

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



Université A/Mira de Béjaïa  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique

## MÉMOIRE DE MASTER

En Génie Électrique

Option : Machines électriques et Énergies Renouvelables

Thème

---

# Étude d'un Système Hybride Éolien Photovoltaïque Dédié à la Machine Asynchrone à Double Étoile

---

Présenté par : M. Boudjellaba Smail (Machines électriques)  
M. Boukari Mourad (Énergies Renouvelables)

Devant le jury composé de :

Président : Dr. AMIMEUR Hocine U. A/Mira Béjaïa.  
Examineur : Dr. BOUDRIES Zobir U. A/Mira Béjaïa.  
Rapporteur : Dr. ADJATI Arezki U. A/Mira Béjaïa.

Promotion Juin 2024.

## ※ *Remerciements* ※

Nous remercions Dieu le tout Puissant qui nous a donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Nous tenons tout d'abord à remercier Docteur ADJATI Arezki, pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de nous encadrer. Ses conseils précieux nous ont permis une bonne orientation dans la réalisation de ce travail.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail.

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Nos très sincères remerciements vont aussi à tous les enseignants et les enseignantes qui ont contribué à notre formation durant notre cursus.

Merci à nos parents et grands-parents qui nous ont toujours soutenus tout au long de notre cursus.

※ *Dédicaces* ※

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents pour leur soutien inconditionnel,  
leur tolérance durant toutes mes années d'études,

À notre encadreur Docteur ADJATI Arezki qui nous a vraiment motivé  
et guidé tout au long de notre travail,

À mon frère, mes sœurs et à mes neveux,

À tous mes amis, surtout Juba et Arezki et samir avec qui j'ai eu de nombreuses et enrichissantes  
conversations qui m'ont permis d'élargir l'horizon de cette recherche,

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

À tous mes ami(e)s et toute la promotion Génie Électrique.

À tous ceux qui travaillent pour que cette nation soit meilleure.

M. *BOUDJELLABA Smail*

※ *Dédicaces* ※

Je dédie ce modeste travail :

À mes très chers parents qui m'ont soutenu durant toutes mes études, qui ont fait de moi ce que je suis  
aujourd'hui je leurs serais éternellement reconnaissant,

À notre encadreur Docteur ADJATI Arezki qui nous a vraiment motivé  
et guider tout au long de notre travail,

À mon beau frère et mes soeurs,

À mon neveu ;

À tous mes ami(e)s, surtout smail et khalil avec qui j'ai eu de nombreuses et enrichissantes  
conversations qui m'ont permis d'élargir l'horizon de cette recherche,

À tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin,

À tous mes ami(e)s et toute la promotion Génie Électrique .

*M. Boukari Mourad*

# TABLE DES MATIÈRES

Table des Matières	i
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	v
Liste des acronymes	vii
Introduction générale	1
<b>1 Généralités sur les systèmes hybrides</b>	<b>2</b>
1.1 Introduction . . . . .	2
1.2 Généralités sur les systèmes hybrides . . . . .	2
1.2.1 Définition de l'hybridation . . . . .	2
1.2.2 Importance de l'hybridation . . . . .	2
1.2.3 Classification des systèmes électriques hybrides . . . . .	3
1.2.4 Performances d'un système hybride . . . . .	3
1.2.5 Différentes architectures d'un système hybride . . . . .	3
1.3 Générateur photovoltaïque . . . . .	5
1.3.1 L'énergie du soleil . . . . .	5
1.3.2 Cellule photovoltaïque . . . . .	5
1.3.3 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque . . . . .	7
1.4 Énergie éolienne . . . . .	8
1.4.1 Énergie du vent . . . . .	8
1.4.2 Notions sur les éoliennes . . . . .	8
1.4.3 Zones de fonctionnement de l'éolienne . . . . .	9
1.4.4 Principe de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique . . . . .	9
1.4.5 Avantages et inconvénients des convertisseurs éoliens . . . . .	10
1.4.5.1 Principaux avantages . . . . .	10
1.4.5.2 Principaux inconvénients . . . . .	10
1.4.5.3 Avantages et inconvénients selon le fonctionnement des éoliennes . . . . .	11

1.5	Notions sur les machines multiphasées . . . . .	11
1.5.1	Caractéristiques des machines multiphasées . . . . .	12
1.5.2	Avantages de la machine multiphasée . . . . .	13
1.5.3	Inconvénients de la machine multiphasée . . . . .	14
1.6	conclusion . . . . .	14
<b>2</b>	<b>Modélisation de la MASDE</b>	<b>15</b>
2.1	Introduction . . . . .	15
2.2	Description de la machine asynchrone à double étoile . . . . .	15
2.3	Modélisation de la machine asynchrone à double étoile . . . . .	15
2.3.1	Hypothèses simplificatrices . . . . .	15
2.3.2	Modèle de la machine asynchrone à double étoiles . . . . .	16
2.3.2.1	Équations électriques de la MASDE . . . . .	16
2.3.2.2	Équations magnétiques . . . . .	17
2.3.2.3	Équations magnétiques développées de la MASDE . . . . .	18
2.3.2.4	Énergie magnétique . . . . .	18
2.3.2.5	Couple électromagnétique . . . . .	18
2.3.2.6	Équation mécanique . . . . .	18
2.3.3	Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoiles . . . . .	19
2.3.3.1	Transformation de Park directe . . . . .	19
a)	Matrice de Park de la première étoile . . . . .	20
b)	Matrice de Park de la deuxième étoile . . . . .	20
c)	Matrice de Park du rotor . . . . .	20
2.3.3.2	Transformation de Park inverse . . . . .	20
a)	Matrice de Park inverse de la première étoile . . . . .	20
b)	Matrice de Park inverse de la deuxième étoile . . . . .	20
c)	Matrice de Park inverse du rotor . . . . .	21
2.3.3.3	Choix du référentiel . . . . .	21
2.3.4	Application de la transformation de Park à la MASDE . . . . .	21
2.3.4.2	Équations magnétiques . . . . .	22
2.3.4.3	Puissance instantanée . . . . .	22
2.4	Alimentation de la MASDE par des onduleurs de tension . . . . .	23
2.4.1	Modélisation de l'onduleur . . . . .	24
2.4.2	Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle . . . . .	24
2.5	Conclusion . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Dimensionnement des générateurs photovoltaïque et éolien</b>	<b>26</b>
3.1	Introduction . . . . .	26
3.2	Dimensionnement du générateur photovoltaïques . . . . .	26
3.2.1	Dimensionnement des panneaux photovoltaïque . . . . .	26
3.2.2	Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques . . . . .	27
3.3	Dimensionnement de la turbine . . . . .	28
b)	Puissance mécanique . . . . .	28

