent toujours le haut de l'échelle dans la production de l'électricité, parmi ces sources on trouve le générateur diesel.

- **Générateur diesel**

Les générateurs diesels consomment du fuel pour produire de l'énergie électrique. Ils sont principalement constitués d'un moteur diesel servant à entrainer une génératrice synchrone et offrent un moyen stable de production d'énergie à long terme.



Fig(1.17) Générateur diesel

L'utilisation de ce dispositif dans les systèmes hybrides autonomes a pour but d'assurer une alimentation sans interruptions en palliant aux éventuelles insuffisances de production. Ils ont été largement utilisés comme alimentation de secours, comme alimentation complémentaire répondant aux pics de charge ou encore comme source d'approvisionnement en électricité [DAH2013].

I.10. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les systèmes hybrides à énergie renouvelable. Au premier lieu, nous avons défini les systèmes hybrides et donné ses classifications selon leurs contenus, ensuite nous avons présenté les différentes architectures qu'utilisent ces systèmes.

En second lieu, nous avons donné les définitions et les généralités sur les sous systèmes formant la structure du système hybride à étudier par la suite qui est : éolien-photovoltaïque associé à un système de stockage en présence d'une source conventionnelle connecté sur un bus continu.

Chapitre II

**Modélisation de la chaîne de conversion
photovoltaïque**

II.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord la modélisation d'un panneau photovoltaïque afin d'obtenir les différentes caractéristiques du courant, de la puissance en fonction de la tension, ainsi que l'influence des paramètres sur le fonctionnement du système photovoltaïque. Puis suivra les différentes méthodes d'extraction de puissance maximale et leurs modélisations « Maximum Power Point Tracking » (MPPT), pour pouvoir vers la fin traiter l'une des problématiques de notre thème, qui est : commande en MPPT et en suivi de référence.

Enfin, nous simulerons sous Matlab Simulink toute la chaîne de conversion photovoltaïque afin de valider cette dernière pour pouvoir ensuite la connecter au bus CC. Cette chaîne est constituée de : panneau photovoltaïque, MPPT avec suivi de référence et un hacheur survolteur qui va amplifier la tension de sortie de la chaîne.

II.2. Modélisation d'un module photovoltaïque

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits qui le constituent. De nombreux modèles mathématiques ont été développés pour décrire le comportement non linéaire qui résulte des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

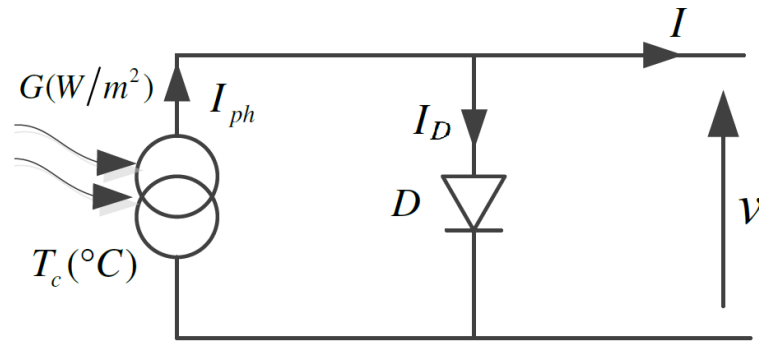
En général ce choix de modèle dépend toujours de l'usage que l'on veut en faire, mais aussi des informations dont on dispose pour déterminer les paramètres [MER2010]. Dans notre cas, les données dont nous disposons sont issues du constructeur et nous permettent de développer un modèle de cinq paramètres à une seule diode qui est le modèle de *Kaiser* et *Reise* [ALL2011]. Ces différents paramètres sont :

- Le courant photonique (le photo-courant),
- Le courant de fuite de la jonction ou de la diode,
- Le coefficient d'imperfection de la diode,
- La résistance série de la cellule,
- La résistance parallèle (shunt) de la cellule.

Mais avant de passer au modèle que nous utiliserons par la suite, nous allons tout d'abord définir les différents paramètres principaux d'un PV en utilisant le cas d'une cellule idéale.

II.2.1. Cas d'une cellule PV idéale

Une cellule solaire photovoltaïque est une diode de jonction P-N de grande surface, soumise à un éclairage et sous une température donnée produit une différence de potentiel à ses bornes. Dans le cas idéal comme le montre la figure (2.1), la cellule se schématise par un générateur de courant idéal (I_{ph}) modélisant le flux lumineux, en parallèle avec une diode.


Fig(2.1) Représentation d'une cellule photovoltaïque idéale

A. Modèle d'une cellule PV idéale

En utilisant la loi des nœuds, elle nous permet d'écrire :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (\text{II.1})$$

Le courant de jonction I_D est donné par :

$$I_D = I_0 * \left(e^{\frac{q*V}{a*k*T_r}} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

En remplaçant l'équation (II.2) dans (II.1) on obtient l'expression du courant I :

$$I = I_{ph} - I_0 * \left(e^{\frac{q*V}{a*k*T_r}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

I_{ph} : Photo-courant généré par les rayons incidents, directement proportionnel à l'éclairement du soleil et il dépend aussi de la température.

I_0 : Courant de fuite de la diode

$q = 1,6.10^{-19} C$: Charge de l'électron

$k = 1,38.10^{-23} J / ^\circ K$: Constante de Boltzmann

T_r : Température réelle en $^\circ K$

a : Constante de non idéalité de la diode ; $1 \leq a \leq 1.5$

v : Tension du panneau photovoltaïque

A.1 Le photo-courant I_{ph} : La valeur du photo-courant se calcule à partir de la relation suivante :

$$I_{ph} = G * I_{sc} \quad (II.4)$$

Où G est l'éclairement relatif, exprimé par rapport à l'éclairement de référence égal à 1000 W/m² ; $G = \frac{G_{Réel}}{G_{Nominal}}$ (G=1 correspond à un éclairement de 1000 W/m²)

Avec :

$$I_{sc} = I_{cc} * (1 + \alpha * (T_r - T_n)) \quad (II.5)$$

I_{sc} est le courant de court-circuit de la cellule à la température réelle

I_{cc} est le courant de court-circuit de la cellule à la température nominale

T_n est la température nominale en °K ($T_n = 25 + 273 = 298^\circ K$)

T_r est la température réelle en °K

α est le coefficient de température pour le calcul de I_{sc} ($\alpha = 0.65 \cdot 10^{-3}$)

A.2 Le courant de fuites de la diode I_0 : Le courant I_0 se calcule à partir de la relation suivante :

$$I_0 = I_{0_Tn} * \left(\frac{T_r}{T_n} \right)^{\frac{3}{a}} * e^{\left(\frac{-E_g * q * \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T_n} \right)}{a * k} \right)} \quad (II.6)$$

Où

$$I_{0_Tn} = \frac{I_{cc}}{\left(\frac{V_{oc}}{e^{V_{t_Tn}} - 1} \right)} \quad (II.7)$$

Avec :

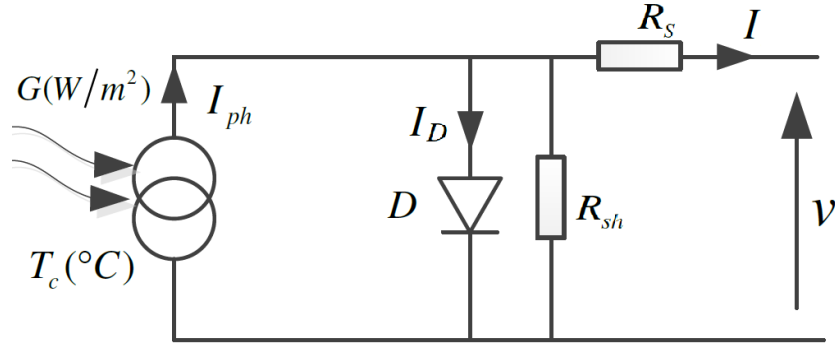
V_{oc} : La tension de circuit ouvert de la cellule à la température nominale (25°C ou 298°K), donnée par le constructeur

$V_{t_Tn} = a * k * \frac{T_n}{q}$: Le potentiel thermique à la température nominale T_n (II.8)

E_g : L'énergie de la bande interdite (gap) du semi-conducteur (en eV)

II.2.2. Cas d'une cellule PV réelle :

En plus du générateur de courant et de la diode, une résistance R_s qui tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal est mise en série, une résistance parallèle R_{sh} (shunt) est aussi rajoutée au schéma de la figure (2.1) pour traduire la présence d'un courant de fuite dans la jonction, figure (2.2).



Fig(2.2) Représentation d'une cellule photovoltaïque réelle

B. Modélisation d'une cellule PV réelle :

En utilisant la loi des nœuds et des mailles, elle nous permet d'écrire :

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left(\exp \left(\frac{V + R_s \cdot I}{V_{t_T_r}} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_s \cdot I}{R_p} \quad (\text{II.9})$$

Où :

I_{ph} : est le photo-courant décrit par la relation (II.4)

I_0 : est le courant de diode décrit par la relation (II.6)

$\frac{V + R_s \cdot I}{R_p}$: est le courant de fuite de la résistance parallèle

$V_{t_T_r} = a \cdot k \cdot \frac{T_r}{q}$: Le potentiel thermique de la cellule PV à la température T_r

II.2.3. Cas d'un panneau réel :

Un panneau Photovoltaïque d'une puissance donnée est l'assemblage de plusieurs modules en série N_{ss} pour augmenter la tension de sortie et en parallèle N_{pp} pour amplifier le courant de sortie, ces modules sont constitués de plusieurs cellules en séries N_s [BOU2015], d'où on obtient l'équation générale qui est :

$$I = I_{ph} \cdot N_{pp} - I_0 \cdot N_{pp} \cdot \left(\exp \left(\frac{V + I \cdot R_s \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{V_{t_T_r} \cdot N_{ss}} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{R_p \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (\text{II.10})$$

Où :

$$V_{t_T_r} = N_s \cdot a \cdot k \cdot \frac{T_r}{q} : \text{Le potentiel thermique du module PV à la température } T_r$$

N_s : Nombre de cellules en série

N_{ss} : Nombre de modules en série

N_{pp} : Nombre de modules en parallèle

II.3. Caractéristiques d'un PV

❖ Courant-tension

La courbe $I = f(V)$ représentée sur la figure (2.3) est la caractéristique fondamentale d'un panneau solaire de type **bp_sx150s**. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalé le long de l'axe du courant d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement voir l'équation (II.4) [BOU2012]. Elle se trace sous des conditions météorologiques nominales avec un éclairement fixe de $G_n = 1000 \text{ W/m}^2$ et une température nominale constante de ($T_n = 25 + 273 = 298^\circ \text{K}$)

❖ Puissance tension

La courbe $P = f(V)$ sur la figure (2.3) représente la caractéristique de la puissance débitée par le panneau photovoltaïque pour chaque point de son fonctionnement. Cette puissance est obtenue par le produit de l'intensité de courant et de la tension aux bornes du PV

La crête de cette dernière caractéristique définit la puissance maximale que peut fournir le panneau. En lui faisant une projection sur la caractéristique de courant-tension, on déduit le point de fonctionnement max (V_{pmax}, I_{pmax})

❖ Tension de circuit ouvert

C'est la tension V_{oc} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale que peut débiter le PV). Elle est déduite de l'équation suivante :

$$0 = I_{ph} \cdot N_{pp} - I_0 \cdot N_{pp} \cdot \left(\exp \left(\frac{V_{oc}}{V_t - T_r \cdot N_{ss}} \right) - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_p \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (\text{II.11})$$

❖ Courant de court-circuit

C'est le courant I_{sc} pour lequel la tension aux bornes du PV est nulle. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_{sh} infinie) ce courant se confond avec le photo courant I_{ph} et dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation de courant, on obtient :

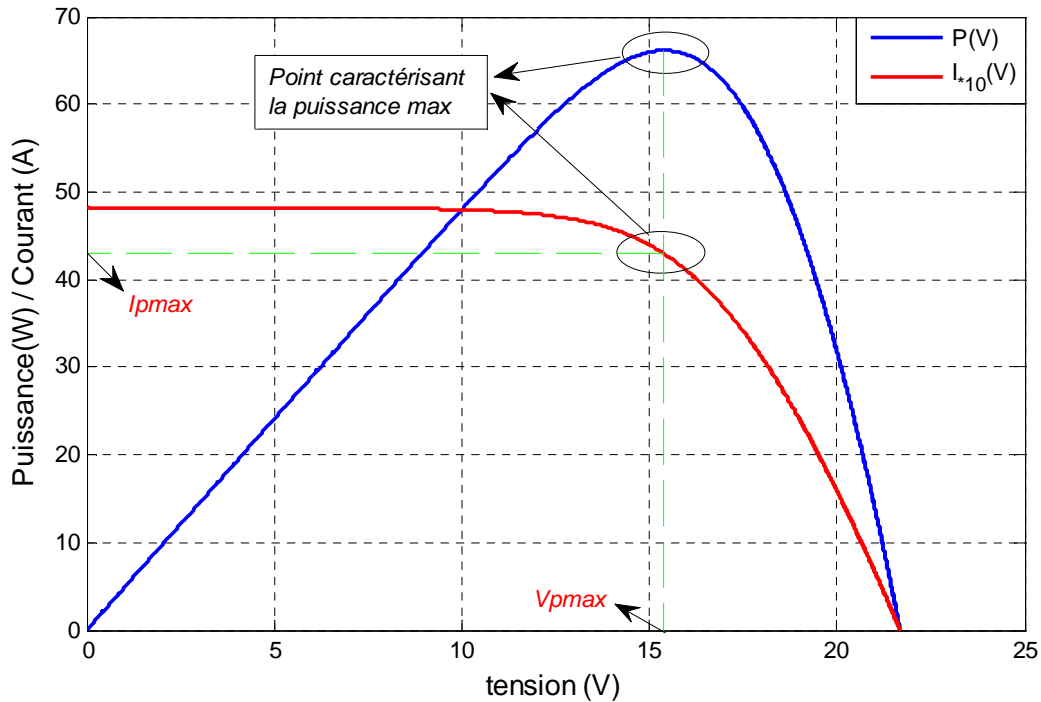
$$I_{sc} = I_{ph} \cdot N_{pp} - I_0 \cdot N_{pp} \cdot \left(\exp \left(\frac{I_{sc} \cdot R_s \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{V_t - T_r \cdot N_{ss}} \right) - 1 \right) - \frac{I_{sc} \cdot R_s \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)}{R_p \cdot \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (\text{II.12})$$

❖ Facteur de forme

Le facteur de forme (**FF**), dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage, il est défini par :

$$FF = \left(\frac{V_{pmax} * I_{pmax}}{V_{oc} * I_{sc}} \right) \quad (\text{II.13})$$

Ce facteur montre la déviation de la caractéristique courant-tension par rapport à un rectangle (de longueur V_{oc} et de largeur I_{sc})



Fig(2.3) Différentes caractéristiques du PV et le point de fonctionnement optimal

II.4. Influence de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques d'un PV

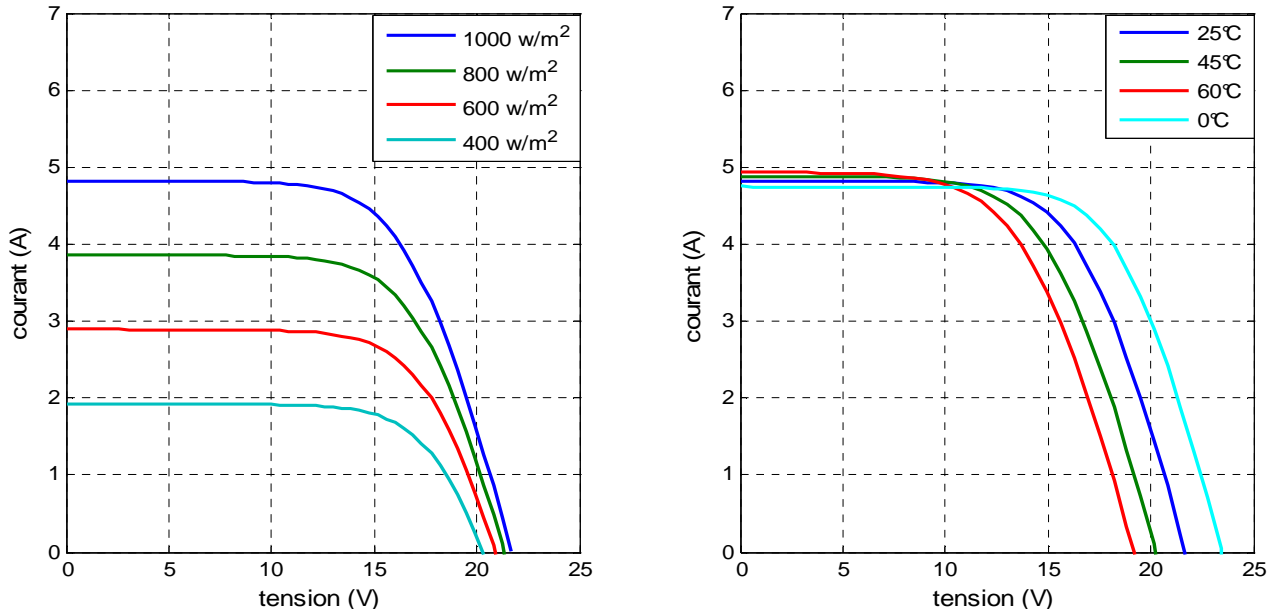
Comme nous l'avons signalé précédemment dans la modélisation, l'éclairement et la température influent directement sur les paramètres du PV et ces derniers engendrent des variations des caractéristiques de ce PV, un exemple est présenté sur la figure (2.4), d'où on déduit [REY2011] :

❖ Effet d'éclairement

On constate que le courant de court circuit est proportionnel à l'éclairement (voir figure (2.4-a)), tandis que la tension à vide ou bien à circuit ouvert varie peu avec ce dernier, ce qui nous mènes à la considérer comme étant une constante dans une application donnée.

❖ Effet de la température

La tension à circuit ouvert décroît avec la température (voir figure (2.4-b)). Plus la température est élevée, plus V_{oc} est faible, par contre le courant de court circuit a augmenté légèrement, mais cette hausse est vraiment faible par rapport à la variation de la tension et que l'influence de la température sur le courant de court circuit est souvent négligée vers la fin.



a) A température nominale (25°C)

 b) A éclairement nominal (1000 W/m²)

Fig(2.4) Influence des conditions climatiques sur la caractéristique $I(V)$ d'un PV

II.5. Modélisation des convertisseurs DC/DC

Comme nous l'avons vu dans l'exemple précédent, les caractéristiques $P = f(V)$ et $I = f(V)$, le point de puissance maximal n'est atteint qu'à une certaine valeur de la tension et du courant qui sont légèrement inférieurs respectivement à V_{oc} et I_{sc} . Pour que le panneau puisse fournir sa puissance maximale, il lui faut un adaptateur permanent à insérer entre le PV et la charge.

Cet étage d'adaptation est assuré à l'aide des convertisseurs DC/DC (hacheur) qui sont contrôlés par un mécanisme de poursuite « Maximum Power Point Tracking » (MPPT) [BEN2012], donc nous sommes amenés à les modéliser pour les utiliser par la suite soit dans les MPPT ou bien pour la connexion des différentes sources sur le bus CC

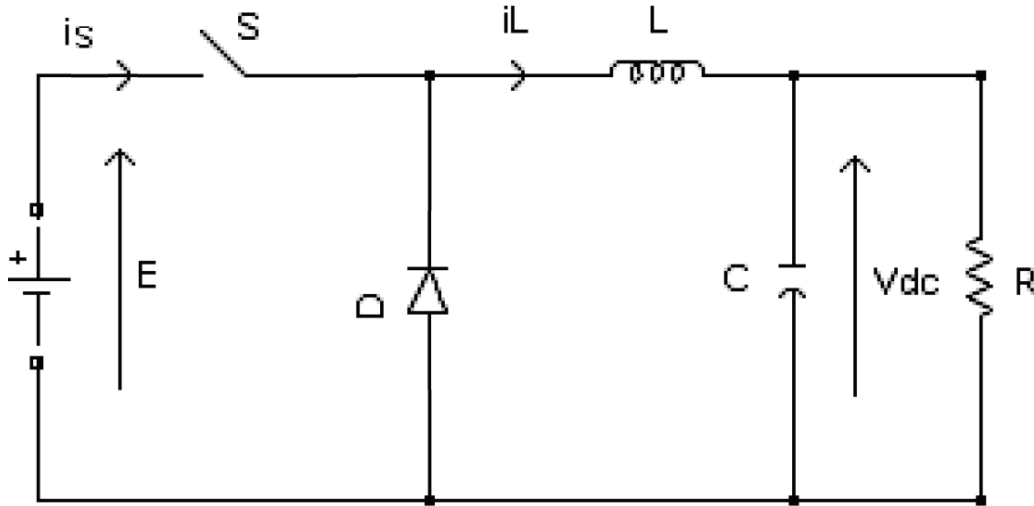
Le modèle mathématique des hacheurs soit série ou parallèle est obtenu par l'application des lois de Kirchhoff par rapport au régime de fonctionnement et la condition de l'interrupteur S .