3.4	Essais sur le GPV . . . . .	29
3.4.1	Influence de l'ensoleillement sur les performances du GPV . . . . .	29
3.4.2	Influence de la température sur les performances du GPV . . . . .	29
3.4.3	Influence de la résistance série et shunt sur la caractéristique PV du module . . . . .	34
3.5	Composants du système hybride GPV – Turbine éolienne . . . . .	34
3.6	Redressement des tensions générées par la GASDE . . . . .	35
3.7	Conclusion . . . . .	35
<b>4</b>	<b>Application et interprétations des résultats</b>	<b>36</b>
4.1	Introduction . . . . .	36
4.2	Simulation de la MASDE alimentée par le réseau électrique . . . . .	36
4.2.1	Source de tension alimentant la MASDE . . . . .	36
4.2.2	Vitesse de rotation . . . . .	37
4.2.3	Couple électromagnétique . . . . .	37
4.2.4	Flux rotoriques . . . . .	38
4.2.5	Courants direct et en quadrature . . . . .	39
4.2.6	Courants statoriques . . . . .	39
4.3	Simulation de la MASDE alimentée par des onduleurs de tensions . . . . .	40
4.3.1	Fonctions Sinus-Triangle . . . . .	40
4.3.2	Tension simple issue de l'onduleur . . . . .	40
4.3.3	Vitesse de rotation . . . . .	41
4.3.4	Couple électromagnétique . . . . .	42
4.3.5	Flux rotorique direct et en quadrature . . . . .	42
4.3.6	Courants direct et en quadrature . . . . .	43
4.3.7	Courant statorique . . . . .	43
4.4	Conclusion . . . . .	44
	<b>Conclusion générale</b>	<b>45</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>46</b>

## LISTE DES TABLEAUX

1.1	Comparatif des avantages et des inconvénients . . . . .	11
3.1	Paramètres du module photovoltaïque SIEMENS SM 110-24 . . . . .	27
3.2	Récapitulation des dimensionnements des diverses sources . . . . .	29



## TABLE DES FIGURES

1.1	Structure des SEH à bus continu DC. . . . .	3
1.2	Structure des SEH à bus AC/DC. . . . .	4
1.3	Structure des SEH à bus AC. . . . .	4
1.4	Système hybride à commutation. . . . .	5
1.5	Composantes du rayonnement solaire au sol[1]. . . . .	6
1.6	Description d'une cellule photovoltaïque [1]. . . . .	6
1.7	Zone de fonctionnement d'une éolienne.[16] [15] . . . . .	9
1.8	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [13] . . . . .	10
1.9	Machines multiphasées de type «1». . . . .	12
1.10	Machines multiphasées de type «2». . . . .	13
2.1	Représentation des enroulements de la machine asynchrone à double étoiles. . . . .	16
2.2	Représentation angulaire des systèmes d'axe dans l'espace électrique. . . . .	19
2.3	Représentation du modèle de PARK de la MASDE dans le repère d-q . . . . .	22
2.4	Alimentation de la MASDE par des onduleurs de tensions.[1] . . . . .	24
3.1	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $IGPV = f(VGPV)$ . . . . .	30
3.2	Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $PGPV = f(VGPV)$ . . . . .	30
3.3	Influence de la température sur la caractéristique $IGPV = f(VGPV)$ . . . . .	31
3.4	Influence de la température sur la caractéristique $PGPV = f(VGPV)$ . . . . .	31
3.5	Influence de la résistance série sur les caractéristiques du GPV . . . . .	32
3.6	Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques du GPV . . . . .	32
3.7	Caractéristique $IGPV = f(VGPV)$ du champ photovoltaïque . . . . .	32
3.8	Caractéristique $PGPV = f(VGPV)$ du champ photovoltaïque . . . . .	33
3.9	Tension générée du champ photovoltaïque . . . . .	33
3.10	Installation hybride photovoltaïque–turbine éolienne[1] . . . . .	34
3.11	Redressement double PD3 de la tension générée par la GASDE . . . . .	35
4.1	Allures des deux sources de tensions déphasées de $30^\circ$ . . . . .	36
4.2	Vitesses de rotation et de synchronisme. . . . .	37

4.3	Couples électromagnétique et résistant. . . . .	38
4.4	Couples électromagnétique et résistant. . . . .	38
4.5	Courant direct Courant en quadrature. . . . .	39
4.6	Courant statorique $i_{a1}$ . . . . .	39
4.7	Intersection tension de référence et de la porteuse. . . . .	40
4.8	Tension simple issue de l'onduleur. . . . .	41
4.9	Vitesse de rotation et de synchronisme. . . . .	41
4.10	Couples électromagnétique et couple résistant. . . . .	42
4.11	Flux rotorique. . . . .	42
4.12	Courants direct et en quadrature. . . . .	43
4.13	Courants statorique. . . . .	43

## LISTE DES ACRONYMES

<b>A</b>	A1,B1,C1	Indices correspondants aux trois phases du 1er stator.
	A2,B2,C2	Indices correspondants aux trois phases du 2ème stator .
	Ar ,Br,Cr	Indices correspondants aux trois phases du rotor.
<b>C</b>	$C_{em}$	Couple électromagnétique.
	$C_r$	Couple résistant.
<b>d</b>	d	Indice de l'axe direct.
<b>F</b>	fp	Fréquence de la modulante.
	$f_{ref}$	Fréquence de la tension de référence.
	$f_r$	Coefficient de frottement.
<b>I</b>	$I_{ar}, I_{br}, I_{cr}$	Courants instantanées rotoriques.
	$I_{dr}, I_{qr}$	Courants homopolaire, direct et en quadrature du rotor.
<b>J</b>	J	Moment d'inertie.
<b>K</b>	k	Coefficient multiplicateur.
<b>L</b>	$L_{s1}$	Inductance propre du 1er stator.
	$L_{s2}$	Inductance propre du 2ème stator.
	$L_{ms}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique.
	$L_{mr}$	Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique.
	$L_r$	Inductance propre du rotor.
	$L_{sr}$	Valeur maximale des inductances mutuelles entre l'une des étoiles et le rotor .
<b>M</b>	m	Indice de modulation.

---

<b>N</b>	$N_p$	le nombre de panneaux.
	$N_{pV\text{série}}$	Nombre de panneaux en série
	$N_{pv//}$	Nombre de branches en parallèle .
<b>P</b>	$p$	Nombre de paires de pôle.
	$P$	puissance instantanée absorbée.
	$P_{mec}$	Puissance mécanique.
	$P_{em}$	Puissance électromagnétique emmagasinée.
	$P_j$	Pertes joules.
	$\mathbb{P}(\theta_{s1})$	matrice de Park de la première étoile.
.	$\mathbb{P}(\theta_{s2})$	matrice de Park de la deuxième étoile.
	$\mathbb{P}(\theta_{sr})$	matrice de Park du rotor.
<b>Q</b>	$q$	Indice de l'axe en quadrature.
<b>R</b>	$r$	Indice de rotor.
	$R_{s1}$	Résistance de la 1er étoile du stator .
	$R_{s2}$	Résistance de la 2ème étoile de stator .
	$R_r$	Résistance rotorique .
	$R$	Longueur des pales.
<b>U</b>	$U_{dc}$	Valeur moyenne de la tension redressée.
	$U_{eff}$	la valeur efficace de la tension redressée.
<b>v</b>	$v_{ref}$	Tension de référence.
	$v_p$	Valeur crête de l'onde de modulation .
	$v_m$	Amplitude de la tension de référence .

# *INTRODUCTION GÉNÉRALE*

Le terme, « Système d'Énergie Hybride (SEH) », signifie une génération d'énergie utilisant plusieurs sources de technologie différente et le fait d'ajouter le mot « renouvelable », cela signifie que les sources utilisées sont à énergies renouvelables, telle que l'éolienne, le photovoltaïque, les petites centrales hydroélectriques ou bien encore les piles à combustible avec des capacités de production aléatoires et souvent fluctuantes.[1] [2]

La configuration du SEH en question, consiste à dimensionner selon les contraintes d'utilisation, les ressources énergétiques obtenues à partir de la conversion éolienne et photovoltaïque.[2]

Dans ce travail, le premier chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes hybrides, notamment, le photovoltaïque (PV) et l'éolienne et quelques notions sur les machines triphasées seront présentées.

Le second chapitre sera réservé à la modélisation de la machine asynchrone à double étoile (MASDE) en fonctionnement moteur et en fonctionnement générateur où la modélisation des onduleurs de tensions commandés par la technique de modulation de largeurs d'impulsions « MLI » sera aussi abordée.

Le troisième chapitre sera consacré au dimensionnement du générateur photovoltaïque et de l'éolienne. Dans le chapitre quatre et grâce au logiciel Matlab Simulink, des simulations sur le comportement de chaque élément seront effectuées tout en révélant des résultats sur l'attitude de chaque source et de chaque actionneur. Tous les résultats de la simulation seront représentés par des courbes significatives où une discussion et des commentaires seront donnés pour chaque cas.

Une conclusion générale couronnera l'ensemble des chapitres présentés dans cette étude, où un rapport sur les objectifs sera dressé et les perspectives envisagées seront confiées.

# CHAPITRE 1

## GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES HYBRIDES

### 1.1 Introduction

Les systèmes qui utilisent des types différents de sources d'énergie pour produire de l'électricité sont connus sous le nom de « Systèmes d'Énergies Hybrides ». La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolien et les panneaux photovoltaïques offrent un moyen de produire de l'électricité de manière plus durable, fiable et économique.