II.5.1. Convertisseur BUCK

En analysant les différentes séquences d'interruptions et de conductions du hacheur, avec l'application de la lois des mailles et des nœuds sur le schéma de la figure (2.5), nous aboutirons à des équations sous la forme suivante :

$$L \frac{di_L}{dt} = \alpha E - V_{dc} \quad (\text{II.14})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.15})$$



Fig(2.5) Schéma de principe du hacheur série

Les équations dynamiques du hacheur sont dérivées pour le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur en régime de conduction [SPI2009], où i_L est le courant qui circule dans l'inductance L , E la tension d'entrée, V_{dc} la tension de sortie et α le rapport cyclique.

Soit $x_1 = i_L$ et $x_2 = V_{dc}$

$$\dot{x}_1 = \frac{\alpha E}{L} - \frac{x_2}{L} \quad (\text{II.16})$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (\text{II.17})$$

Dans ce cas, un modèle d'état peut être défini sous forme $\dot{x} = Ax - Bu$ à partir des équations (II.16) et (II.17), comme suit :

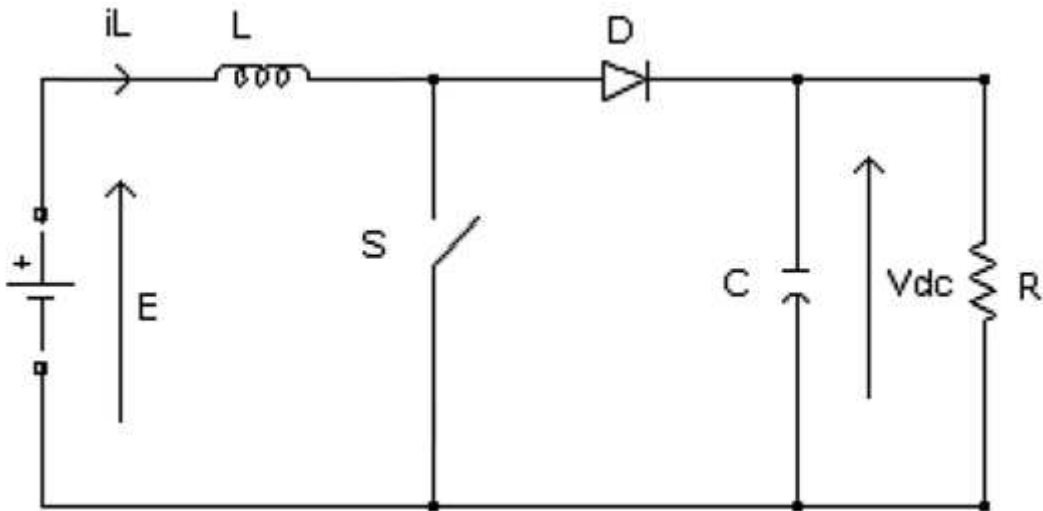
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (\text{II.18})$$

II.5.2. Convertisseur BOOST

Comme nous l'avons vu dans les convertisseurs BUCK, que l'application des lois de Kirchhoff au circuit du convertisseur BOOST de la figure (2.6) sous de différents états du hacheur, elles vont nous emmener à un résultat d'équations définies ci-dessous :

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_{dc} (1 - \alpha) \quad (\text{II.19})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L (1 - \alpha) - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.20})$$



Fig(2.6) Schéma de principe du hacheur parallèle

Les équations dynamiques s'écrivent :

$$\dot{x}_1 = \frac{E}{L} - \frac{x_2(1-\alpha)}{L} \quad (\text{II.21})$$

$$\dot{x}_2 = \frac{x_1(1-\alpha)}{C} - \frac{x_2}{RC} \quad (\text{II.22})$$

et son modèle d'état peut s'écrire ainsi :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-\alpha}{L} \\ \frac{1-\alpha}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (\text{II.23})$$

II.6. Stratégie de gestion de puissance

L'objectif principal des stratégies de gestion proposé dans ce mémoire est d'extraire une puissance optimale d'un panneau photovoltaïque dans le but de satisfaire au mieux la puissance de la charge. Pour cela nous avons proposé deux algorithmes pour gérer les flux de

puissance : le premier algorithme consiste à travailler en MPPT dont nous citons quelques algorithmes et le second algorithme est formulé sous forme de problème d'optimisation, il utilise le principe des MPPT avec suivie de référence dans le but d'assurer l'équilibre de puissance entre la source et la charge.

II.6.1. Algorithmes MPPT

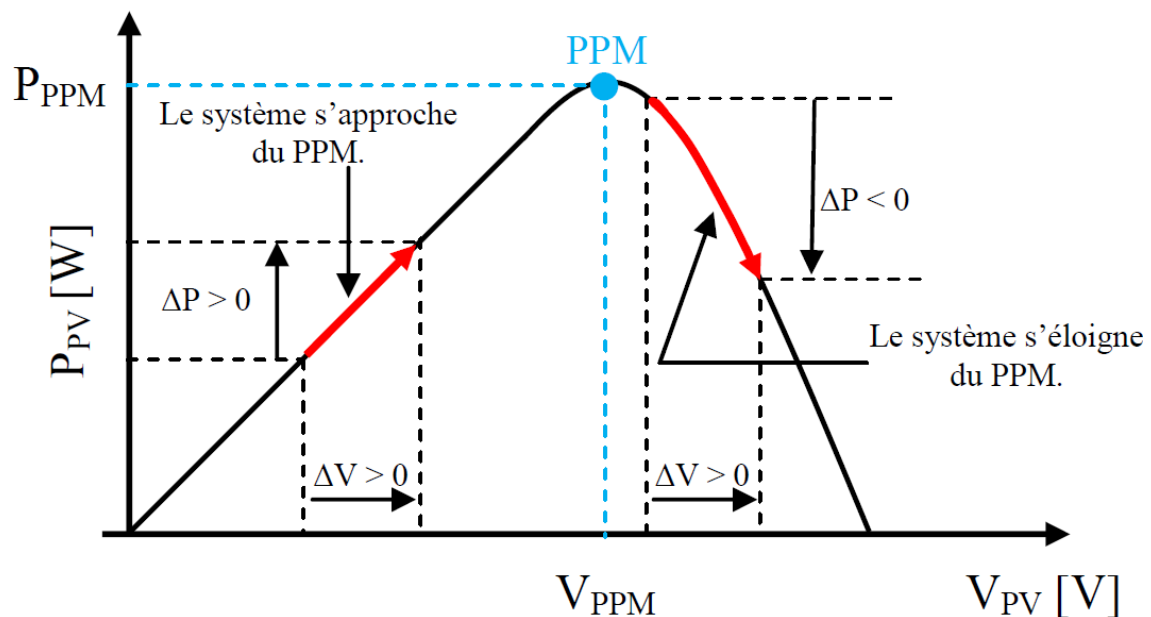
Dans le but de transférer en permanence la puissance maximale produite par le générateur photovoltaïque à la charge, l'idée c'est de le faire fonctionner en point qui caractérise la puissance maximale (voir figure (2.3)) à l'aide de différentes commandes MPPT, dont nous citons certaines d'entre elles que nous avons simulées dans Matlab Simulink :

a) Algorithme Perturbation & Observation (P&O)

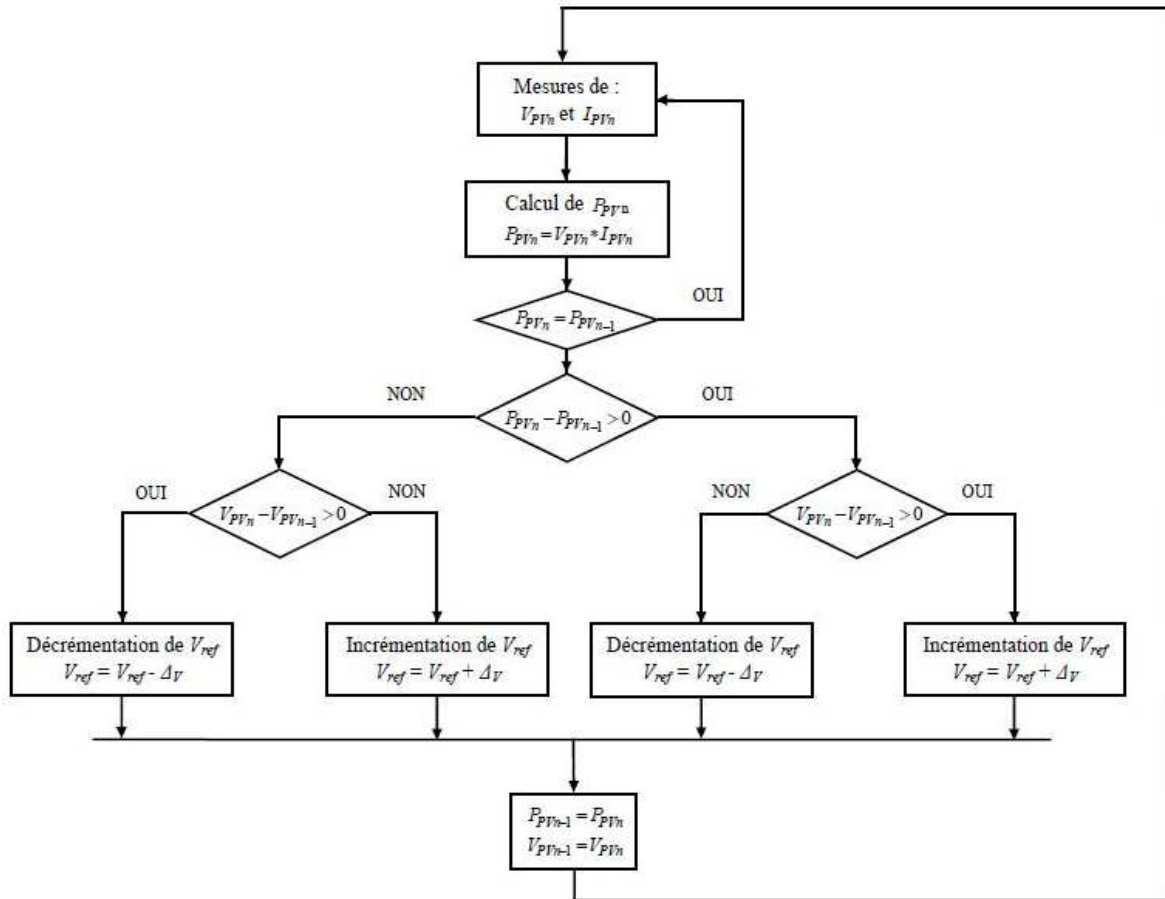
Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension V_{pv} avec une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{pv} qui en résulte. Ainsi, comme l'illustre la figure (2.7), on peut déduire que si une incrémentation positive de la tension V_{pv} engendre un accroissement de la puissance P_{pv} , cela signifie que le point de fonctionnement du PV se trouve à gauche et il s'approche du PPM, donc cette incrémentation doit être maintenue positive jusqu'à atteindre ce dernier.

Dans le cas contraire, la puissance décroît, cela signifie que le point de fonctionnement du PV se trouve à droite et il s'éloigne du PPM dans ce cas, il faut plutôt diminuer la tension. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît [CAB2008].

L'organigramme de la figure (2.8) est établi à la base de ce raisonnement



Fig(2.7) Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau solaire[CAB2008]



Fig(2.8) Organigramme de l'algorithme P&O [CAB2008]

b) Incrément de conductance

Pour la recherche du PPM, Le principe de cette méthode repose sur la connaissance de la variation de la conductance du générateur PV. Ainsi, la conductance du module photovoltaïque est définie par le rapport entre le courant et la tension du générateur PV, comme suit :

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \quad (\text{II.24})$$

et une variation élémentaire de cette dernière peut être définie par :

$$dG = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (\text{II.25})$$

Dans ce cas le PPM est atteint seulement si la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle.

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} \frac{dV_{pv}}{dV_{pv}} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv} \cdot \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \quad (\text{II.26})$$

$$-\frac{I_{pv}}{V_{pv}} = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \quad (II.27)$$

le terme de gauche de l'équation (II.28) représente au signe près la conductance tandis que le terme qui est dans la droite représente sa variation

$$-G = \Delta G \quad (II.28)$$

Pour les autres cas où le PPM n'est pas atteint une incrémentation ou une décrémentation de la tension doit se faire selon le point de fonctionnement du générateur PV voir figure (2.9) ci-dessous :

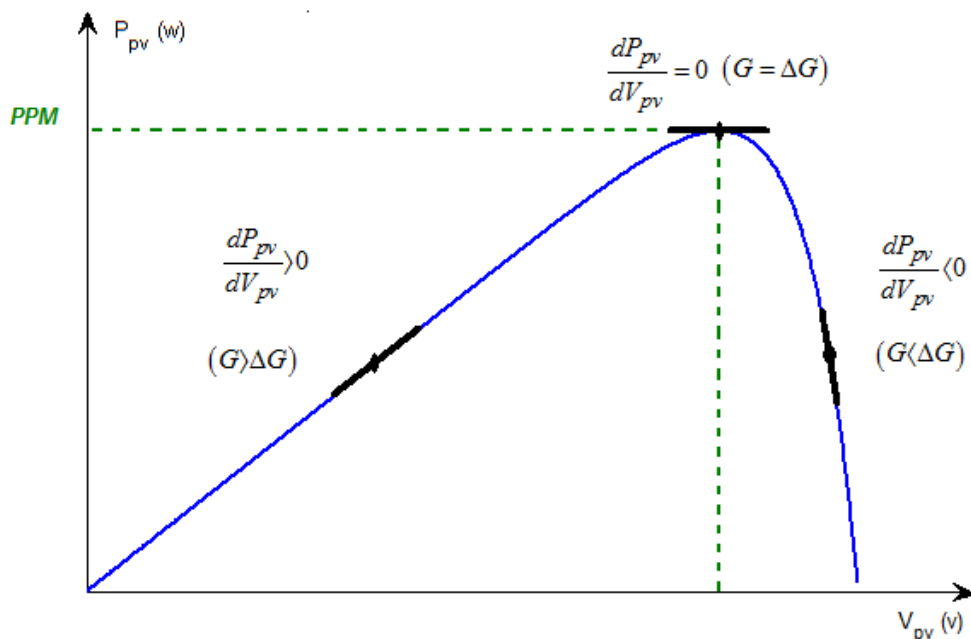
Si le $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0 \Rightarrow$ le point de fonctionnement est à gauche du PPM \Rightarrow incrémentation

de la tension

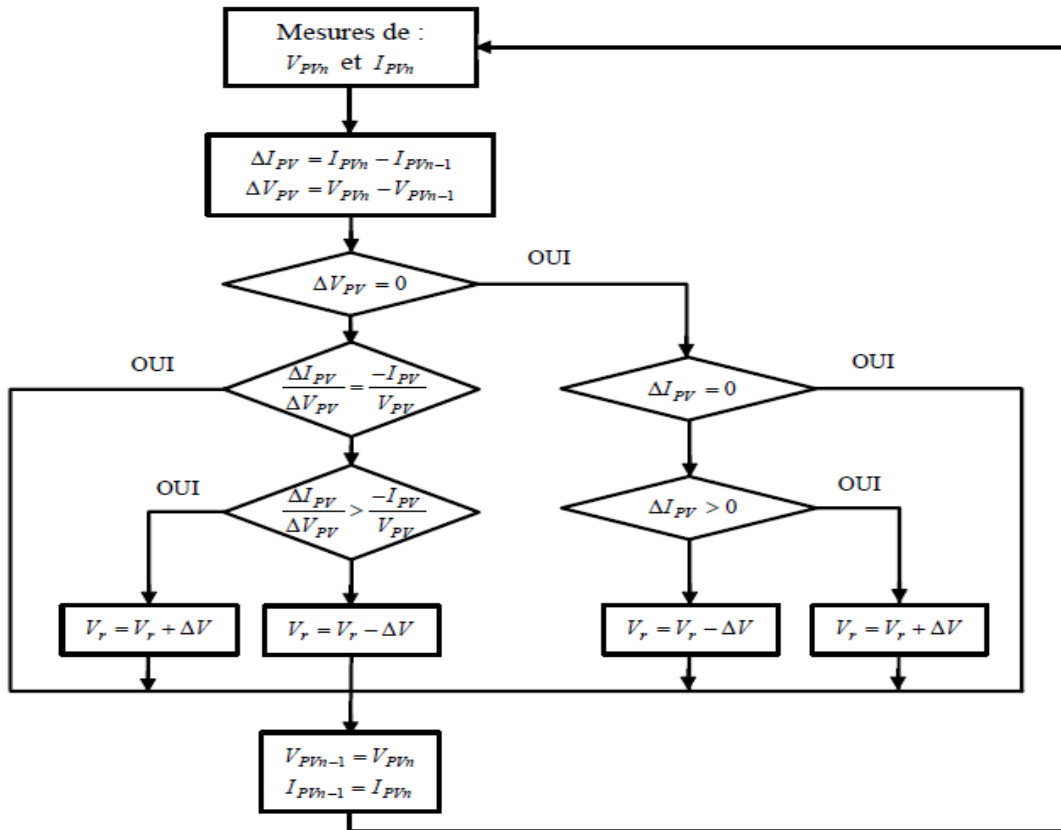
Si le $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0 \Rightarrow$ le point de fonctionnement est à droite du PPM \Rightarrow décrémentation de

la tension

L'organigramme de la figure (2.10) est établi sur la base de ce raisonnement.