### 1.2 Généralités sur les systèmes hybrides

#### 1.2.1 Définition de l'hybridation

Le terme « Système d'Énergie Hybride » (SEH) signifie une génération d'énergie utilisant au moins deux sources d'énergie et le fait d'ajouter le mot « renouvelable », cela signifie que les sources utilisées sont à énergies renouvelables.[2]

Les sources d'énergies renouvelables (SER) sont généralement utilisées dans les zones isolées où l'accès aux réseaux conventionnels est quasiment impossible. En 2013, 20 pour cent de la consommation mondiale d'énergie est issue des énergies renouvelables.[2] [14]

Ayant comme but la satisfaction du besoin des charges, l'avantage majeur d'un système hybride réside sur le fait de la pluralité des sources et de la possibilité d'extension. L'exploitation est simple et la maintenance est réduite, ce qui entraîne le faible coût lié au cycle de vie des composants du SEH.[2] [14] L'inconvénient le plus en vue est sans doute la nécessité d'introduire un système de stockage au système qui apparaît plus complexe que les systèmes mono source, ajouté à cela, le coût global élevé comparé au groupe électrogène.[2] [14]

#### 1.2.2 Importance de l'hybridation

Face aux défis du changement climatique et de l'épuisement des ressources fossiles, l'hybridation des systèmes énergétiques se présente comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergé-

tiques croissants tout en préservant l'environnement.[14][9]

Cette approche innovante consiste à combiner deux ou plusieurs sources d'énergie - renouvelables, traditionnelles ou mixtes - au sein d'un même système, en tirant parti des avantages de chaque source.[9]

### 1.2.3 Classification des systèmes électriques hybrides

Afin de satisfaire les besoins en électricité des sites éloignés, les systèmes hybrides peuvent être connectés au réseau électrique ou bien fonctionner en mode autonome. Le SEH peut être aussi classifié selon la présence ou non d'un dispositif de stockage ou selon le type de sources d'énergies renouvelables utilisées.[9]

Le choix est généralement effectué en fonction de l'endroit à implanter l'installation et selon la nature de la charge à alimenter.[9]

### 1.2.4 Performances d'un système hybride

Avec une fiabilité accrue et sans pollution, les SEH sont des installations autonomes, implantées généralement dans les régions isolées loin des réseaux conventionnelles et ils sont conçus pour répondre à la demande d'énergie sur de longues périodes. La flexibilité, la souplesse de fonctionnement et le prix de revient attractif des SEH permettent entre autre le lissage de la puissance délivrée et la remédiation provisoire à une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie.[2]

Au préalable, une cartographie des gisements en énergies renouvelables du site d'implantation doit être établie pour pouvoir effectuer un dimensionnement laborieux des éléments afin de mettre en œuvre une gestion rigoureuse de l'énergie électrique produite.[2]

### 1.2.5 Différentes architectures d'un système hybride

#### 1.2.5.1 Configuration série à bus continu DC

Les sources d'énergie sont connectées au bus à courant continu DC à travers des convertisseurs de puissance. Pour alimenter des charges à courant alternatif, des onduleurs alimentés via ce bus DC sont utilisés et pour les charges à courant continu, un hacheur est utilisé. La simplicité de cette architecture rend simple sa commande, néanmoins, le rendement du système reste faible à cause des pertes aux niveaux des différents éléments intervenants dans la chaîne d'énergie, notamment les pertes causées par les convertisseurs.[2]

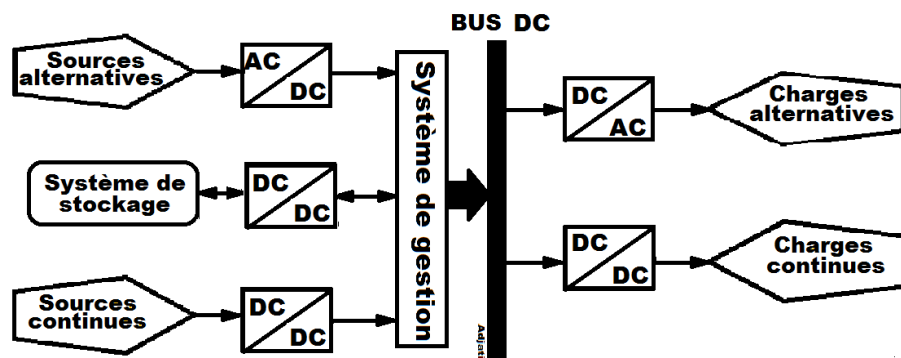


FIGURE 1.1 – Structure des SEH à bus continu DC.

### 1.2.5.2 Architecture mixte à configuration parallèle à bus DC/AC

Dans le cas d'une connexion parallèle, les sources alternatives sont connectées au bus AC et les sources continues sont connectées au bus DC et la charge peut être alimentée par les deux bus simultanément. Le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme redresseur, lorsque les sources alternatives couvrent la consommation électrique et comme onduleur, quand les sources continues couvrent les besoins des charges. Dans le cas d'une anomalie du convertisseur bidirectionnel, elle ne provoque pas de coupure de l'alimentation.[2]

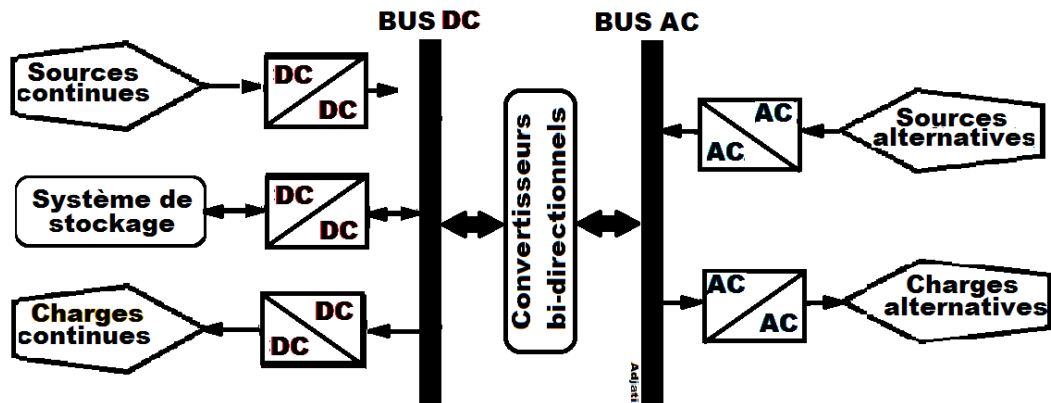


FIGURE 1.2 – Structure des SEH à bus AC/DC.