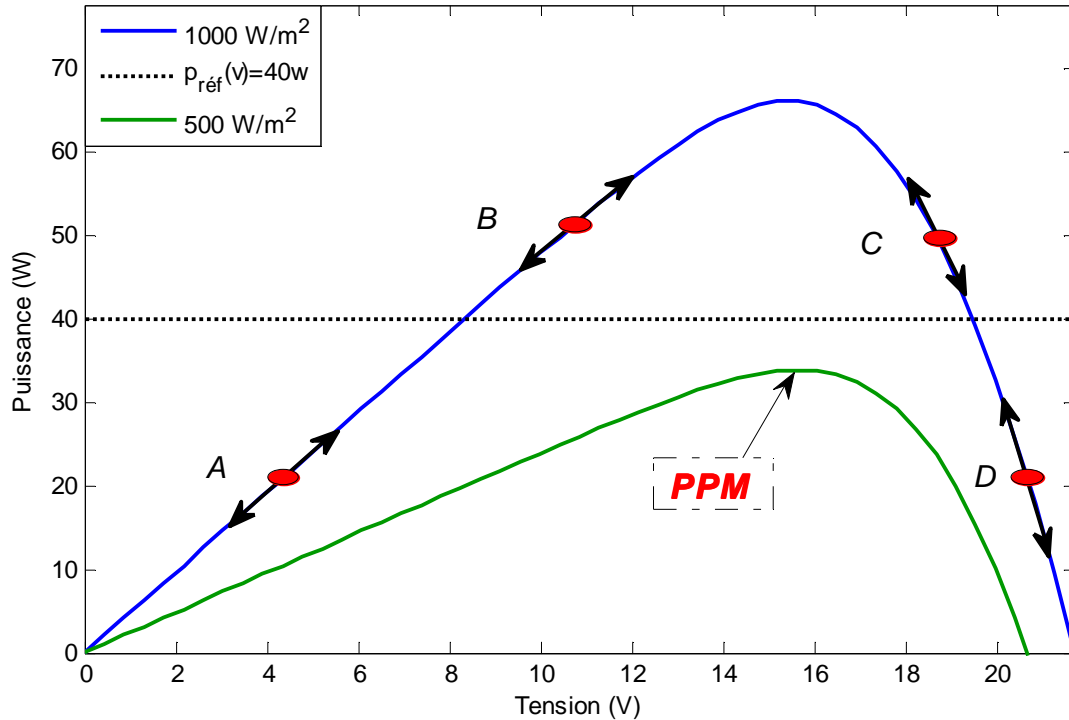
Fig(2.9) Principe de l'algorithme d'Incément de Conductance



Fig(2.10) Organigramme de l’algorithme d’incrément de conductance [CAB2008]

II.6.2. Algorithmes MPPT et suivi de référence

Les algorithmes MPPT sont généralement étudiés en considérant la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, le même raisonnement a été appliqué pour en faire une commande en puissance avec l’algorithme P&O. Au début pour expliquer le Principe de l’algorithme P&O en suivi de référence, nous aurons à tracer deux signaux principaux en fonction d’une variable aussi principale qui est la tension, figure (2.11). Ces signaux sont : la puissance du PV et la puissance référence



Fig(2.11) Principe de l'algorithme P&O avec suivi de référence

Ce résonnement a été appliqué sur de nombreux points (A, B, C, D) par rapport à la référence, d'où on obtient :

Je suis au point A :

Si quand V_{pv} augmente, P_{pv} augmente et $\|P_{pv} - Pr ef\|$ diminue, je suis donc au point A et je m'approche de la référence (flèche montante) : je dois augmenter V_{pv}

Si quand V_{pv} diminue, P_{pv} diminue et $\|P_{pv} - Pr ef\|$ augmente, je suis donc au point A et je m'éloigne de la référence (flèche descendante): je dois augmenter V_{pv}

Je suis au point B :

Si quand V_{pv} augmente, P_{pv} augmente et $\|P_{pv} - Pr ef\|$ augmente je suis donc au point B et je m'éloigne de la référence (flèche montante): je dois diminuer V_{pv}

Si quand V_{pv} diminue, P_{pv} diminue et $\|P_{pv} - Pr ef\|$ diminue je suis donc au point B et je m'approche de la référence (flèche montante): je dois diminuer V_{pv}

Je suis au point C :

Si quand V_{pv} augmente, P_{pv} diminue et $\|P_{pv} - P_{ref}\|$ diminue, je suis donc au point C et je m'approche de la référence (flèche descendante): je dois augmenter V_{pv}

Si quand V_{pv} diminue, P_{pv} augmente et $\|P_{pv} - P_{ref}\|$ augmente, je suis donc au point C et je m'éloigne de la référence (flèche montante): je dois augmenter V_{pv}

Je suis au point D :

Si quand V_{pv} augmente, P_{pv} diminue et $\|P_{pv} - P_{ref}\|$ augmente je suis donc au point D et je m'éloigne de la référence (flèche descendante) : je dois diminuer V_{pv}

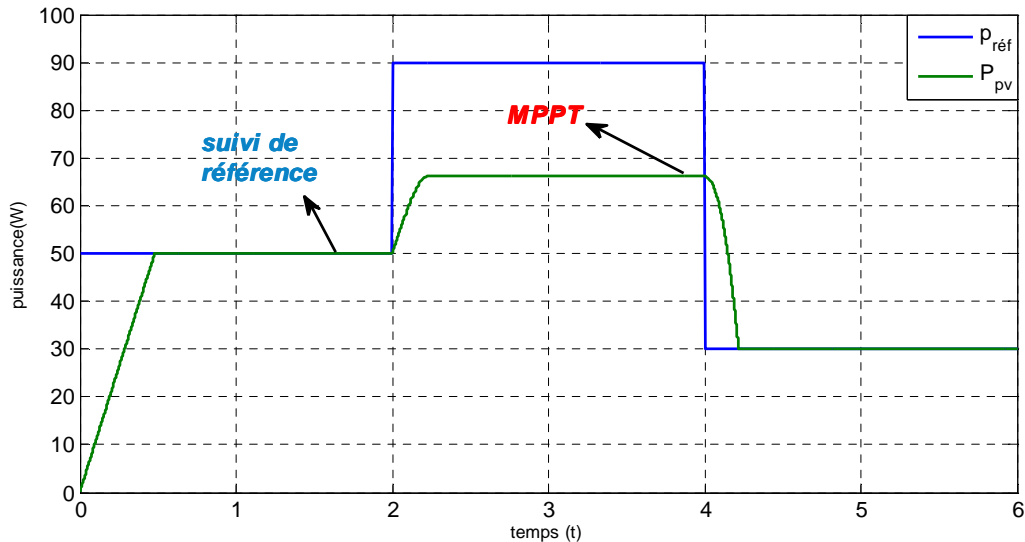
Si quand V_{pv} diminue, P_{pv} augmente et $\|P_{pv} - P_{ref}\|$ diminue je suis donc au point D et je m'approche de la référence (flèche montante): je dois diminuer V_{pv}

De plus, si les conditions climatiques ne permettent pas au générateur PV de suivre la référence (P_{ref}) à la puissance maximale que peut délivrer le PV). Dans ce cas, le principe de l'ancien algorithme qui consiste à travailler en MPPT sera pris en compte et le PV sera mené à fonctionner en PPM.

Pour en définir beaucoup plus l'algorithme, nous sommes amenés à construire un organigramme qui enveloppe tout le raisonnement et les définitions que nous avons pu faire, figure (2.12):

II.7. simulation

La simulation a été faite sur un exemple de profile de charge imaginaire sous des conditions climatiques nominales. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure (2.13).



Fig(2.13) Commande de puissance d'un PV avec l'algorithme P&O

La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant, elle présente quelques problèmes liés à la vitesse de recherche du PPM ou du point de référence et aux oscillations autour de ces derniers en régime établi. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrémentacion ralentit la recherche du PPM, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité.

II.8. Conclusion

Ce chapitre a pu définir le travail que nous avons effectué dans la partie photovoltaïque. Nous avons procédé par la modélisation du panneau photovoltaïque via son schéma équivalent, des convertisseurs DC/DC et la réalisation de la commande MPPT en suivi de référence. Ensuite nous avons simulé la chaîne PV pour valider l'algorithme de suivi de référence et de garantir un équilibre de puissance de la part du PV par rapport à la charge dans un site isolé.

Après validation de l'algorithme, toute la chaîne de conversion photovoltaïque sera connectée au bus CC avec les autres sources formant le système hybride autonome que nous allons voir dans le quatrième chapitre.

Chapitre III

**Modélisation de la chaîne de
conversion éolienne**

+III.1. Introduction

L'évolution des différentes technologies de l'exploitation de l'énergie du vent a ouvert un champ de recherche à de nombreuses structures qui utilisent les machines asynchrones à cage.

Avec leurs performances et robustesses, les génératrices asynchrones auto-excitées occupent une large place dans la conversion de l'énergie éolienne, spécialement celles qui fonctionnent en sites isolés autonomes. De plus, ces génératrices sont auto-protégées puisque leurs tensions et leurs courants s'effondrent en cas de court-circuit de la charge.

Dans ce chapitre, nous nous consacrons à l'étude de la structure qui a été présentée dans le premier chapitre, figure (1.16). qui est : L'éolienne qui utilise la machine asynchrone auto-excitée par un banc de condensateurs (GAAE) connectée sur un bus CC par l'intermédiaire d'un redresseur-hacheur série fonctionnant en sites isolés. L'absence des paramètres d'une turbine éolienne adéquats à la puissance de notre machine, nous a conduits à l'étudier dans des vitesses de rotation constantes.

Ce chapitre est réparti comme suit : en premier lieu, nous allons développer un modèle dynamique de la génératrice asynchrone auto-excitée qui va être relié pas la suite au redresseur à MLI utilisant une commande directe de puissance (DPC). Pour pouvoir à la fin valider la chaîne de conversion de l'énergie éolienne avec une brève simulation et la connecter par suite dans le quatrième chapitre au système global.

III.2. Principe de fonctionnement du GAAE

Les génératrices asynchrones auto-excitées fonctionnant en sites isolés doivent obligatoirement tenir compte de la saturation, puisque c'est elle-même qui fixe le point de fonctionnement avec la présence des bancs de condensateurs qui sont connectés aux bornes du stator de ces génératrices et qui leur serviront d'excitation. Car ces génératrices n'engendrent pas leur propre énergie d'excitation. C'est pour cette raison qu'il faut lui apporter cette énergie et stabiliser à la fin sa tension de sortie et sa fréquence [LOU2010].

Le phénomène d'auto-amorçage est créé à travers une certaine F.é.m dans le bobinage statorique qui est due au magnétisme résiduel du rotor, lorsque celui-ci est entraîné à une vitesse nécessaire. Cette F.é.m appliquée à la branche statorique initialement en série avec la capacité d'auto-amorçage (la GAAE est à vide « circuit RLC ») produit dans chaque phase du stator un courant magnétisant qui produit à son tour un flux d'entrefer qui vient s'ajouter au flux résiduel pour créer par rotation une F.é.m plus grande. C'est cette réaction cyclique qui permet à la génératrice d'atteindre un régime permanent situé dans la zone de saturation avec un fonctionnement d'une amplitude de tension souhaité [HAD2017].

III.2.1. Courbe caractérisant la saturation

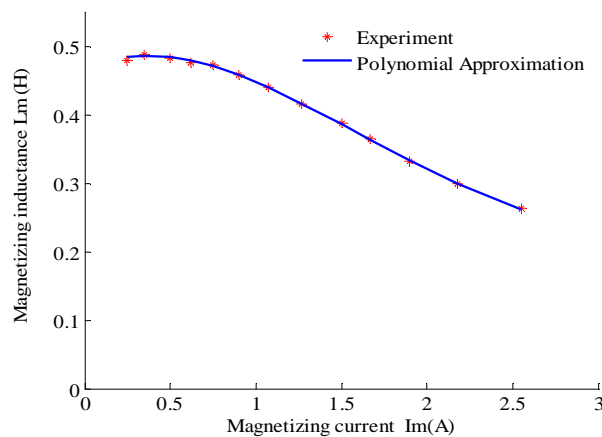
Dans le but de tenir compte de la saturation d'une façon simple, nous avons choisi de l'exprimer par une inductance magnétisante L_m variable en fonction du courant magnétisant i_m

$(L_m(i_m))$ qui va nous permettre de calculer les termes qui caractérisent la saturation dans le développement des équations du modèle dynamique de la GAAE en tenant compte de la saturation.

La forme de la fonction $L_m(i_m)$ est obtenue par identification de la caractéristique de magnétisation. Dans le cas d'une machine à cage, cette caractéristique est relevée par un essai à la vitesse de synchronisme.

La forme de la courbe $L_m(i_m)$ est représentée sur figure (3.1) et son approximation par une fonction polynomiale d'ordre quatre:

$$L_m = 0.056 * i_m^4 + 0.0577 * i_m^3 - 0.1886 i_m^2 + 0.1187 * i_m + 0.4662$$

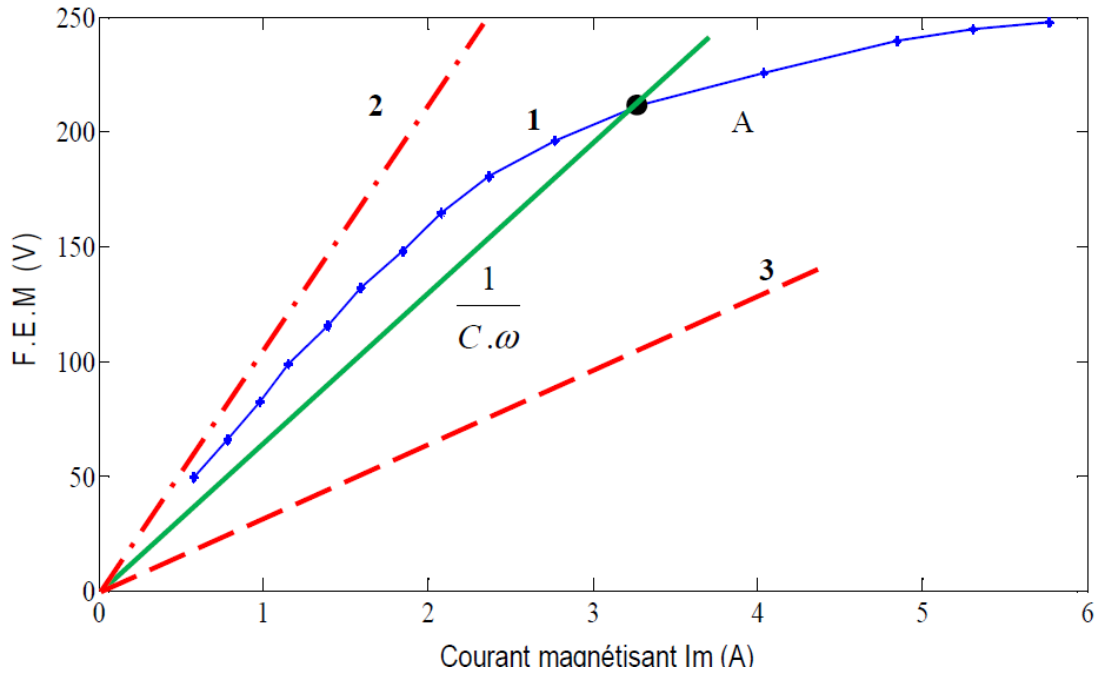


Fig(3.1) Caractéristique de magnétisation de la machine de 1.1 kw

III.2.2. Le choix du condensateur d'auto-amorçage [SI_B2015]

Le régime permanent ou le point d'équilibre n'est atteint qu'avec une contribution de certains paramètres de valeurs bien spécifiées, ces paramètres sont : vitesse de rotation, capacité et une caractéristique de magnétisation. Ce point est défini par l'intersection de la caractéristique $L_m(i_m)$ (Inductance magnétisante en fonction du courant magnétisant) avec la droite de l'impédance capacitive (point A de la figure (3.2)).

Si la capacité est trop basse (courbe 2 de la figure (3.2)), cela produit un courant capacitif négligeable et la génératrice ne s'amorce pas. Dans l'autre cas, si elle est trop grande (courbe 3 de la figure (3.2)), la machine s'amorce mais la branche statorique s'apparente à un court-circuit (impédance capacitive faible) et la tension se met à diminuer.



Fig(3.2) F.é.m magnétisante en fonction du courant magnétisant

Dans ce cas, la capacité est calculée à travers les équations d'auto-amorçage que nous allons voir dans par la suite dans la modélisation du phénomène d'auto-amorçage.

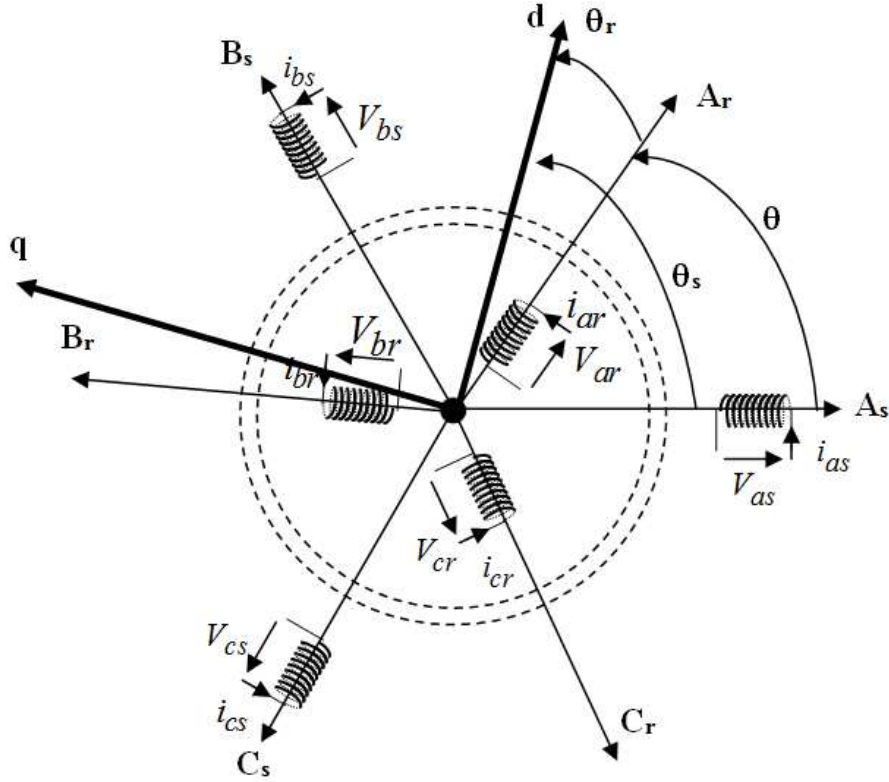
III.3. Modèle dynamique de la GAEE

III.3.1. Description :

Les armatures du stator et du rotor sont toutes deux cylindriques (entrefer constant) ; munies chacune d'un enroulement triphasé.

Les enroulements statoriques et rotoriques sont représentés à droite de leurs axes magnétiques.

La machine est représentée dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, comme illustrer sur la figure (3.3).



Fig(3.3) Machine asynchrone bipolaire, représentation dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation

III.3.2. Définition des angles :

$$(oA_s, od) = \theta_s \quad ; \quad (oB_s, od) = \theta_s - \frac{2\pi}{3} \quad ; \quad (oC_s, od) = \theta_s - \frac{4\pi}{3}$$

$$(oA_r, od) = \theta_r \quad ; \quad (oB_r, od) = \theta_r - \frac{2\pi}{3} \quad ; \quad (oC_r, od) = \theta_r - \frac{4\pi}{3}$$

$$(oA_s, oA_r) = \theta_s - \theta_r = \theta \quad (od, oq) = \frac{\pi}{2}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt}$$

III.3.3. Equations électriques (dans les axes a,b,c) :

$$\begin{aligned} (v_{as}) &= \frac{d(\varphi_{as})}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_{as}) & ; & \quad (v_{ar}) = \frac{d(\varphi_{ar})}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_{ar}) \\ (v_{bs}) &= \frac{d(\varphi_{bs})}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_{bs}) & ; & \quad (v_{br}) = \frac{d(\varphi_{br})}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_{br}) \\ (v_{cs}) &= \frac{d(\varphi_{cs})}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_{cs}) & ; & \quad (v_{cr}) = \frac{d(\varphi_{cr})}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_{cr}) \end{aligned} \quad (III.1)$$

III.3.4. Ecriture matricielle des équations électriques :

$$\begin{aligned}
 (v_s) &= \frac{d(\phi_s)}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_s) \quad ; \quad (v_r) = \frac{d(\phi_r)}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_r) \\
 (v_s) &= (v_{as} \quad v_{bs} \quad v_{cs})^t \quad ; \quad (v_r) = (v_{ar} \quad v_{br} \quad v_{cr})^t \\
 (i_s) &= (i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs})^t \quad ; \quad (i_r) = (i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr})^t
 \end{aligned} \tag{III.2}$$

Avec :

$$[\mathcal{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad ; \quad [\mathcal{R}_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \tag{III.3}$$

III.3.5. Transformation de Park :

Elle consiste à appliquer aux courants, tensions et flux, un changement de variables faisant intervenir l'angle entre les axes des phases et les axes d et q.

Dans la matrice de Park, c'est l'angle θ_s qui intervient pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques.

On définit donc les matrices de Park et matrices inverses suivantes :

$$P(\theta_s) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin \theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} ; P(\theta_s)^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{III.4}$$

Notons que ces équations correspondent à un système d'axes d et q où l'axe q est en avance par rapport à l'axe d. C'est-à-dire que la matrice de Park et son inverse s'expriment comme suit :

La transformation de Park pour les courants se présente comme suit :

$$(i_{ps}) = P(\theta_s) \cdot (i_s) \quad \Rightarrow \quad (i_s) = P(\theta_s)^{-1} \cdot (i_{ps}) \tag{III.5}$$

avec :

$(i_{ps}) = (i_{ds} \quad i_{qs} \quad i_{0s})^t$ composantes de Park $(d, q, 0)$ du courant au stator.

$(i_s) = (i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs})^t$ composantes (a, b, c) du courant au stator.

Cette transformation est valable aussi pour les tensions et les flux des grandeurs rotoriques, il suffit de remplacer l'indice « s » par l'indice « r ».

III.3.6. Equations magnétiques dans les axes a,b,c :

$$\begin{aligned}(\varphi_s) &= [\mathcal{L}_{ss}](i_s) + [\mathcal{M}_{sr}](i_r) \\(\varphi_r) &= [\mathcal{L}_{rr}](i_r) + [\mathcal{M}_{rs}](i_s)\end{aligned}\quad (III.6)$$

Où :

$$\begin{aligned}(\varphi_s) &= (\varphi_{as} \quad \varphi_{bs} \quad \varphi_{cs})^t \quad ; \quad (\varphi_r) = (\varphi_{ar} \quad \varphi_{br} \quad \varphi_{cr})^t \\(i_s) &= (i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs})^t \quad ; \quad (i_r) = (i_{ar} \quad i_{br} \quad i_{cr})^t \\[\mathcal{L}_{ss}] &= \begin{bmatrix} L_{as} & M_{as} & M_{as} \\ M_{as} & L_{as} & M_{as} \\ M_{as} & M_{as} & L_{as} \end{bmatrix}, \quad [\mathcal{L}_{rr}] = \begin{bmatrix} L_{ar} & M_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & L_{ar} & M_{ar} \\ M_{ar} & M_{ar} & L_{ar} \end{bmatrix} \\[\mathcal{M}_{sr}] &= M_{rs} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix}\end{aligned}$$

$$[\mathcal{M}_{rs}] = [\mathcal{M}_{sr}]^t$$

où :

- L_{as} : Inductance propre d'une phase statorique
- L_{ar} : Inductance propre d'une phase rotorique
- M_{as} : Inductance mutuelle entre deux phases du stator
- M_{ar} : Inductance mutuelle entre deux phases du rotor

M_{rs} : Inductance mutuelle maximale entre une phase du stator et une autre du rotor (obtenue quand les axes magnétiques des deux phases sont alignés)

III.3.7. Equations magnétiques dans les axes d et q

$$\begin{aligned}(\varphi_s) &= [\mathcal{L}_{ss}](i_s) + [\mathcal{M}_{sr}](i_r) \\(\varphi_{ps}) &= \{P(\theta_s).[\mathcal{L}_{ss}].P(\theta_s)^{-1}\}(i_{ps}) + \{P(\theta_s).[\mathcal{M}_{sr}].P(\theta_r)^{-1}\}(i_{pr}) \\(\varphi_r) &= [\mathcal{L}_{rr}](i_r) + [\mathcal{M}_{rs}](i_s) \\(\varphi_{pr}) &= \{P(\theta_r).[\mathcal{L}_{rr}].P(\theta_r)^{-1}\}(i_{pr}) + \{P(\theta_r).[\mathcal{M}_{rs}].P(\theta_s)^{-1}\}(i_{ps})\end{aligned}\quad (III.7)$$

En effectuant les quatre produits matriciels on trouve :

$$\begin{pmatrix} \varphi_{ds} \\ \varphi_{dr} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{dr} \end{pmatrix} \quad et \quad \begin{pmatrix} \varphi_{qs} \\ \varphi_{qr} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_{qs} \\ i_{qr} \end{pmatrix}\quad (III.8)$$

$$\varphi_{0s} = L_{0s} \cdot i_{0s} \quad ; \quad \varphi_{0r} = L_{0r} \cdot i_{0r}$$

Avec :

- $L_s = L_{as} - M_{as}$: Inductance propre cyclique du stator

- $L_r = L_{ar} - M_{ar}$: Inductance propre cyclique du rotor
- $L_m = \frac{3}{2} M_{rs}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.
- $L_{0s} = L_{as} + 2.M_{as}$: Inductance homopolaire au stator
- $L_{0r} = L_{ar} + 2.M_{ar}$: Inductance homopolaire au rotor

III.3.8. Equations électriques dans les axes d et q :

$$\begin{aligned}
 (v_s) &= \frac{d(\varphi_s)}{dt} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_s) \\
 (v_{ps}) &= \frac{d(\varphi_{ps})}{dt} + \left\{ p(\theta_s) \cdot \frac{d(p(\theta_s)^{-1})}{d\theta_s} \right\} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \varphi_{ps} + [\mathcal{R}_s] \cdot (i_{ps}) \\
 (v_r) &= \frac{d(\varphi_r)}{dt} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_r) \\
 (v_{pr}) &= \frac{d(\varphi_{pr})}{dt} + \left\{ p(\theta_r) \cdot \frac{d(p(\theta_r)^{-1})}{d\theta_r} \right\} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \varphi_{pr} + [\mathcal{R}_r] \cdot (i_{pr})
 \end{aligned} \tag{III.9}$$

On effectue les produits matriciels (entre accolades) :

$$p(\theta_s) \cdot \frac{d(p(\theta_s)^{-1})}{d\theta_s} = p(\theta_r) \cdot \frac{d(p(\theta_r)^{-1})}{d\theta_r} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{III.10}$$

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \varphi_{qs} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} + R_s \cdot i_{ds} & ; & & v_{dr} &= \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \varphi_{qr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{dr} \\
 v_{qs} &= \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \varphi_{ds} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} + R_s \cdot i_{qs} & ; & & v_{qr} &= \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \varphi_{dr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} + R_r \cdot i_{qr} \\
 v_{0s} &= \frac{d\varphi_{0s}}{dt} + R_s \cdot i_{0s} & ; & & v_{0r} &= \frac{d\varphi_{0r}}{dt} + R_r \cdot i_{0r}
 \end{aligned} \tag{III.11}$$

III.4. Modèle dynamique de la GAEE en tenant compte de la saturation

Dans le cas ou en prend en considération la saturation, les équations du modèle dynamique de la GAEE se développent ainsi :

III.4.1. Equations électriques

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{qs} + R_s \cdot i_{ds} \\
 v_{qs} &= \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \\
 0 &= \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{qr} + R_r \cdot i_{dr} \\
 0 &= \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{dr} + R_r \cdot i_{qr}
 \end{aligned} \tag{III.12}$$

Nous constatons que dans les équations électriques, nous avons besoin des expressions des flux et de leurs dérivées

III.4.2. Equations des flux

Si l'on désire exprimer les flux en fonction des courants statoriques et rotoriques, i_e le vecteur $(i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr})$, nous obtenons les systèmes d'équations suivant :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \\
 \varphi_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \\
 \varphi_{dr} &= L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \\
 \varphi_{qr} &= L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs}
 \end{aligned} \tag{III.13}$$

Sachant que les inductances cycliques statoriques et rotoriques s'expriment en fonction de l'inductance magnétisante comme suit : $L_s = L_m + l_{s\sigma}$; $L_r = L_m + l_{r\sigma}$

Les dérivées des flux passent toutes par le calcul suivant : $\frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt}$

$$\text{Car } L_s = L_m + l_{s\sigma} \quad ; \quad L_r = L_m + l_{r\sigma} \quad \Rightarrow \quad \frac{dL_s}{dt} = \frac{dL_r}{dt} = \frac{dL_m}{dt} \quad ; \quad \frac{dl_{s\sigma}}{dt} = \frac{dl_{r\sigma}}{dt} = 0$$

$$\begin{aligned}
 i_m &= (i_{dm}^2 + i_{qm}^2)^{\frac{1}{2}} \\
 \frac{di_m}{dt} &= \frac{1}{2} \left(2i_{dm} \frac{di_{dm}}{dt} + 2i_{qm} \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot (i_{dm}^2 + i_{qm}^2)^{-\frac{1}{2}} \\
 \frac{di_m}{dt} &= \frac{\frac{1}{2} \left(2i_{dm} \frac{di_{dm}}{dt} + 2i_{qm} \frac{di_{qm}}{dt} \right)}{(i_{dm}^2 + i_{qm}^2)^{\frac{1}{2}}} = \frac{1}{2} \frac{\left(2i_{dm} \frac{di_{dm}}{dt} + 2i_{qm} \frac{di_{qm}}{dt} \right)}{i_m}
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow \frac{di_m}{dt} = \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \quad (\text{III.14})$$

$$\Rightarrow \frac{dL_m}{dt} = \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \quad (\text{III.15})$$

Si l'on désire exprimer les flux en fonction des courants statoriques et magnétisants, i_f le vecteur $(i_{ds}, i_{qs}, i_{dm}, i_{qm})$, dans le cas où l'on désire exprimer L_m en fonction de i_m pour tenir compte de la saturation, il faut éliminer les courants rotoriques du système III.13 en les exprimant par les deux relations $i_{dr} = i_{dm} - i_{ds}$; $i_{qr} = i_{qm} - i_{qs}$

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot (i_{dm} - i_{ds}) = (L_s - L_m) \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} = l_{s\sigma} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} \\ \varphi_{qs} &= L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot (i_{qm} - i_{qs}) = (L_s - L_m) \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} = l_{s\sigma} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} \\ \varphi_{dr} &= L_r \cdot (i_{dm} - i_{ds}) + L_m \cdot i_{ds} = (L_m - L_r) \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dm} = -l_{r\sigma} \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dm} \\ \varphi_{qr} &= L_r \cdot (i_{qm} - i_{qs}) + L_m \cdot i_{qs} = (L_m - L_r) \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qm} = -l_{r\sigma} \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qm} \end{aligned} \quad (\text{III.16})$$

On obtient donc les équations magnétiques suivantes :

$$\begin{aligned} \varphi_{ds} &= l_{s\sigma} \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dm} \\ \varphi_{qs} &= l_{s\sigma} \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qm} \\ \varphi_{dr} &= -l_{r\sigma} \cdot i_{ds} + L_r \cdot i_{dm} \\ \varphi_{qr} &= -l_{r\sigma} \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qm} \end{aligned} \quad (\text{III.17})$$

Les dérivées des flux s'expriment par :

$$\begin{aligned}
 \frac{d\varphi_{ds}}{dt} &= l_s \sigma \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{dt} \cdot i_{dm} \\
 \frac{d\varphi_{ds}}{dt} &= l_s \sigma \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \cdot \frac{di_m}{dt} \cdot i_{dm} \\
 \frac{di_m}{dt} &= \frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \\
 \Rightarrow \frac{d\varphi_{ds}}{dt} &= l_s \sigma \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{dm}
 \end{aligned} \tag{III.18}$$

En appliquant le même développement aux autres flux :

$$\begin{aligned}
 \frac{d\varphi_{qs}}{dt} &= l_s \sigma \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_m \cdot \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{qm} \\
 \frac{d\varphi_{dr}}{dt} &= -l_r \sigma \cdot \frac{di_{ds}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{dm} \\
 \frac{d\varphi_{qr}}{dt} &= -l_r \sigma \cdot \frac{di_{qs}}{dt} + L_r \cdot \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{dL_m}{di_m} \left(\frac{i_{dm}}{i_m} \cdot \frac{di_{dm}}{dt} + \frac{i_{qm}}{i_m} \cdot \frac{di_{qm}}{dt} \right) \cdot i_{qm}
 \end{aligned} \tag{III.19}$$

Sachant que :

$$\begin{aligned}
 L_{mdr} &= L_r + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m} & ; & \quad L_{mqr} = L_r + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{qm}^2}{i_m} \\
 L_{md} &= L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm}^2}{i_m} & ; & \quad L_{mq} = L_m + \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{qm}^2}{i_m} & ; \quad L_{dq} = \frac{dL_m}{di_m} \frac{i_{dm} \cdot i_{qm}}{i_m}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{d\varphi_{ds}}{dt} &= l_s \sigma \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt} \\
 \frac{d\varphi_{qs}}{dt} &= l_s \sigma \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{qm}}{dt} \\
 \frac{d\varphi_{dr}}{dt} &= -l_r \sigma \frac{di_{ds}}{dt} + L_{mdr} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt} \\
 \frac{d\varphi_{qr}}{dt} &= -l_r \sigma \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mqr} \frac{di_{qm}}{dt}
 \end{aligned} \tag{III.20}$$

III.4.3. Construction du modèle d'état

$$\begin{aligned}
 v_{ds} &= l_{s\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{md} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt} + R_s i_{ds} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_m i_{qm} \\
 v_{qs} &= l_{s\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mq} \frac{di_{qm}}{dt} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{ds} + R_s i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_m i_{dm} \\
 0 &= -l_{r\sigma} \frac{di_{ds}}{dt} + L_{mqr} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{qm}}{dt} - R_r i_{ds} + \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{qs} + R_r i_{dm} - \frac{d\theta_r}{dt} L_r i_{qm} \\
 0 &= -l_{r\sigma} \frac{di_{qs}}{dt} + L_{dq} \frac{di_{dm}}{dt} + L_{mqr} \frac{di_{qm}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{ds} - R_r i_{qs} + \frac{d\theta_r}{dt} L_r i_{dm} + R_r i_{qm}
 \end{aligned} \tag{III.21}$$

Ce qui nous donne finalement la représentation d'état suivante :

$$\begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} l_{s\sigma} & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_{s\sigma} & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_{r\sigma} & 0 & L_{mqr} & L_{dq} \\ 0 & -l_{r\sigma} & L_{dq} & L_{mqr} \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} R_s & -\frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} & 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} L_m \\ \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} & R_s & \frac{d\theta_s}{dt} L_m & 0 \\ -R_r & \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} & R_r & -\frac{d\theta_r}{dt} L_r \\ -\frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} & -R_r & \frac{d\theta_r}{dt} L_r & R_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} \tag{III.22}$$

Pour construire le schéma Matlab Simulink de ce modèle, on aura besoin des équations des dérivées des courants, c'est ce qui nous conduit à inverser la matrice inductance. L'inverse de cette matrice est représenté dans l'annexe B.

III.5. Construction du schéma Matlab Simulink

Cherchons d'abord à exprimer les dérivées des courants

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dm} \\ i_{qm} \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ds} - R_s i_{ds} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_m i_{qm} \\ v_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{ds} - R_s i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_m i_{dm} \\ R_r i_{ds} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{qs} - R_r i_{dm} + \frac{d\theta_r}{dt} L_r i_{qm} \\ \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{ds} + R_r i_{qs} - \frac{d\theta_r}{dt} L_r i_{dm} - R_r i_{qm} \end{pmatrix} \tag{III.23}$$

Où :

$$\begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{pmatrix} \text{ Représente l'inverse de la matrice inductance}$$

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} \left(v_{ds} - R_s i_{ds} + \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{qs} + \frac{d\theta_s}{dt} L_{mi} i_{qm} \right) \cdot x_{11} + \\ \left(v_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} l_{s\sigma} i_{ds} - R_s i_{qs} - \frac{d\theta_s}{dt} L_{mi} i_{dm} \right) \cdot x_{12} + \\ \left(R_r i_{ds} - \frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{qs} - R_r i_{dm} + \frac{d\theta_r}{dt} L_{ri} i_{qm} \right) \cdot x_{13} + \\ \left(\frac{d\theta_r}{dt} l_{r\sigma} i_{ds} + R_r i_{qs} - \frac{d\theta_r}{dt} L_{ri} i_{dm} - R_r i_{qm} \right) \cdot x_{14} \end{pmatrix} \quad (\text{III.24})$$

Le calcul de la dérivée des autres courants se fait en remplaçant dans l'expression de $\frac{di_{ds}}{dt}$ le premier indice de x_{1j} à savoir 1 par respectivement 2,3 et 4.

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{21} \cdot v_{ds} + x_{22} \cdot v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{21} - l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{22} + R_r x_{23} + l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{24} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_{s\sigma} \frac{d\theta_s}{dt} x_{21} - R_s x_{22} - l_{r\sigma} \frac{d\theta_r}{dt} x_{23} + R_r x_{24} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{22} - R_r x_{23} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{24} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{21} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{23} - R_r x_{24} \right) \cdot i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{III.25})$$

$$\frac{di_{dm}}{dt} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{31}v_{ds} + x_{32}v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{31} - l_s \sigma \frac{d\theta_s}{dt} x_{32} + R_r x_{33} + l_r \sigma \frac{d\theta_r}{dt} x_{34} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_s \sigma \frac{d\theta_s}{dt} x_{31} - R_s x_{32} - l_r \sigma \frac{d\theta_r}{dt} x_{33} + R_r x_{34} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{32} - R_r x_{33} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{34} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{31} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{33} - R_r x_{34} \right) \cdot i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{III.26})$$

$$\frac{di_{qm}}{dt} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{41}v_{ds} + x_{42}v_{qs} + \\ \left(-R_s x_{41} - l_s \sigma \frac{d\theta_s}{dt} x_{42} + R_r x_{43} + l_r \sigma \frac{d\theta_r}{dt} x_{44} \right) \cdot i_{ds} + \\ \left(l_s \sigma \frac{d\theta_s}{dt} x_{41} - R_s x_{42} - l_r \sigma \frac{d\theta_r}{dt} x_{43} + R_r x_{44} \right) \cdot i_{qs} + \\ \left(-L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{42} - R_r x_{43} - L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{44} \right) \cdot i_{dm} + \\ \left(L_m \frac{d\theta_s}{dt} x_{41} + L_r \frac{d\theta_r}{dt} x_{43} - R_r x_{44} \right) \cdot i_{qm} \end{pmatrix} \quad (\text{III.27})$$

Ces quatre derniers systèmes d'équations nous permettent de construire le schéma Matlab Simulink de la Machine Asynchrone en tenant compte de la saturation.

III.6. Modélisation du phénomène d'auto-amorçage.

$$\begin{aligned} \frac{d(v_s)}{dt} &= -\frac{1}{C} \cdot (i_s) \\ \frac{d(p(\theta_s)^{-1} \cdot v_{ps})}{dt} &= -\frac{1}{C} \cdot (p(\theta_s)^{-1} \cdot i_{ps}) \\ p(\theta_s)^{-1} \cdot \frac{dv_{ps}}{dt} + \frac{dp(\theta_s)^{-1}}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} v_{ps} &= -\frac{1}{C} \cdot (p(\theta_s)^{-1} \cdot i_{ps}) \\ \cdot \frac{dv_{ps}}{dt} + p(\theta_s) \frac{dp(\theta_s)^{-1}}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} v_{ps} &= -\frac{1}{C} \cdot i_{ps} \\ \frac{dv_{ps}}{dt} &= -p(\theta_s) \frac{dp(\theta_s)^{-1}}{d\theta_s} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} v_{ps} - \frac{1}{C} \cdot i_{ps} \end{aligned} \quad (\text{III.28})$$

$$p(\theta_s) \cdot \frac{d(p(\theta_s)^{-1})}{d\theta_s} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{0s} \end{pmatrix} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{1}{C} \cdot \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{0s} \end{pmatrix} \quad (\text{III.30})$$

$$\begin{aligned} \frac{dv_{ds}}{dt} &= v_{qs} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{1}{C} \cdot i_{ds} \\ \frac{dv_{qs}}{dt} &= -v_{ds} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{1}{C} \cdot i_{qs} \\ \frac{dv_{0s}}{dt} &= -\frac{1}{C} \cdot i_{0s} \end{aligned} \quad (\text{III.31})$$

III.7. Choix du référentiel de travail

Nous constatons dans les équations développées que nous n'avons pour l'instant pas choisi de référentiel, c'est-à-dire que nous n'avons pas donné de valeur particulières aux dérivées des angles $\frac{d\theta_s}{dt}$ et $\frac{d\theta_r}{dt}$.

- Référentiel lié au stator : $\frac{d\theta_s}{dt} = 0$ et $\frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r$.

- Référentiel lié au rotor : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_r$ et $\frac{d\theta_r}{dt} = 0$.

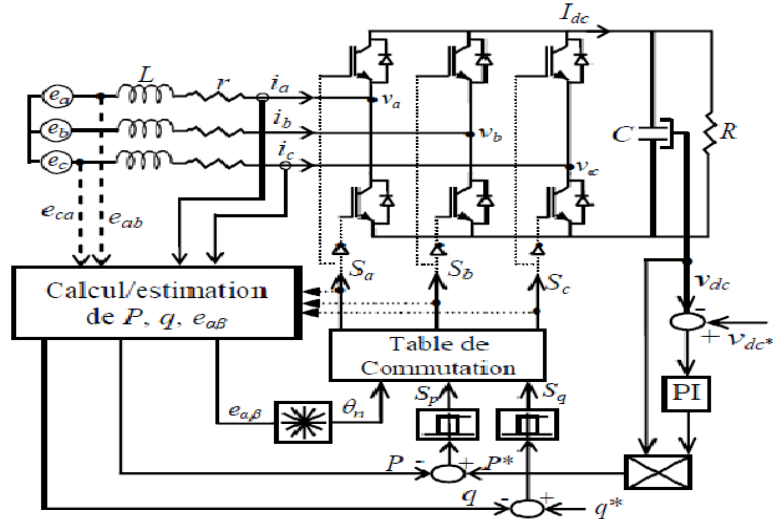
- Référentiel lié au champ tournant : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega$ et $\frac{d\theta_r}{dt} = g \cdot \omega$.

Seule l'application considérée peut indiquer ou même imposer un référentiel par rapport à un autre.

Dans notre cas, nous pouvons utiliser indifféremment le référentiel lié au stator ou au rotor. Par contre, le référentiel lié au champ tournant est contre indiqué car dans le cas du fonctionnement en génératrice asynchrone auto excitée, la fréquence et donc la vitesse de synchronisme peut varier. Elle représente une conséquence et non un paramètre qu'on peut fixer à l'avance.