### 1.2.5.3 Architecture à bus AC

Les sources alternatives sont connectées au bus à courant alternatif AC soit directement ou à travers un convertisseur AC/AC et celles à courant continu sont connectées à travers des onduleurs. Des convertisseurs bidirectionnels sont généralement utilisés pour permettre un transfert bidirectionnel entre les batteries et le bus AC [2]

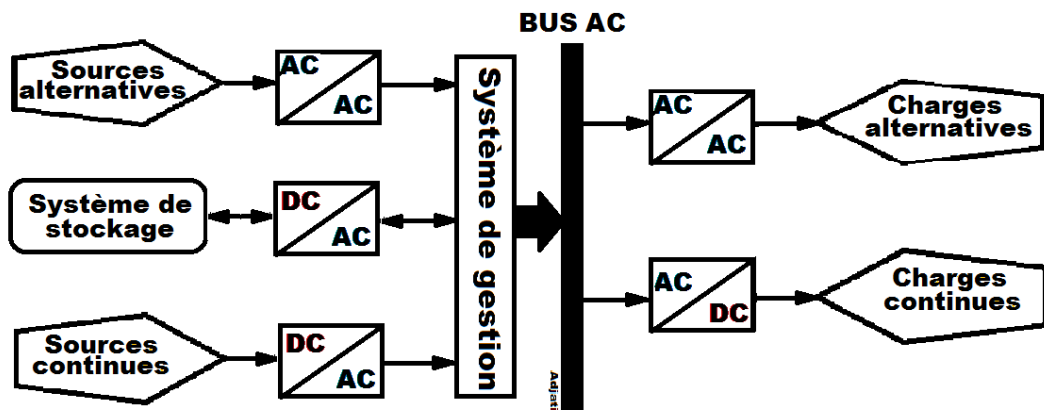


FIGURE 1.3 – Structure des SEH à bus AC.



### 1.2.5.4 Configuration à commutation

La configuration à commutation permet la connexion de la charge par la source alternative ou bien par l'onduleur alimenté via le bus DC. L'alimentation par les deux sources simultanément n'est pas envisageable, compte tenu du commutateur de source. Le rendement est plus élevé, du fait que la source alternative alimente directement la charge. [2]

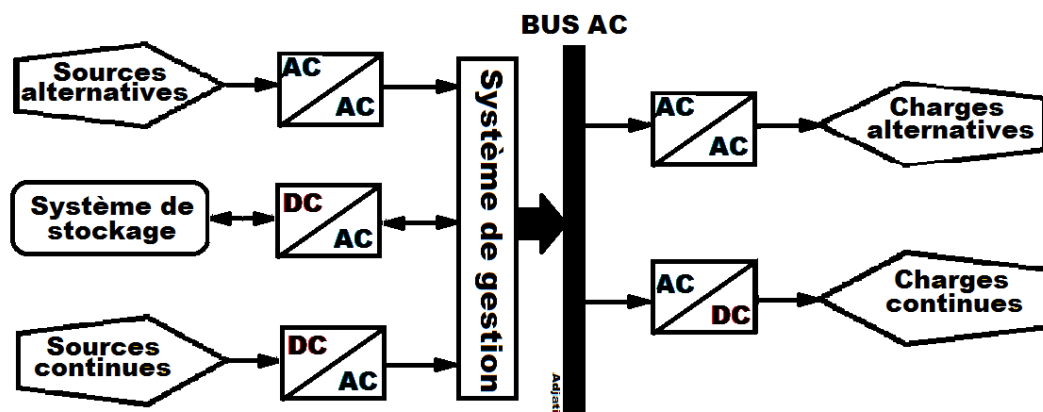


FIGURE 1.4 – Système hybride à commutation.

## 1.3 Générateur photovoltaïque

Avec l'avantage d'être d'origine naturelle et inépuisable, l'énergie du soleil, pour sa facilité de maintenance, s'avère être l'énergie de remplacement la mieux placée pour électrifier les sites isolés des réseaux électriques.[18] [17]

### 1.3.1 L'énergie du soleil

Grâce à une énergie émise d'environ 386 millions de mégawatts par seconde, le soleil demeure d'une importance vitale à la vie sur terre par son apport d'énergie thermique et de lumière, permettant une présence d'eau à l'état liquide et une photosynthèse des végétaux..[18] [17][1]

Le rayonnement global est la somme du rayonnement reçu, directement, du Soleil, de celui, diffus, provenant de la voûte céleste et du rayonnement réfléchi par le sol.