III.8. La commande directe de puissance [ABD2010]

La DPC est utilisée dans le but d'éliminer le bloc de modulation de largeur d'impulsions (MLI) et les boucles de régulation interne des variables contrôlées. En les remplaçant par une table de commutation prédéfinie, dont les entrées sont les erreurs de suivi de référence des grandeurs contrôlées et la sortie est le vecteur de commande. Sa structure globale est illustrée sur la figure (3.4).



Fig(3.4) Schéma synoptique de la DPC avec la table de commutation prédéfinie appliquée au redresseur triphasé.

Elle consiste à contrôler les grandeurs instantanées qui sont les puissances active et réactive. Son principe est basé sur la sélection d'un vecteur de commande à partir de la table de commutation qui va commander à la fin les interrupteurs à travers S_a , S_b et S_c . La sélection du vecteur de commande est fondée sur les erreurs numérisées (S_p, S_q) des puissances active et réactive instantanées, fournies par les régulateurs à hystérésis à deux niveaux, ainsi que sur la position angulaire du vecteur de tension de la machine dans le repère alpha et beta ($\alpha\beta$) que nous définirons par la suite.

III.8.1. Le choix de la position angulaire du vecteur de tension dans le plan $\alpha\beta$

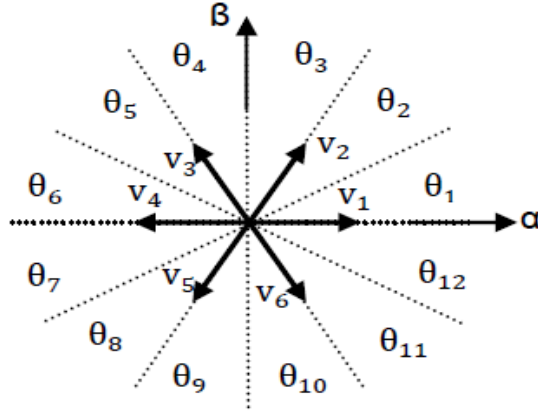
Les vecteurs de tension sont répartis le long du plan $\alpha\beta$ avec un déphasage de 60° qui vont nous permettre de diviser ce plan en douze secteurs égaux de 30° , dont chaque secteur est l'image d'un état logique du redresseur.

Le calcul de la position angulaire du vecteur des tensions de la machine dans le plan $\alpha\beta$ nécessite la connaissance des tensions e_α et e_β , qui peuvent être soit calculées à partir des mesures des tensions de la machine e_{ca} et e_{cb} , soit estimées à partir de l'estimation des puissances instantanées et des courants débités par la machine à l'intermédiaire du bloc de calcul/estimation de p , q et $e_{\alpha\beta}$. Cette position est définie par la relation suivante :

$$\theta = \arctan\left(\frac{e_\beta}{e_\alpha}\right) \quad (\text{III.32})$$

A son tour, le numéro du secteur où se trouve le vecteur des tensions est déterminé en comparant l'angle θ avec les bornes de chacun des douze secteurs, qui sont définie par la formule ci-dessous :

$$(n-2)\frac{\pi}{6} < \theta_n < (n-1)\frac{\pi}{6} \quad n=1,2,3,\dots,12$$



Fig(3.5) Secteurs et vecteurs des tensions dans le plan $\alpha\beta$.

III.8.2. Calcul des puissances instantanées

La référence de la puissance active p^* est obtenue par régulation de la tension continue, en utilisant un régulateur PI. Tandis que celle de la puissance réactive q^* est fixée à zéro dans le but d'assurer un facteur de puissance unitaire.

Le calcul des puissances débitées par la machine est basé sur la mesure des tensions et des courants (voir figure (3.4)). Les puissances active et réactive qui serviront pour la commande peuvent être calculées par les expressions :

$$P = [i_a \quad i_b \quad i_c] \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = i_a e_a + i_b e_b + i_c e_c \quad (\text{III.33})$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(e_a - e_b)i_a + (e_c - e_a)i_b + (e_a - e_b)i_c]$$

Les vecteurs $[e_a \quad e_b \quad e_c]^t$ et $[i_a \quad i_b \quad i_c]$ sont respectivement les tensions et les courants débités par la machine

Une autre méthode de calcul de puissances a été suggérée [Nog 1998], elle consiste à utiliser les états des interrupteurs du redresseur (S_a , S_b et S_c), la mesure de la tension du bus continu V_{dc} et les courants débités par la machine. Ces puissances peuvent être estimées comme suit :

$$\begin{aligned}\hat{P} &= L \left(\frac{di_a}{dt} i_a + \frac{di_b}{dt} i_b + \frac{di_c}{dt} i_c \right) + V_{dc} (S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c) \\ \hat{q} &= \sqrt{3} L \left(\frac{di_a}{dt} i_c - \frac{di_c}{dt} i_a \right) - \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} [S_a (i_b - i_c) + S_b (i_c - i_a) + S_c (i_a - i_b)]\end{aligned}\quad (\text{III.34})$$

Ainsi que le calcul de la position du vecteur des tensions dans le plan $\alpha\beta$ peut être estimé à partir de ces puissances instantanées et les courants débités (transformés dans le plan $\alpha\beta$ voir annexe B), en calculant les composantes de ces vecteurs e_α et e_β comme suit :

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{p} \\ \hat{q} \end{bmatrix}\quad (\text{III.35})$$

III.8.3. Comparateurs à hystérésis

L'implémentation des comparateurs présentés dans le schéma global de la DPC est plutôt simple, leur principe est basé sur une comparaison entre l'écart ou l'erreur des puissances de référence et celles mesurées avec des amplitudes bien définies de l'hystérésis (amplitude négative et positive). Les sorties de ces comparateurs à hystérésis étant des variables booléennes (S_p et S_q) de valeurs soit 0 ou bien 1, comme expliqué ci-dessous.

Si $P^* - P \geq h_p$ alors $S_p=1$ et Si $P^* - P \leq -h_p$ alors $S_p=0$

Si $q^* - q \geq h_q$ alors $S_q=1$ et Si $q^* - q \leq -h_q$ alors $S_q=0$

Avec :

P^* : puissance active de référence

P : la puissance active mesurée

q^* : puissance réactive de référence

q : la puissance réactive mesurée

h_p et h_q : désignent les amplitudes des bandes à hystérésis des puissances active et réactive

III.8.4. Table de commutation

Une fois les sorties booléennes S_p et S_q des comparateurs hystérésis établies, et suivant le numéro du secteur, le vecteur de commande des interrupteurs du redresseur est sélectionné à partir de la table de commutation donnée dans le tableau (3.1)

Sachant qu'un redresseur de tension à deux niveaux peut délivrer jusqu'à huit vecteurs de commande différents

$$2^3=8$$

2 : représente le nombre de niveaux

3 : représente le nombre de bras du redresseur

S_p	S_q	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7	θ_8	θ_9	θ_{10}	θ_{11}	θ_{12}
1	0	V_6	V_7	V_1	V_0	V_2	V_7	V_3	V_0	V_4	V_7	V_5	V_0
	1	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0	V_7	V_7	V_0	V_0
0	0	V_6	V_1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6
	1	V_1	V_2	V_2	V_3	V_3	V_4	V_4	V_5	V_5	V_6	V_6	V_1

V_1 (100), V_2 (110), V_3 (010), V_4 (011), V_5 (001), V_6 (101), V_7 (111), V_0 (000)

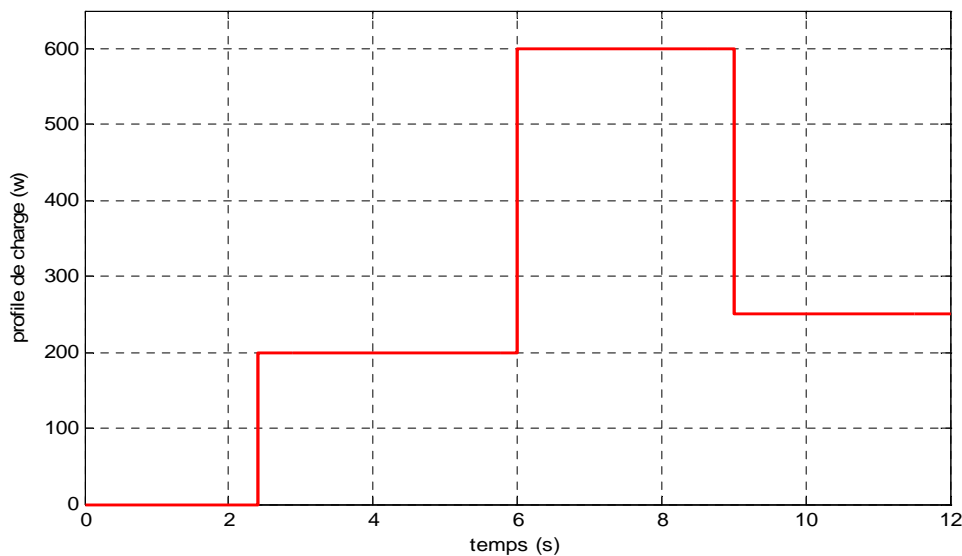
Tableau (3.1) Table de commutation

III.9. Simulation de la chaîne de conversion éolienne

La chaîne de conversion de l'énergie éolienne a été simulée sous un profil de charge que nous avons proposé, figure (3.6), dans le but de visualiser au mieux les différents phénomènes qui entrent en jeu.

Au début, un instant de fonctionnement à vide a été appliqué obligatoirement afin d'assurer la stabilité de l'ensemble machine redresseur triphasé. A partir de l'instant où l'ensemble est stabilisé, la chaîne peut être connectée sans aucun problème à la charge.

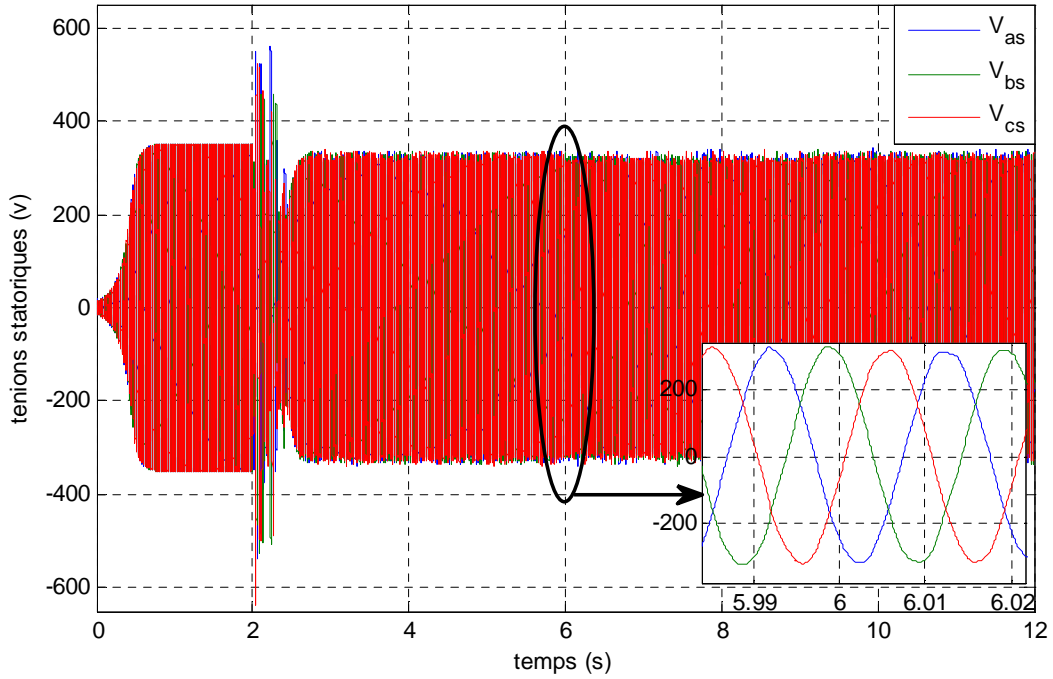
La simulation a été partagée en deux parties, dont la première est réservée à la visualisation des grandeurs de la machine et l'autre partie consiste à visualiser l'ensemble de la chaîne.



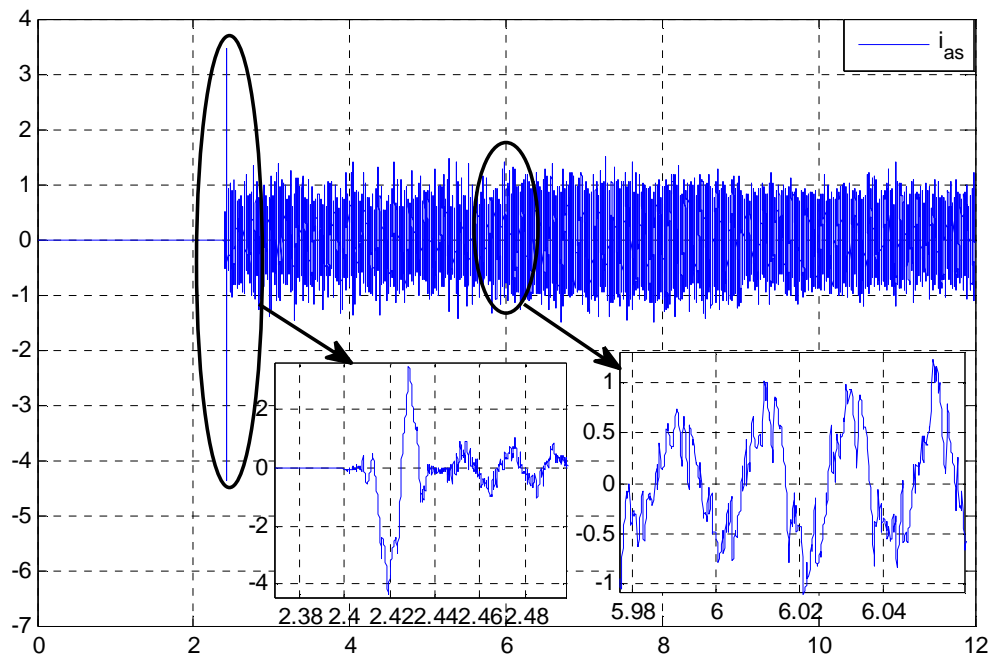
Fig(3.6) Profil de charge

III.9.1. Simulation des grandeurs de la machine

La figure (3.7) et (3.8) montre les différentes étapes que suit la machine pour la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique.



Fig(3.7) Tensions statoriques avant et après application de charge



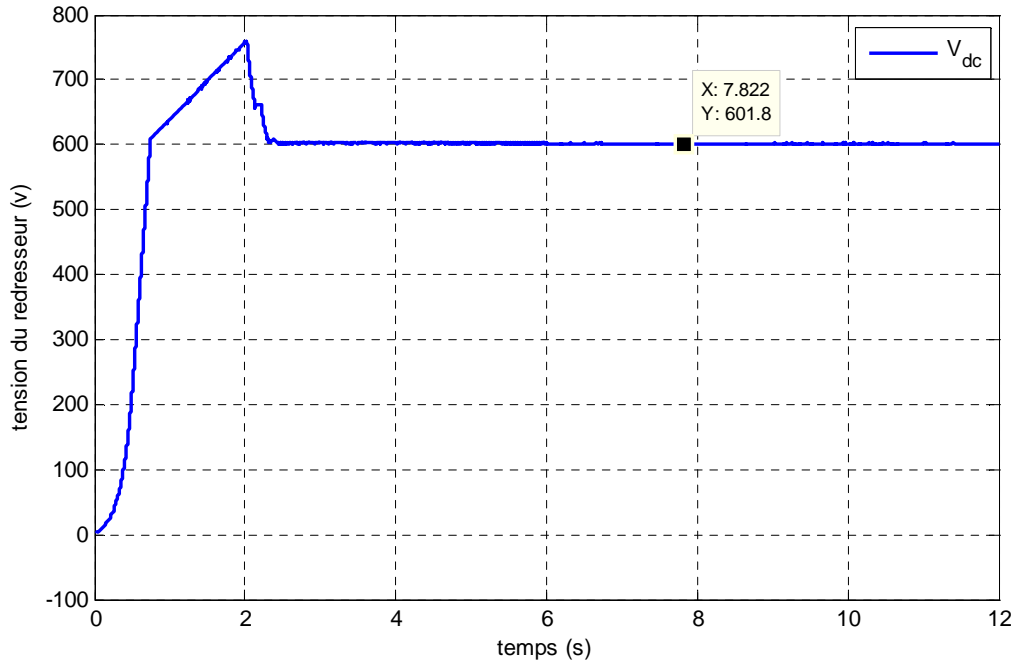
Fig(3.8) Courant statorique de la phase a

Le fonctionnement à vide nous a permis d'observer l'évolution du phénomène d'auto-amorçage (voir figure(3.7)). lors d'une charge brusque, la machine fournit un courant

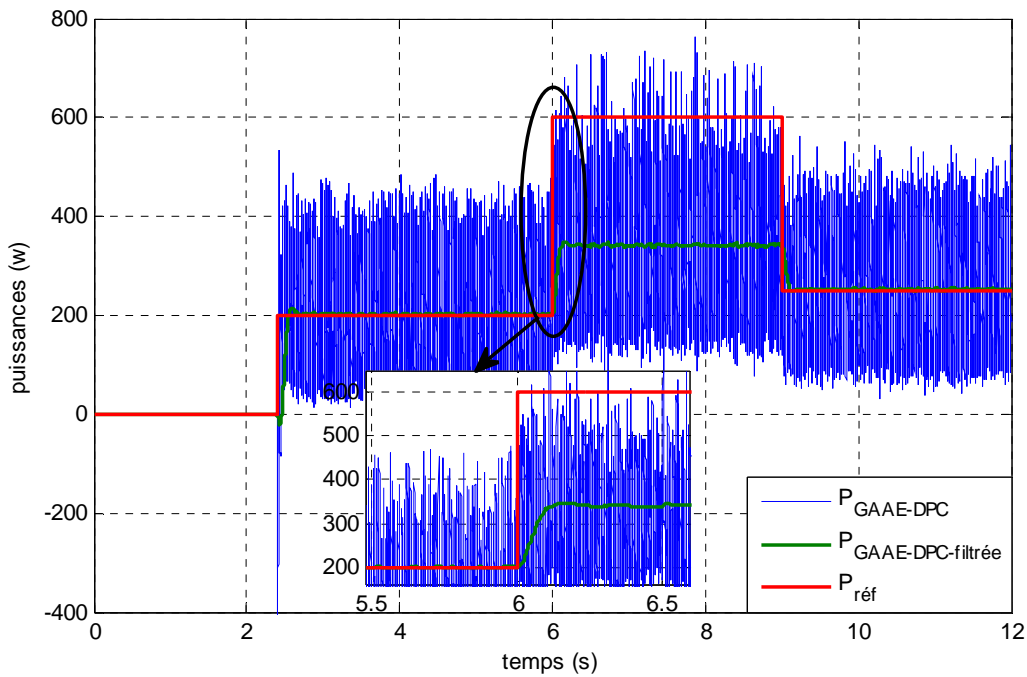
comme le montre la figure (3.8). Cette application est à l'origine du régime transitoire qui a été créé et une légère diminution de la tension a été observée.

III.9.2. Simulation de l'ensemble machine redresseur à MLI

La figure (3.9) désigne l'une des conditions qui ont été mises en œuvre pour la simulation de l'ensemble, elle consiste à fixer la tension du redresseur à 600V



Fig(3.9) Tension de sortie du redresseur



Fig(3.10) Puissance débitée par la machine en suivi de référence

La commande directe de puissance nous a permis de faire un suivi de référence par rapport à la puissance de la charge, figure (3.10). Un filtre passe bas d'ordre 2 a été installé dans le but de filtrer la puissance de la chaîne et de visualiser au mieux le suivi de référence. Nous constatons que notre machine qui est d'une puissance nominale de $1.1kw$, ne peut pas suivre une référence qui est au-delà d'une certaine limite. On estime qu'une génératrice asynchrone auto-excitée ne peut délivrer que le tiers ($1/3$) de sa puissance nominale quand elle fonctionne en moteur (voir le zoom de la figure (3.10)).

III.10. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de la conversion d'énergie éolienne en énergie électrique et les différents composants qui y contribuent. Le redresseur à MLI associé à notre génératrice et commandé en DPC nous a permis un suivi de référence de puissance. Une simulation a été faite dans le but de valider ce suivi et aussi de valider à la fin toute la chaîne de conversion.

Après validation de cette chaîne, elle sera connectée au système hybride que nous allons présenter dans le prochain chapitre dans le but de contribuer à la production de l'énergie électrique avec les autres sources et de satisfaire des profils de charges de grande puissance.