Le plus souvent, l'ensoleillement est exprimé en « heures de soleil maximum », équivalent au nombre d'heures par jour où l'éclairement est en moyenne de  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , il représente l'intensité du rayonnement solaire reçue sur un plan à un moment donné et il varie selon la latitude, l'heure, la saison, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et les divers autres phénomènes météorologiques..[18] [17]

### 1.3.2 Cellule photovoltaïque

Les BECQUERELS furent les premiers à observer en 1839, la capacité des semiconducteurs à transformer la lumière du soleil en électricité. Les premières cellules PV à oxyde cuivreux ( $\text{CuO}$ ) sont

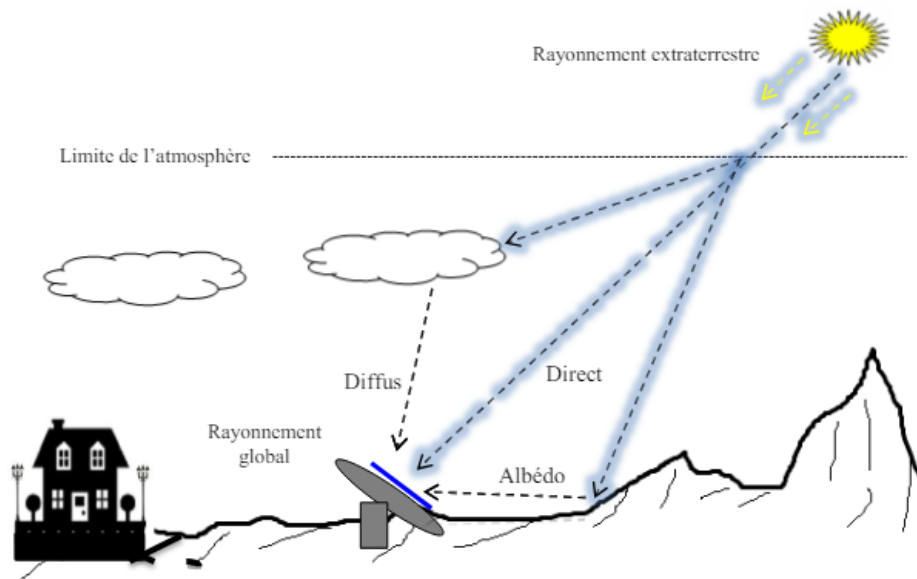


FIGURE 1.5 – Composantes du rayonnement solaire au sol[1].

apparues en 1930, puis en sélénium (Se) et il a fallu attendre 1950 pour fabriquer la première photopile en silicium (Si) par la compagnie Bell téléphone.[17] [1]

Une cellule solaire comprend une base de silicium de type P couverte d'une mince couche de type N. Au voisinage de la jonction, apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et des charges négatives. Des contacts métalliques, en forme de grille, sont déposés sur chaque face de la cellule et constituent les électrodes de sortie de la photopile.[17] [1]

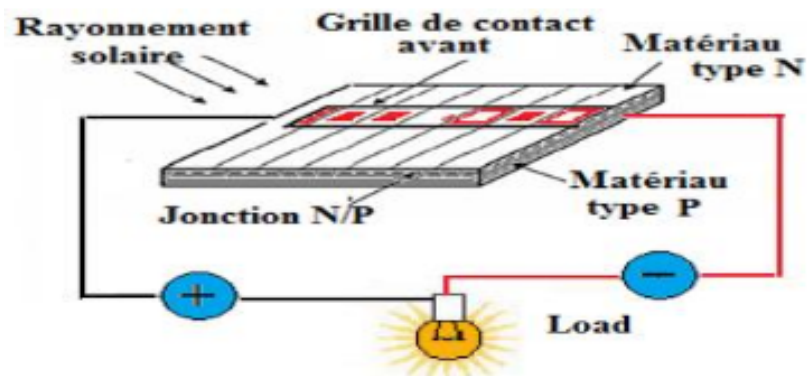


FIGURE 1.6 – Description d'une cellule photovoltaïque [1].

La cellule photovoltaïque peut être représentée comme une diode plate sensible à la lumière. Lorsque la cellule est éclairée par une radiation lumineuse d'énergie «  $h * \mu$  » supérieure ou égale à l'énergie de Gap de la bande interdite «  $E_g$  » du semi-conducteur, les photons sont captés et sont absorbés tout en transmettant leurs énergies à des électrons, un couple électron-trou est créé, c'est l'effet photovoltaïque. Ces charges sont refoulées par le champ électrique interne de la jonction PN vers ses extrémités, ce qui va créer une différence de potentiel appelée tension photovoltaïque. Si une charge est appliquée aux

bornes de la cellule, cette tension génère un courant appelé courant photovoltaïque..[17] [1]

Pour des raisons économiques, le matériau le plus utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques reste le silicium avec ses nombreuses formes, cristalline, multi cristalline, amorphe, en couche mince,.. etc. Par contre, pour les applications spatiales exigeant un rendement plus élevé, les cellules multicouches présentent une meilleure fiabilité ainsi qu'une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps. .[17] [1]

### 1.3.3 Paramètres externes d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivants : .[17] [1]

#### 1.3.3.1 Courant de court-circuit

C'est le courant pour lequel la tension « V » aux bornes de la cellule ou du GPV est nulle. Dans le cas idéal où la résistance série «  $r_s$  » est nulle et la résistance en parallèle «  $r_p$  » est de l'ordre de l'infini, ce courant se confond avec le photo-courant  $I_{ph}$ , par contre dans le cas contraire, il en résulte :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} * \left( \exp\left(\frac{e * r_s * I_{cc}}{A * K * T_c}\right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} * r_s}{r_p}$$

Pour la plupart des photopiles, la résistance série est faible, d'où le terme  $I_{sat} * \left( \exp\left(\frac{e * r_s * I_{cc}}{AKT_c}\right) - 1 \right)$  peut être négligé devant  $I_{ph}$ .

L'expression approchée du courant de court-circuit est donc :

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{r_s}{r_p}\right)}$$

#### 1.3.3.2 Tension de circuit ouvert

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

$$V_{oc} = \frac{A * K * T_c}{e} * \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right)$$

En définissant la tension thermique comme étant  $V_t = \frac{A * K * T_c}{e}$  et en négligeant le courant qui passe dans la résistance parallèle  $r_p$  et avec  $I_{cc}$  très grand devant  $I_{sat}$ , la tension de circuit ouvert est exprimée comme suit [17]

$$V_{oc} = V_t * \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_{sat}}\right)$$

#### 1.3.3.3 Facteur de forme

Le facteur de forme FF reflète la qualité de la cellule par rapport à une cellule idéale où «  $FF = 1$  ». [?] [17]

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} * V_{oc}} = \frac{V_m * I_m}{I_{cc} * V_{oc}}$$

### 1.3.3.4 Rendement

Le rendement ( $\eta$ ) des cellules photovoltaïques de surface effective  $S$  est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale de sortie délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente «  $P_{in}$  ». [17]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}}$$

## 1.4 Énergie éolienne

Outre les applications du vent dans la navigation antique, l'homme a su comment convertir les souffles périodiques des vents pour les convertir en sources motrices des moulins et à puiser l'eau des profondeurs. Aujourd'hui, l'association de cette énergie motrice du vent à des générateurs électriques oblige l'utilisateur à prévoir des algorithmes de commande contrôlant la vitesse de rotation de ces pales en vue d'une éventuelle augmentation de rendement ou d'une baisse de charge mécanique. [2]

### 1.4.1 Énergie du vent

En effet, le rayonnement solaire absorbé à l'équateur diffère de celui absorbé aux deux pôles et la rotation de la terre qui entraîne une irradiation solaire d'un hémisphère et une occultation de l'autre hémisphère sont à l'origine des écarts de température et de pression atmosphérique entre ces deux points et engendre une variation de densité de masse d'air provoquant son déplacement.

Ces masses d'air, appelés vents, véhiculent une énergie cinétique proportionnelle à la masse volumique de l'air et aux volumes échangés. Ces déplacements d'air sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud. [2][7] [6]

### 1.4.2 Notions sur les éoliennes

Ayant un caractère stochastique, l'énergie produite par les éoliennes ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Dans le souci de produire davantage d'énergie et de même éviter les nuisances sonores, des fermes éoliennes offshore sont implantées en plein mer où la présence du vent est plus régulière. Les aérogénérateurs fournissent de quelques dizaines de watts jusqu'à quelques Mégawatts, ils peuvent être à axe vertical ou à axe horizontal et possédant, généralement, de deux à trois pales. [2][16] [15]

Dans le souci d'alléger les factures d'électricité, les puissances fournies par ces aérogénérateurs ne cessent d'augmenter au cours des années, passant de quelques kilowatts en 1990 jusqu'à atteindre quelques térawatts ces dernières années. [16] [15]

Même si le fonctionnement à vitesse variable nécessite un circuit électrique moins simple et un système de commande électronique, il en demeure que le rendement est amélioré et que les oscillations du couple et les efforts subis par le train de puissance se trouvent réduits offrant une meilleure qualité de la puissance électrique.

Cette puissance générée peut être consommée localement pour les cas de sites isolés ou bien dispatchée à travers un réseau conventionnel dans le cas d'un système connecté. [16] [15]

### 1.4.3 Zones de fonctionnement de l'éolienne

L'étude va se restreindre sur la vitesse et la direction du vent seulement. Les stations météorologiques enregistrent la moyenne des vitesses et la direction pendant un intervalle de 10 minutes et elles sont résumées sous forme de rose des vents.[16] [15]

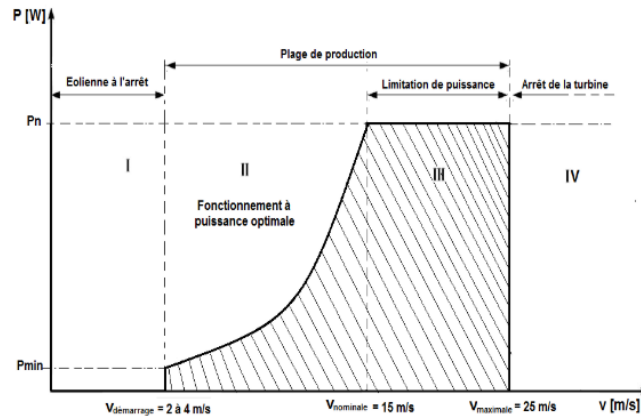


FIGURE 1.7 – Zone de fonctionnement d'une éolienne.[16] [15]

La relation entre la puissance fournie par une turbine et la vitesse du vent est décrite par une courbe de puissance théorique propre à l'éolienne. Son fonctionnement est distingué par quatre zones (figure 1.5) dont la première n'est que lorsque la vitesse du vent est trop faible autour de 2 à 4 m/s nommée « Cut-in » où la turbine peut tourner sans fournir d'énergie.

Dans la deuxième zone, la puissance fournie est proportionnelle à la vitesse du vent. La proportionnalité entre la puissance et le cube de la vitesse du vent attribue sa forme à cette partie de la courbe. Ensuite elle augmente brusquement jusqu'à une certaine valeur de la vitesse, dite nominale, entre 12 et 16 m/s.[16] [15]

Lors des vents élevés, la vitesse de la turbine est bornée dans cette troisième zone à une valeur maximale pour pouvoir limiter la puissance fournie. La quatrième zone est atteinte lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible, ce qui entraîne l'arrêt systématique de la turbine dans le but de la protéger.[16] [15]

### 1.4.4 Principe de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique

Le processus d'exploitation de l'énergie éolienne implique la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, qui alimente ensuite le rotor du générateur, entraînant ainsi la production d'énergie électrique.[13]

À des fins d'adaptation, un multiplicateur de vitesse de transmission est inséré entre turbine et la génératrice asynchrone à double étoiles (GASDE).