Chapitre IV

Gestion d'énergie du système hybride

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons entamer l'association des deux chaînes de conversion d'énergie renouvelable (photovoltaïque et l'éolien) simulées précédemment, ainsi qu'avec un système de stockage que nous modéliserons et simulerons par la suite, et comme source de secours, un générateur diesel. L'association de ces différentes sources va constituer notre système hybride qui sera la seule source de production de l'énergie électrique pour la charge. Les choix de ces sources et leurs commande ont été judicieusement faits dans le but d'assurer une alimentation permanente avec un équilibre de puissance et de maximiser le rendement de l'installation. Le système sera étudié pour un montage parallèle connecté sur un bus à courant continu à l'intermédiaire des convertisseurs de tension adéquats comme nous l'avons montré précédemment

Ainsi ce chapitre est réparti comme suit : au premier temps, nous modéliserons la chaîne de stockage, ensuite nous entamerons l'association des différentes sources à l'aide des convertisseurs DC/DC et d'un algorithme de gestion d'énergie que nous simulerons à la fin pour deux cas différents, le premier cas consiste à solliciter en priorité l'énergie éolienne tandis que le deuxième consiste à solliciter le photovoltaïque par rapport à l'éolienne.

IV.2. Chaîne de stockage

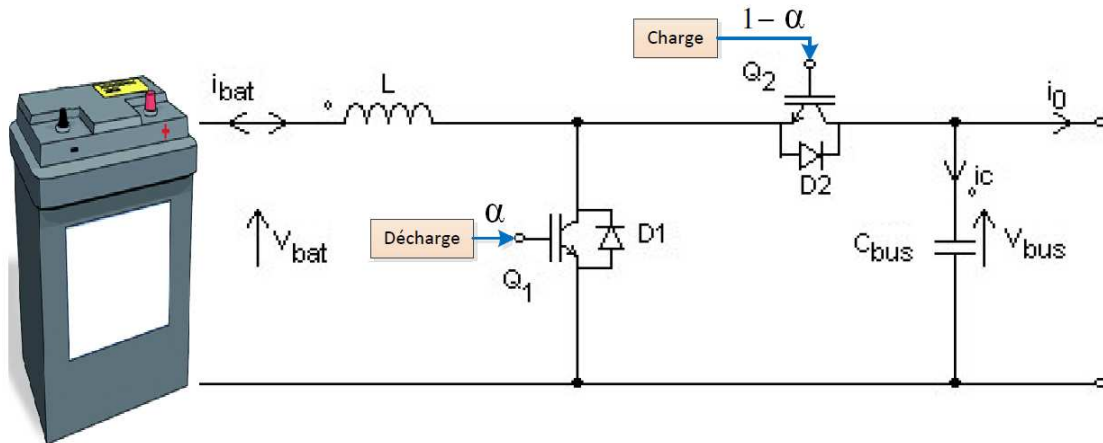
A l'heure actuelle, le stockage de l'énergie électrique est principalement réalisé grâce à des accumulateurs électrochimiques. Dans le cadre de ce mémoire, et en s'appuyant sur les choix de batteries qui a été pris dans de nombreuses thèses [DAH2013], [REY2011], nous sommes orientés vers une solution « lithium fer phosphate » couramment appelé simplement accumulateur LiFePO₄. Ce choix est basé sur de nombreux critères, par exemple : Elles supportent beaucoup plus de cycles de recharge ce qui leur donne une grande longévité, elles ont certes une densité d'énergie légèrement inférieure mais qui reste trois fois supérieure à celle d'une batterie plomb, ce sont également des batteries faciles à recycler.

Pour la modélisation et la simulation de la batterie choisie, nous avons pris l'initiative d'exploiter la bibliothèque de Matlab.

Cette chaîne est vraiment nécessaire dans les systèmes autonomes, c'est dans le but de garantir la continuité de service et aussi assurer l'équilibre des puissances entre la charge et les sources. Dans notre cas, cette garantie est assurée par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC bidirectionnel, ce qui nous conduit à le modéliser dans le prochain titre.

IV.2.1. Modélisation du convertisseur bidirectionnel

Les convertisseurs qu'utilisent les systèmes de stockage doivent en principe assurer le transfert de puissance dans les deux cotés, plus précisément ils doivent être réversibles en courant pour permettre aux batteries de se charger et se décharger sur le bus CC. Ce convertisseur est représenté sur la figure (4.1).



Fig(4.1) Convertisseur bidirectionnel DC/DC de la chaîne de stockage

Où $i_L = i_{bat}$

Sachant que la commande des interrupteurs Q_1 et Q_2 est réalisée simultanément avec deux signaux (rapport cycliques) complémentaires α et $(1-\alpha)$. Le modèle du convertisseur bidirectionnel est donné par le système d'équations suivant :

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} (V_{bat} - V_{bus} (1-\alpha)) \quad (IV.1)$$

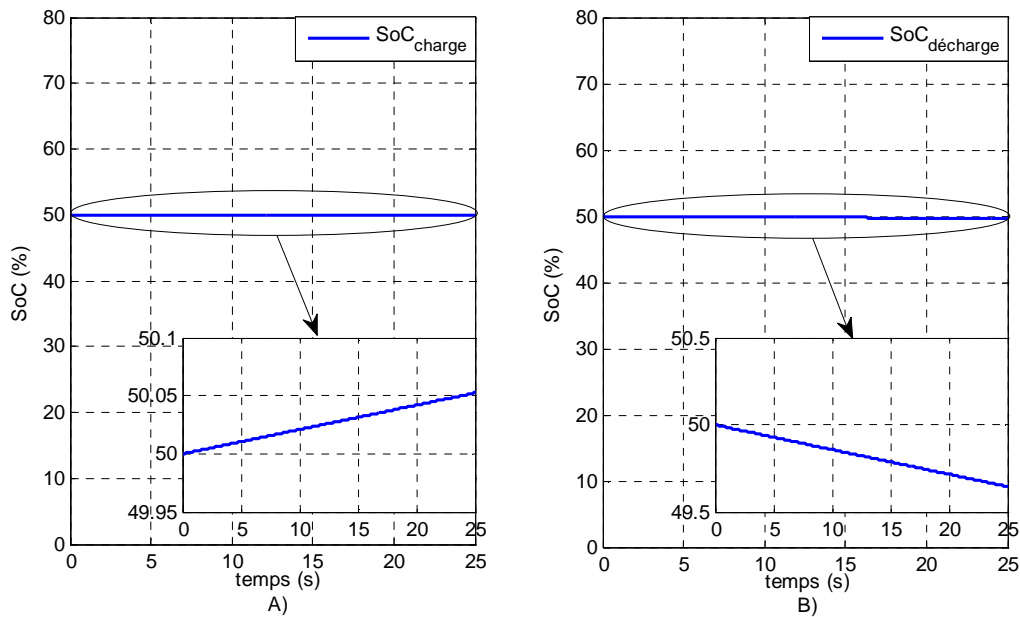
$$\frac{dV_{bus}}{dt} = \frac{1}{C_{bus}} (i_L (1-\alpha) - i_0) \quad (IV.2)$$

Le convertisseur que nous avons présenté précédemment fonctionne comme hacheur parallèle ou élévateur lorsque la batterie se décharge et comme hacheur série ou abaisseur lorsque cette dernière se charge.

IV.2.2. Principe de fonctionnement

Dans notre cas, la chaîne de stockage joue en premier lieu un rôle d'une source de secours qui est une source propre avant même de faire appel au générateur diesel qui est une source conventionnelle polluante. Son deuxième rôle qui est le plus important consiste à équilibrer le système hybride lorsque celui-ci est soumis à des variations brusques de puissance aux quelles le système ne peut pas répondre.

Mais ce raisonnement ne peut être réalisé que si l'état de la batterie présente un bon état de charge ($SoC \geq 20\%$). Par contre, Si le $SoC < 20\%$, la batterie se met en mode récepteur qui va absorber du courant jusqu'à se qu'elle se charge, une simulation des deux cas au voisinage de 50% est présentée ci-dessous :



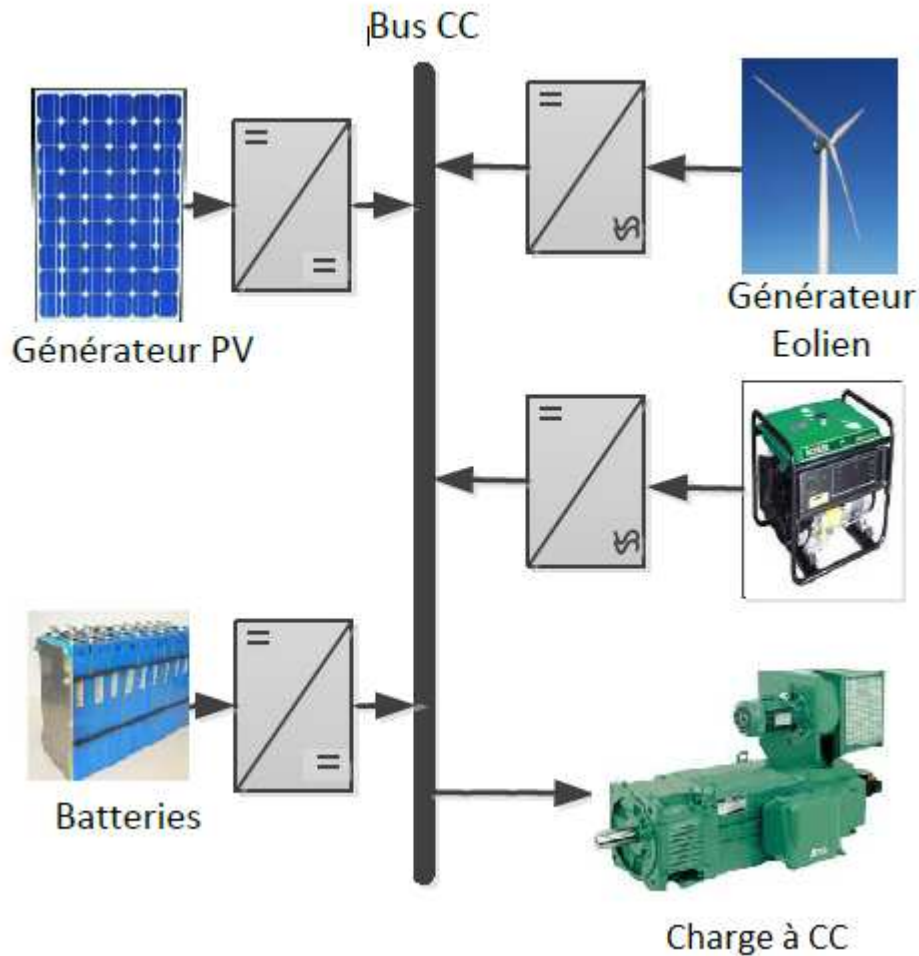
Fig(4.2) Caractéristiques de charge et de décharge de la batterie

D'après la simulation, on constate que la batterie se charge ou se décharge lentement se qui nous mènes à considérer l'état de sa charge ou de sa décharge comme étant des constantes. Pour l'implémenter dans le système hybride, la batterie doit être initialement chargée à moitié pour qu'elle puisse absorber ou fournir la différence de puissance crée lors de la commande des chaînes de conversion d'énergie renouvelable.

IV.3. Présentation du système hybride global

Ainsi comme nous l'avons cité auparavant, la structure du système hybride choisie est réalisée avec deux sources d'énergie renouvelable, un système de stockage et une source conventionnelle. Ces sources sont connectées sur un bus à courant continu qui doivent être à la fin capable d'alimenter en électricité une charge à courant continu à différentes amplitudes de tensions du bus et aussi d'assurer l'équilibre des puissances. Cet équilibre de puissance est maintenu entre la charge et les sources à l'aide des suivis de référence et la présence de la batterie

Cette structure est illustrée dans la figure (4.3) suivante :



Fig(4.3) Schéma global du système hybride étudié

Dans ce qui suit, nous allons procéder à la simulation des convertisseurs qui nous permettront de relier ces sources au bus CC à de différentes amplitudes de tension

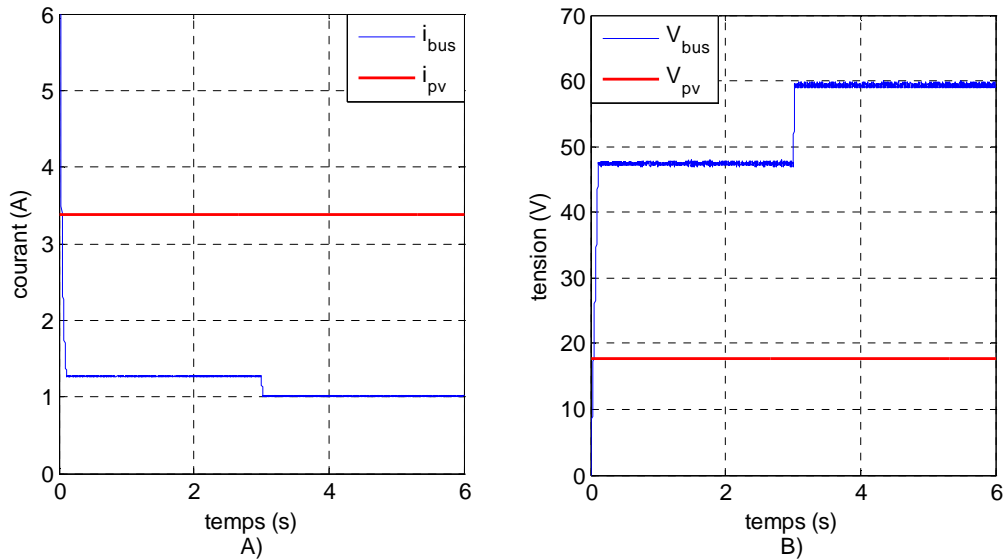
Ensuite, nous expliquerons les différentes méthodes qui seront possibles pour exploiter aux mieux ces énergies dans plusieurs situations à travers des stratégies de gestion

En fin, nous simulerons ce système pour chacune de ces stratégies de gestion

IV.4. Régulation de la tension du bus

❖ Chaîne photovoltaïque

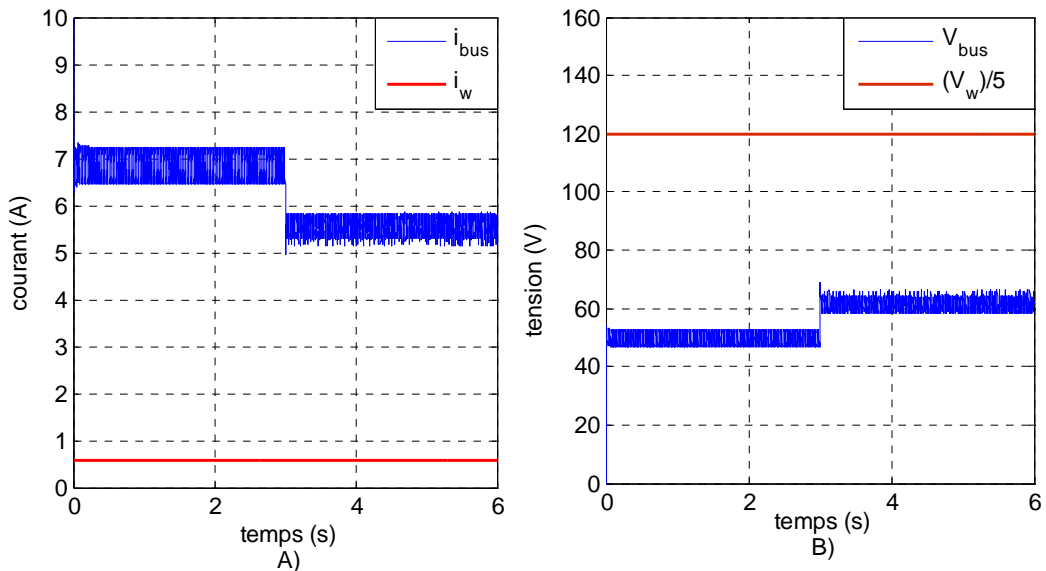
La chaîne photovoltaïque est composée de cinq (5) panneaux de 65 W chacun, connectés en parallèle, se qui nous donne à la sortie de la chaîne une tension qui est égale au plus à la tension d'un panneau à vide ($V_{co}=21.67 V$). Dans ce cas, pour pouvoir la connecter au bus à des tensions de 48 V, 60 V ou bien plus, il faut donc qu'on lui adapte un hacheur parallèle (survolteur) à sa sortie. Un exemple de simulation a été présenté ci-dessous pour le hacheur parallèle seul avec une puissance de 65 W et une tension de 17.78V :



Fig(4.4) Tension et courant du hacheur parallèle avec une régulation de la tension du bus de 48 à 60V

❖ **Chaîne éolienne**

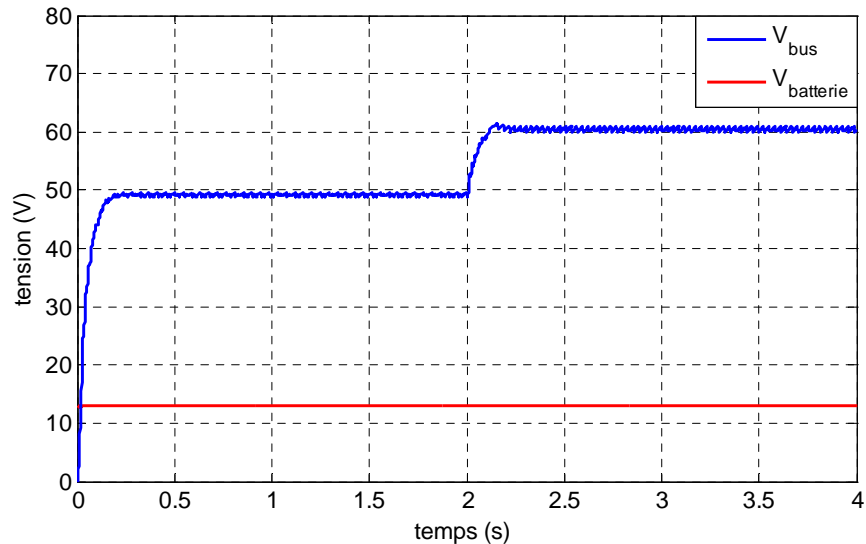
La chaîne de conversion d'éolienne qui est composée d'une génératrice asynchrone auto-excitée associée à un redresseur à MLI triphasé débite une tension à sa sortie qui est de 600V. Pour pouvoir la connecter au bus, une régulation de tension doit se faire avec un hacheur série pour baisser sa tension à 48 V ou 60V afin qu'elle soit égale aux tensions des autres sources. Un exemple de simulation a été pratiqué pour une puissance d'éolienne qui est de 340 W et une tension aux bornes de son redresseur qui est 600V, les résultats de simulation sont présentés à la figure (4.5).



Fig(4.5) Tension et courant du hacheur série avec une régulation de la tension du bus de 48 à 60V

❖ Chaîne de stockage

Pour réguler la tension en sortie de la chaîne de stockage qui est présentée précédemment, on utilise un hacheur bidirectionnel. Pour qu'elle soit connectée au bus, la tension aux bornes de cette chaîne doit être régulée de sorte qu'elle soit égale à celle du bus, figure (4.5).



Fig(4.6) Tension du hacheur série/parallèle avec une régulation de la tension du bus de 48 à 60V

La régulation de la tension du bus à courant continu est exprimée à travers les figures que nous avons obtenues par simulation, pour montrer que les tensions des sources peuvent être régulées quelque soit la valeur souhaitée de la tension du bus

IV.5. Stratégie de gestion du système hybride

Avec la présence de plusieurs sites de différentes conditions climatiques, plusieurs stratégies de gestions ont été proposées pour le système hybride, c'est ce qui nous a conduit à considérer quelques scénarios de gestions de production d'énergie électrique qui seront possibles et adéquats aux sources que nous avons utilisées.

❖ 1^{er} Scenario

Dans les régions ventées, il est plus important de solliciter en priorité les énergies éoliennes puisque l'efficacité d'une éolienne dépend fortement de la vitesse du vent. Dans ce cas l'énergie solaire occupera une seconde place pour compléter la demande en puissance dans le cas où les éoliennes ne peuvent pas satisfaire cette demande. L'algorithme suivant résume ce premier scénario.

```

if Pref<=Pw
% l'éolienne travaille en suivi de référence
    Pref=Pw

elseif (Pref>Pw) Pref<=Pw+Ppv
%l'éolienne fournie le maximum de sa puissance
%le PV travail en suivi de référence
    Ppv=Pref-Pw
    Pref=Ppv+Pw

elseif (Pref>Pw+Ppv) Pref<=Pw+Ppv+Pbat
%l'éolienne fournie le maximum de sa puissance
%le PV travail en MPPT
%la batterie fournie au système la différence de puissance manquante
    Pbat=Pref-(Pw+Ppv)
    Pref=Pw+Ppv+Pbat

else (Pref>Pw+Ppv+Pbat) Pref<=Pw+Ppv+Pbat+Pgén
%l'éolienne fournie le maximum de sa puissance
%le PV travail en MPPT
%la batterie débite toute sa puissance sur le bus
%le générateur assure le surplus de puissance demandé
    Pgén=Pref-(Pw+Ppv+Pbat)
    Pref=Pw+Ppv+Pbat+Pgén

end

```

Fig(4.7) Algorithme de gestion de premier scenario

où :

P_w : La puissance éolienne

P_{pv} : La puissance photovoltaïque

P_{bat} : La puissance de la batterie

$P_{gén}$: La puissance du générateur

P_{ref} : La puissance de la charge

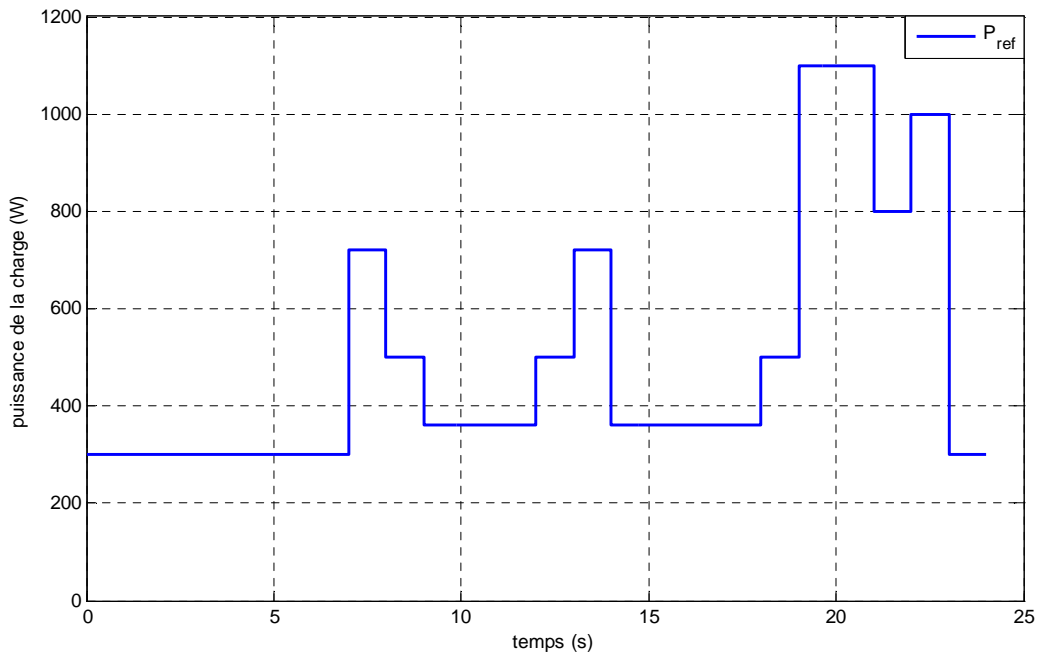
❖ 2^{ème} Scenario

Le deuxième scenario repose sur la priorité de l'énergie solaire qui est adaptée dans les sites ensoleillés. Dans ce cas, l'énergie éolienne constitue la seconde énergie renouvelable dédiée à notre système hybride, elle est prise en compte dans le cas où la chaîne de conversion photovoltaïque ne répond pas à la demande de la charge. Un algorithme similaire peut être aussi réalisé en remplaçant dans la figure (4.7) P_w par P_{pv} et P_{pv} par P_w .

IV.6. Simulation

Pour valider en simulation les différentes stratégies de gestion et assurer de l'équilibre de transfert de puissance, nous avons effectué deux tests par simulation des deux scenarios proposés précédemment sous une tension de bus de 48V et un profil de charge que nous avons

construit d'une image d'une consommation journalière d'un habitat avec une amplitude bien déterminée pour visualiser davantage l'utilité de chaque source. Ce profil est proposé à la figure (4.8) suivante :



Fig(4.8) Profil de charge

Remarque :

Normalement l'axe des abscisses est en heures, nous l'avons ramené à la seconde pour des raisons évidentes de temps de calcul

➤ **Récapitulation de puissance des sources**

- **Le photovoltaïque**

Comme nous l'avons cité, la chaîne de conversion photovoltaïque est constituée de 5 panneaux de 65 W chacun, se qui nous donne une puissance finale de $P_{pv}=5*65=325W$.

- **L'éolienne**

La machine asynchrone auto-excitée de la chaîne de conversion d'éolienne est d'une puissance de 1.1 KW, son fonctionnement en génératrice lui permet de débiter un tiers (1/3) de sa puissance nominale lorsqu'elle fonctionne en moteur qui est de $P_w=1100/3=366 W$

- **Le stockage**

La batterie qui constitue l'élément principal de la chaîne de stockage est d'une capacité de 7Ah, dont deux batteries de même type sont montées en parallèle pour des raisons de gestion des flux d'énergies se qui nous donne une capacité de 14Ah et d'une puissance en heures $P_{bat}=2*(12*7)=2*84=168 Wh$

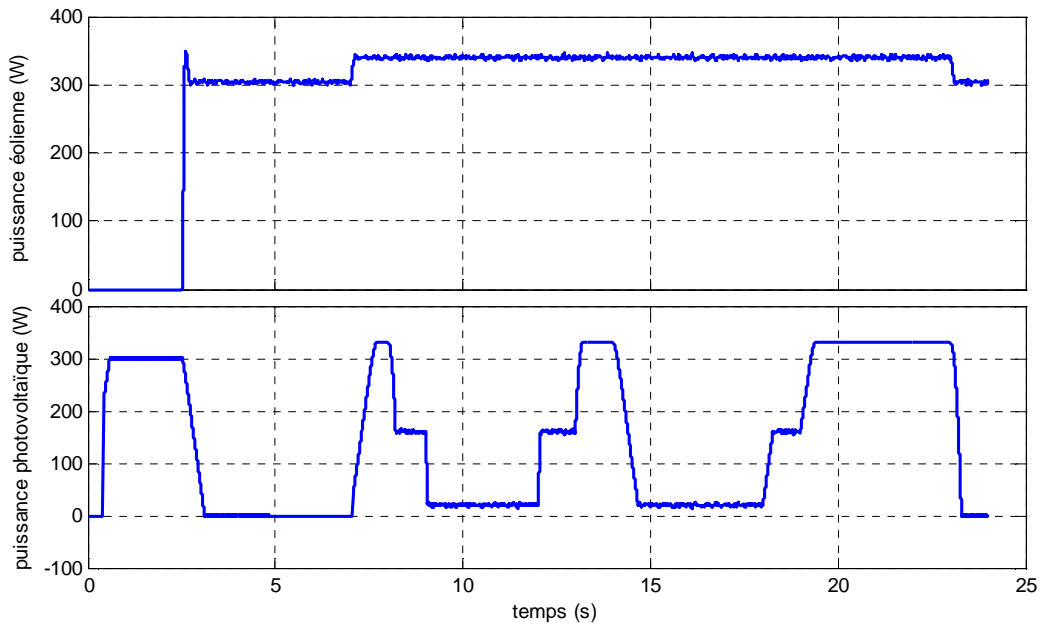
- **Le générateur diesel**

La puissance du générateur est choisie de sorte qu'elle assure l'alimentation de la charge lorsque les chaînes de conversion d'énergie renouvelable ne produisent

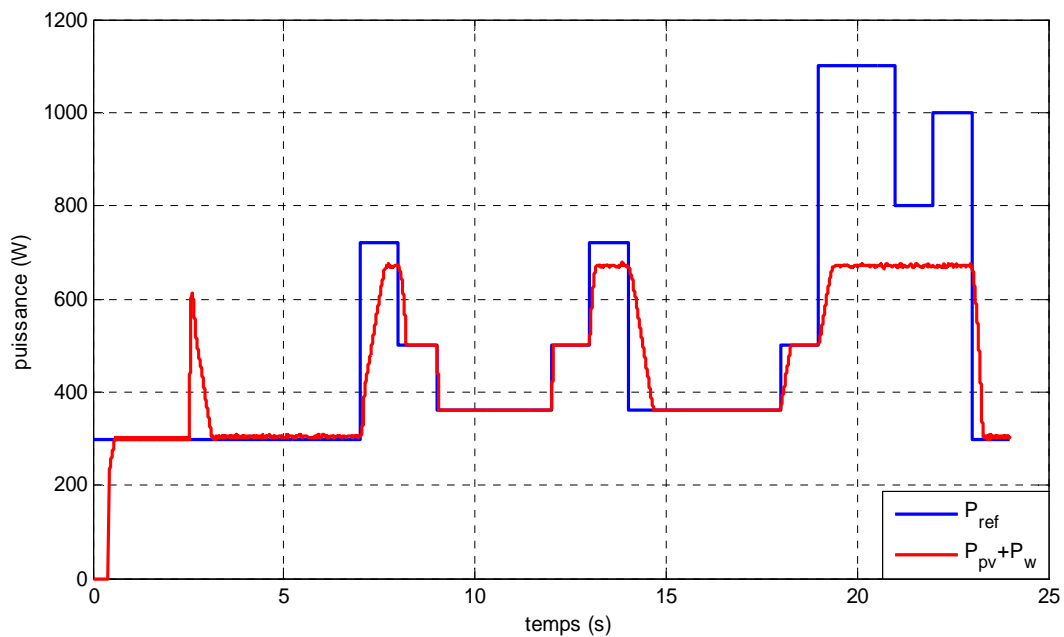
pas de l'énergie électrique. Celle-ci considérée comme étant une constante d'une puissance active de $P_{gen}=1000\text{ W}$

❖ **1^{ère} Scenario**

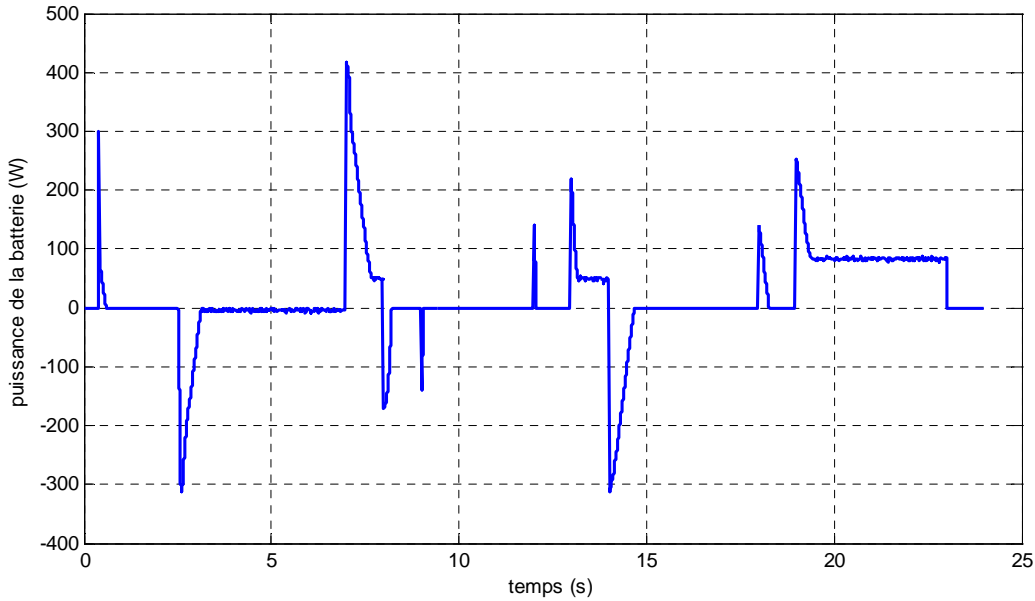
Ce scenario illustre une simulation du système global dans le cas ou nous favorisons l'énergie éolienne. Il nous permet de visualiser l'intérêt de chaque source et celle des commandes en puissance. Les résultats de cette simulation sont présentés ci-dessous :



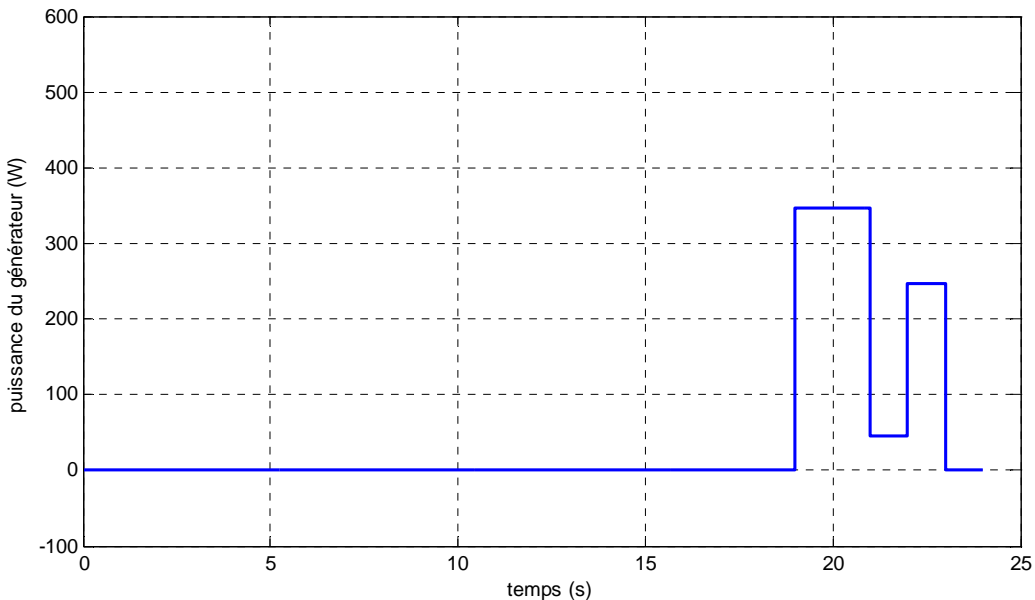
Fig(4.9) Energie électrique produite par les chaînes de conversion à énergie renouvelable



Fig(4.10) Quantité d'énergie électrique produite de la part des énergies renouvelables comparée au profil charge



Fig(4.11) Allure de la puissance de la batterie

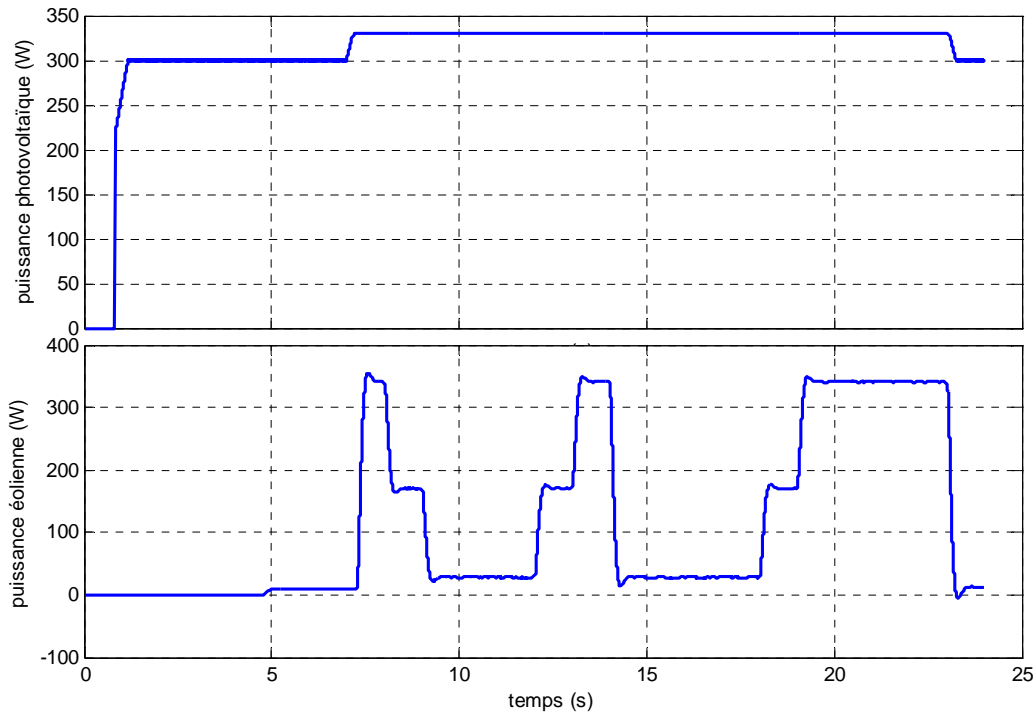


Fig(4.12) Puissance du générateur diesel et son instant d'intervention

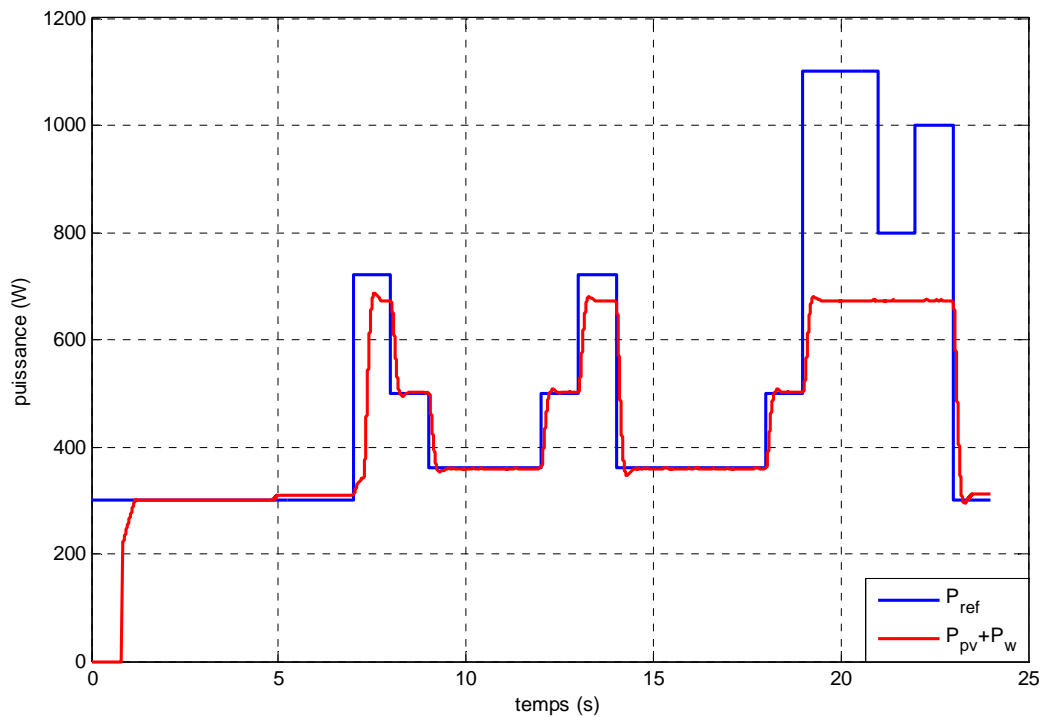
On constate dans la figure (4.9) que la puissance de la chaîne de conversion éolienne est nulle de $t=0s$ à $t=2.4s$. Car cet instant est consacré aux régimes transitoires de l'ensemble générateur asynchrone redresseur triphasé à MLI qui doivent fonctionner à vide dans le but d'assurer respectivement l'auto-amorçage et la tension au borne du redresseur qui est de $600V$. Pendant ce temps la, la chaîne de conversion photovoltaïque a mit enjeu sa puissance pour répondre aux besoins de la charge, ce qui a engendré un pic de puissance dans la figure (4.10).

❖ 2^{ème} Scenario

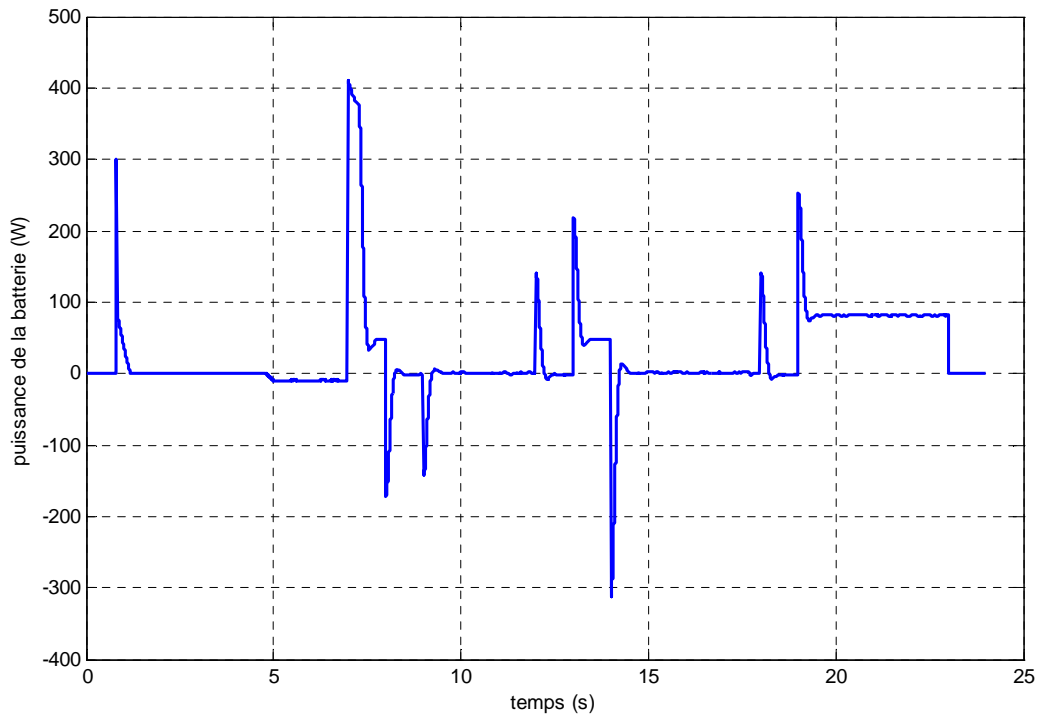
Le deuxième scenario, se présente dans le cas ou le système est installé dans des régions ensoleillé. Il nous permet de voir au mieux l'intérêt du suivi de référence de l'éolienne, figure (4.13) et (4.14).



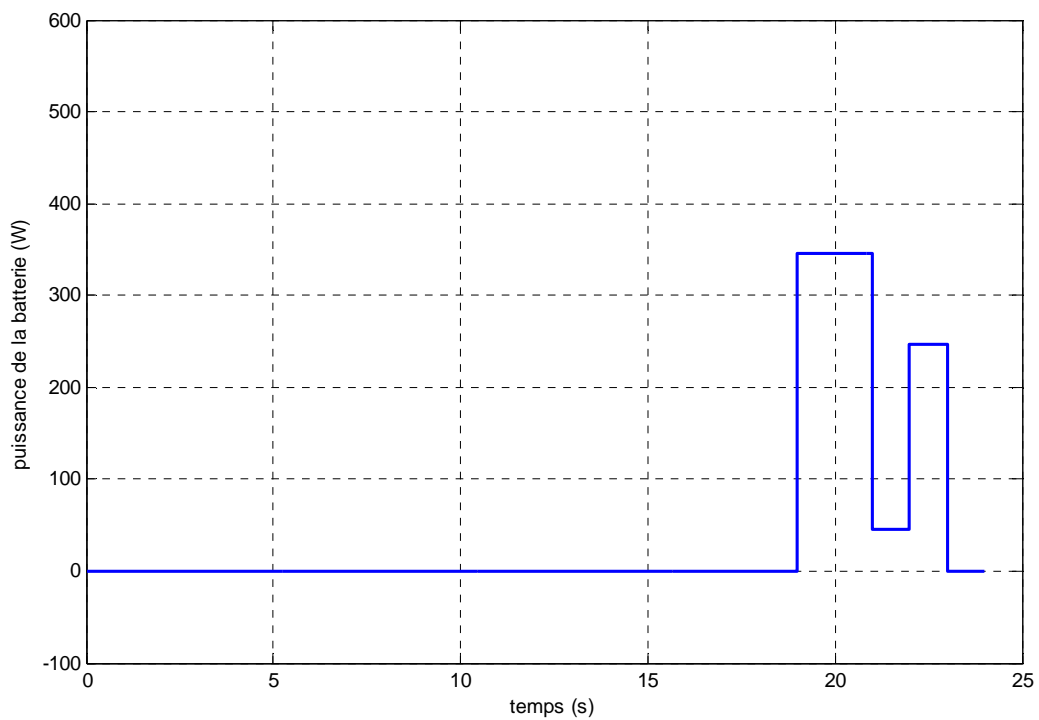
Fig(4.13) Energie électrique produite par les chaînes de conversion à énergie renouvelable



Fig(4.14) Quantité d'énergie électrique produite de la part des énergies renouvelables comparée au profil de charge



Fig(4.15) Allure de la puissance de la batterie



Fig(4.16) Puissance du générateur diesel et son instant d'intervention

IV.7. Interprétation des résultats

D'après la simulation, nous constatons que la contribution à la production de l'énergie électrique de chaque source a conduit tout le système hybride à satisfaire la demande en puissance de la charge. Cette satisfaction se fait à travers les rôles de ces sources qui interviennent à des instants bien précis.

Tout le système hybride est basé sur les chaînes de conversion d'énergie renouvelable, comme l'illustre les figures (4.9), (4.10), (4.13) et (4.14). La majorité de la puissance de la charge est produite à travers ces sources grâce à la commande en puissance.

Comme nous le constatons dans les figures (4.10) et (4.14), les commandes ne peuvent répondre aux variations brusques de la puissance. Afin d'apporter une solution à ce problème, une chaîne de stockage est installée en parallèle du système dans le but de fournir ou d'absorber ce manque de puissance voir figure (4.11) et (4.15).

Enfin, les figures (4.12) et (4.16) montrent l'intérêt d'utiliser une source de secours dans les systèmes hybrides, son rôle consiste à veiller à ce que la puissance de la charge soit toujours satisfaite quelque soit les conditions climatiques ou la variation de la charge.

IV.8. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la chaîne de stockage, ainsi qu'à l'association des chaînes de conversion d'énergie électrique (photovoltaïque-éolien-stockage-diesel) au bus continu formant notre système hybride. Nous avons effectué deux tests de simulation couvrant deux scénarios. Le premier simule la priorisation de l'éolien, l'insuffisance de l'éolien sera couverte par le photovoltaïque. Tandis que la deuxième priorise le photovoltaïque et l'éolien vient combler ses insuffisances.

Un profil de charge est choisi de manière à couvrir tous les cas probables, tels que la charge et la décharge de la batterie ainsi que la sollicitation éventuelle du générateur diesel.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude sur la gestion énergétique d'un système hybride complet destiné aux applications dans les sites isolés. Ce système est composé de panneaux photovoltaïque, d'un générateur éolien, d'un système de stockage et d'un générateur de secours. Les objectifs de notre travail étaient d'assurer une continuité de production de l'énergie électrique et aussi de satisfaire la demande de puissance de la charge tout en gardant une tension du bus constante ceci avec un maximum d'efficacité.

Vu que le système complet est composé de plusieurs sources, l'étude de ce système s'avère très complexe. Pour enfin atteindre nos objectifs, nous avons répartie notre étude dans des chapitres séparés ou nous avons étudié chaque chaîne de conversion.

Nous avons définie en général dans une première partie, le système hybride et ces différentes configurations, d'où nous avons présenté la structure de notre système hybride, ainsi que les généralités sur les sources de conversion d'énergie formant ce système.

Dans une seconde partie, Nous avons pu modéliser et implémenter sur Matlab Simulink la chaîne de conversion d'énergie solaire. En exploitant les algorithmes MPPT, nous avons établi un algorithme de suivi de référence de puissance qui est à la base de l'algorithme P&O.

La troisième partie a été consacrée à l'étude de la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Vu l'absence des paramètres de la turbine qui sont adéquats à la puissance de notre générateur, nous avons retiré la turbine de notre chaîne de conversion d'où nous avons supposé que la vitesse de cette dernière été constante.

Premièrement, nous avons développé le modèle dynamique de la GAAE en tenant compte de la saturation. Deuxièmement, nous lui avons associé un redresseur triphasé à MLI avec une commande directe de puissance afin d'élaborer un suivi de référence de puissance.

Avec l'aide de convertisseurs statiques, nous avons pu associer les deux chaînes de conversion avec un système de stockage et un générateur diesel, pour enfin construire notre système hybride global que nous avons simulé sous de différentes stratégies de gestion d'énergie.

Les résultats de simulation sous ces stratégies de gestion nous ont confirmé les objectifs que nous avons fixés. Au premier lieu, l'association des sources de production d'énergie électrique n'est valable qu'avec une tension constante du bus, d'où nous l'avons établi avec une régulation des tensions des convertisseurs. En second lieu, avec les suivis de référence et l'intervention de la chaîne de stockage nous sommes arrivés à satisfaire la demande de la charge ainsi que la continuité de fonctionnement à travers l'aide du générateur de secours.

A l'égard de ce travail, des perspectives pouvant être envisagées, d'où nous avons dressé une liste non exhaustive de quelques travaux que nous avons jugés intéressants à réaliser. Parmi ces travaux on cite :

- ✓ Réalisation expérimentale d'un système hybride de laboratoire.
- ✓ Etude des gestions énergétiques à base de la logique floue ou des réseaux de neurones.
- ✓ Proposition d'algorithmes MPPT avec des suivis référence, autres que le P&O
- ✓ Etude de systèmes hybrides utilisant la machine synchrone à aimants permanents.

Références

Bibliographiques

[DAH2013] **Menad DAHMANE** « Gestion, optimisation et conversion des énergies pour habitat autonome » thèse de Doctorat de l'université Jules Verne de Picardie, Novembre 2013.

[STOY2011] **Ludmil STOYANOV** « Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables » thèse de Doctorat de l'université technique de SOFIA, octobre 2011

[LAB2010] **A.LABOURET, P.COMUNEL, J.BRAUN, B.FARAGGI** « Cellule solaire, les bases de l'énergie photovoltaïque », Dunod, 5^{ème} édition, 2010

[LAP2012] **J-L.LAPÔTRE, P.PLOUVIEZ** « Energies renouvelables : le photovoltaïque et l'éolien », CASTEILLA, paris 2012

[TRA2016] **Abdoul Karim TRAORÉ** «Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles » mémoire de fin d'étude, université de Québec, juillet 2016

[SING2010] **Akassewa Tchapo SINGO** « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome » thèse de Doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, février 2010

[LE-G2011] **D.LE GOURIERES** « Les éoliennes : théorie, conception et calcul pratique » Edition du Moulin Cadiou, France 2008

[REY2011] **Jean-François REYNAUD** « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques » thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, janvier 2011.

[POIT2003]**Frédéric POITIERS** « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » thèse de Doctorat de l'université de Nantes, décembre 2003.

[YAK2016] **M.DAHMANI, H.YAKOUBI** « Commande d'un système de production de l'énergie éolienne » mémoire de fin d'études de Master de l'UMMTO, juillet 2016

[SI_B2015] **Madjid, SI BRAHIM** « Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone » thèse de Doctorat de l'UMMTO, juin 2015

[TAM2015] **Azzouz TAMAARAT** « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » thèse de Doctorat de l'université de Biskra, décembre 2015

[KEL2011] **Bahia KELKOUL** « Etude d'une commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation » mémoire de fin d'étude de Master de l'université de Tlemcen, juin 2011

[CRO2014] **Lila CROCI** « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/super-condensateurs » thèse de Doctorat de l'université de POITIERS, février 2014.

- [MER2010] **R. MERAHI, R. CHENNI, M. HOUBES** « Modélisation et Simulation d'un Module PV par Matlab » 10^{ème} Séminaire International sur la Physique Energétique "Bechar", 2010, journal of scientific research N° 0 vol.1
- [ALL2011] **F. ALLAM, L. BOUABBACHE** « Modélisation et commande d'un système photovoltaïque autonome pour l'alimentation en énergie électrique d'un site isolé » mémoire de fin d'étude de Master d'UMMTO, 2011.
- [BOU2015] **A. BOURAIOU, M. HAMOUDA, A. CHAKER, M. SADOK, M. MOSTEFAOUI et S. LACHTAR** « Modelling and Simulation of Photovoltaic Module and Array based on One and Two Diodes Model Using Matlab/Simulink » ELSEVIER, Energy Procedia 74 864-877, 2015
- [BOU2012] **B. BOUNOUA, R. HACHINE** « Optimisation de transfert d'énergie d'un champ photovoltaïque basée sur la commande MPPT prédictive », mémoire de fin d'étude de Master de l'UMMTO, 2012
- [CAB2008] **Cédric CABAL** « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque » thèse de doctorat de l'université de Toulouse, décembre 2008
- [BEN2012] **Wafa BENSACI** « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT » » mémoire de fin d'étude de Master de l'université Kasdi Merbah-Ouargla, 2012
- [SPI2009] **D. SPIROV, V. LAZAROV, D. ROYE, Z. ZARKOV, O. MANSOURI** « Modélisation des convertisseurs statiques DC-DC pour des applications dans les énergies renouvelables en utilisant Matlab/Simulink » conférence EF, UTC, Compiègne, 24-25 Septembre 2009
- [REY2011] **Jean-François REYNAUD** « Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques » thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, janvier 2011
- [LOU2010] **Lamari LOUZE** « Production décentralisée de l'énergie électrique : Modélisation et contrôle d'une génératrice asynchrone auto excitée » thèse de Doctorat de l'université Mentouri-Constantine, juillet 2010
- [HAD2017] **S.HADDADOU, F. MERZOUK** « Contrôle direct de puissance du redresseur triphasé à MLI » mémoire de fin d'études de Master de l'UMMTO, juillet 2017
- [ABD2010] **Bouafia ABDELOUAHAB** « Technique de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance : Application aux redresseurs à MLI » thèse de Doctorat de l'université de Ferhat Abbas-Sétif, octobre 2010.
- [Nog 1998] **T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, and I. Takahashi**: "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 34, no. 3, pp. 473-479, juin 1998.

Annexes

Annexe A

Fichiers paramètres introduit en programme Script Matlab (.m).

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%% Paramètres du panneau photovoltaïque bp_sx150s %%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
 $\alpha = 0.65 * 10^{-3} \text{ A/}^\circ\text{K}$  % coefficient de température pour le courant de court-circuit
 $G_{\text{réel}} = 1000 \text{ W / m}^2$  % Eclairage réel
 $G_{\text{nominal}} = 1000 \text{ W / m}^2$  % Eclairage nominal
 $I_{\text{cc}} = 4.75 \text{ A}$  % Courant de court-circuit
 $a = 1.62$  % Coefficient de non idéalité de la diode
 $k = 1.381 * 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$  % Constante de Boltzmann
 $q = 1.602 * 10^{-19} \text{ C}$  % Charge de l'électron
 $N_s = 36$  % Nombre de cellules en série
 $N_p = 1$  % Nombre de cellules en parallèle
 $V_{\text{oc}} = 0.6019 \text{ V}$  % (21.68/Ns)% Tension de circuit ouvert d'une cellule
 $E_g = 1.12 \text{ eV}$  % Energie d'inter-bande (band gap)
 $R_s = 0.019 \text{ } \Omega$  % Résistance série
 $R_p = 30 \text{ } \Omega$  % Résistance shunt
 $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  % Température de référence
 $T_r = 273 + T_c \text{ }^\circ\text{K}$  % Température de référence
```

Annexe B

Calcul de l'inverse de la matrice inductance

Ce calcul se fait manuellement ou en utilisant un logiciel spécialisé dans l'inversion littérale des matrices tels que MathWorks ou Matlab.

$$\begin{pmatrix} l_{s\sigma} & 0 & L_{md} & L_{dq} \\ 0 & l_{s\sigma} & L_{dq} & L_{mq} \\ -l_{r\sigma} & 0 & L_{mdr} & L_{dq} \\ 0 & -l_{r\sigma} & L_{dq} & L_{mqr} \end{pmatrix}^{-1} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & x_{34} \\ x_{41} & x_{42} & x_{43} & x_{44} \end{pmatrix}$$

Avec :

$$D = (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq}) \cdot (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md}) - L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})^2$$

$$x_{11} = L_{mdr} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq}) - L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})^2$$

$$x_{12} = l_{r\sigma} L_{dq} (L_{mdr} - L_{md})$$

$$x_{13} = L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma}) - L_{md} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq})$$

$$x_{14} = l_{s\sigma} L_{dq} (L_{mdr} - L_{md})$$

$$x_{21} = -l_{r\sigma} L_{dq} (L_{mqr} - L_{mq})$$

$$x_{22} = L_{mqr} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md}) - L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})^2$$

$$x_{23} = -l_{s\sigma} L_{dq} (L_{mqr} - L_{mq})$$

$$x_{24} = L_{dq}^2 (l_{s\sigma} + l_{r\sigma}) - L_{mq} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md})$$

$$x_{31} = l_{r\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq})$$

$$x_{32} = -l_{r\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{33} = l_{s\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mqr} + l_{r\sigma} \cdot L_{mq})$$

$$x_{34} = -l_{s\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{41} = -l_{r\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{42} = l_{r\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md})$$

$$x_{43} = -l_{s\sigma} L_{dq} (l_{s\sigma} + l_{r\sigma})$$

$$x_{44} = l_{s\sigma} (l_{s\sigma} \cdot L_{mdr} + l_{r\sigma} \cdot L_{md})$$

Fichiers paramètres introduit en programme Script Matlab (.m).

```

%%%%%%%%%%
%%%%%%%% Paramètres de la machine asynchrone à cage %%%%
%%%%%%%%%%
Pn=1.1 kw           % Puissance nominale
V=230/400 V        Δ/Y % Tension nominale couplage triangle/étoile
I=11/6.3 A         Δ/Y % Courant nominal couplage triangle/étoile
wn=1415 tr/min     % Vitesse de rotation nominale
p=2                % Nombre de paires de pôles
Rs=9.58 Ω          % Résistance statorique
Rr=4.99 Ω          % Résistance rotorique ramenée au stator
Lfs=0.019 H        % Inductance cyclique de fuites statorique
Lfr=0.019 H        % Inductance cyclique de fuites rotorique ramenée au stator
Lmc=0.4792 H       % Inductance magnétisante
Rm=562 Ω           % Résistance représentant les pertes fer
Kd=0. V            % Valeur initiale tension d'axe direct
Kq=0. V            % Valeur initiale tension d'axe en quadrature
%%%%%%%%%%
%%%%%%%% Capacité d'auto-amorçage %%%%
%%%%%%%%%%
C=36.e-6 F         % Capacité d'auto-amorçage
%%%%%%%%%%
%%%%%%%% Vitesse de rotation %%%%
%%%%%%%%%%
wr=p*1450*2*pi/60 rad/s % Vitesse de rotation électrique

```

Matrices de transformation

Le passage des tensions simples triphasées (e_a, e_b, e_c) aux tensions biphasées (e_α, e_β) s'effectue par l'intermédiaire de la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix}$$

Cette matrice est valable aussi pour le passage des courants simples (i_a, i_b, i_c) aux courants biphasés (i_α, i_β)

Ce passage peut aussi s'effectuer en fonction des deux tensions composées (e_{ab}, e_{ca}) par le biais de la matrice suivante :

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/2 & -1/2 \\ -\sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{ab} \\ e_{ca} \end{bmatrix}$$

Résumé

Ce travail consiste à développer et à mettre au point un dispositif capable d'alimenter en électricité un site isolé et le rendre autonome en utilisant des sources d'énergie renouvelable. Le système hybride à énergies renouvelables considéré comprend des panneaux photovoltaïques et un générateur éolien comme sources principales, des batteries pour le stockage ainsi qu'un générateur diesel comme source de secours. Dans le but d'apporter une contribution face aux problèmes de gestion d'énergie pour les systèmes hybride et la commande des chaînes de conversion d'énergie renouvelable, nous proposons dans ce travail des stratégies de gestion des flux d'énergie basé sur à la priorisation des énergies renouvelables selon les conditions climatiques. Pour cela, nous présentons dans un premier temps, la définition, les structures et les différentes configurations des systèmes hybrides ainsi que les généralités sur les sources formant le système hybride. Par la suite, une modélisation de chacune des chaînes de conversion d'énergie nous a permis d'élaborer les suivi de références, en utilisant pour le photovoltaïque l'algorithme P&O que nous avons généralisé pour réaliser en plus de la MPPT, un suivi de référence et la commande directe de puissance (DPC) du redresseur à MLI triphasé pour l'éolienne. Les algorithmes de gestion proposés ainsi que les stratégies de commande développées pour le suivi de références et la maximisation de puissance ont été validées en simulation avec Matlab/Simulink.

Mots-clés : Système hybride, Energie renouvelable, Site isolé, Gestion d'énergie, Panneaux photovoltaïque, Eolienne, Batterie, Générateur diesel, Redresseur, MLI, Hacheur Buck Boost, GAEE, MPPT, DPC.