Ces boîtes de vitesses nécessitent une maintenance continuelle et défavorisent la fiabilité du dispositif, notamment pour les grandes puissances, raison pour laquelle l'entraînement direct de la machine synchrone à très grand nombre de pôles est favorisé.

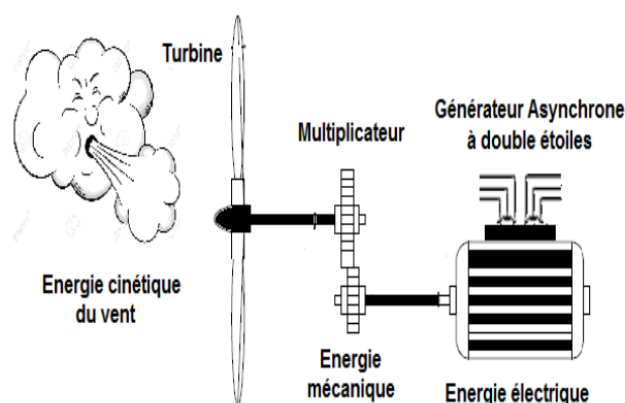


FIGURE 1.8 – Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique [13]

Pour exploiter l'énergie du vent récoltée par les pales d'une éolienne, un dispositif constitué d'une partie tournante transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et une partie fixe assure à travers ses bobinages la conversion en énergie électrique.[13]

## 1.4.5 Avantages et inconvénients des convertisseurs éoliens

### 1.4.5.1 Principaux avantages

La plupart des éoliennes installées dans le monde sont à axe horizontal ayant une structure stable et un bon rendement. Un dispositif d'électronique de puissance permet un fonctionnement à vitesse variable, ce qui engendre un surcroît de production avec un excellent rendement.[2]

L'éolienne de type « Savonius » démarre avec des vents modérés et présente un couple élevé. Elle est peu bruyante et ne possède pas de dispositifs d'orientation, elle est moins encombrante, dont une facilité de maintenance.[2]

Cette énergie étant la moins chère des énergies renouvelables, propre, ne produit pas de déchet toxique ou radioactif, fiable, économique et écologique. Elle s'inscrit dans l'optique de réduction des émissions de dioxyde de carbone où chaque MW produit par l'énergie du vent réduit annuellement entre 800 kg et 900 kg d'émissions de CO<sub>2</sub>. [2] L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple et son démantèlement est facile ne laissant aucune trace et sa durée de vie est de 20 à 25 ans, ce qui vient concurrencer les autres sources renouvelables.[2]

### 1.4.5.2 Principaux inconvénients

Les éoliennes à axe horizontal nécessitent un système de guidage face au vent pour faire pivoter le dispositif de génération qui tourne à des vitesses assez faible d'où la nécessité d'insérer un multiplicateur de vitesse qui est généralement lourd, encombrant et parfois bruyant.[2]

L'éolienne de type « Savonius » avec son importante masse possède un rendement faible, un couple variable et le type « Darrieus », par contre, nécessite un dispositif de lancement qui implique un bruit supplémentaire.[2]

Les puissances récoltées par ces souffles ne sont pas fixes et parfois elles sont de mauvaises qualités en raison de la nature stochastique du vent. Les bruits mécaniques ou aérodynamiques engendrés par la

rotation des pales ne sont plus une gêne maintenant. Des modifications pour exténuer les bruits ont permis d'avoir entre 50 et 60 dB aux alentours de la machine et de presque éliminer les bruits pour des distances supérieures à huit fois le diamètre des pales.

L'impact visuel est à prendre d'une manière subjective car les avis diffèrent d'une personne à une autre et d'une région à une autre, de même, quelques scientifiques, ne se reposant que sur des suppositions non pas sur des études sérieuses, affirment que les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.[2]

### 1.4.5.3 Avantages et inconvénients selon le fonctionnement des éoliennes

Le fonctionnement de l'éolienne peut être à vitesse fixe ou à vitesse variable avec un pas variable ou constant.[2]

TABLE 1.1 – Comparatif des avantages et des inconvénients

Éoliennes	Avantages	Inconvénients
A vitesse fixe	Construction robuste	Impossibilité d'extraire un maximum d'énergie
	Construction simple	Génération de plus de stress mécanique sur le multiplicateur au changement de vitesses
	A moindre coût	Incapacité d'un contrôle indépendant de la puissance active et réactive.
A vitesse variable	Captation d'un maximum d'énergie	Génération de la machine d'un courant et d'une tension à fréquence variable nécessitant un convertisseur de puissance
	Fonctionnement efficace	
	Capacité de fournir la puissance à une tension et fréquence constante	
	Contrôle de la puissance active et réactive fournies au réseau	

## 1.5 Notions sur les machines multiphasées

Les machines triphasées à courant alternatif assurent une rotation avec une possibilité de variation de vitesse dans les processus industriels. Le handicap de ce genre de machine réside lors des utilisations à fortes puissances, surtout, au niveau des onduleurs qui doivent commuter des courants importants d'où la nécessité d'utiliser plusieurs structures en parallèle.

Un paradoxe apparaît du fait que la réduction des courants à commuter cause l'augmentation des tensions mises en jeu, provoquant, ainsi, un vieillissement prématuré des isolants. Pour réduire ces gradients de tensions élevées, il est impératif d'outrepasser la machine triphasée et d'opter pour des machines de structure multi niveaux ayant un nombre de phase supérieur à trois. Ces machines sont, souvent, désignées par « machines à grand nombre de phases » ou « machines multiphasées » [1][12]

### 1.5.1 Caractéristiques des machines multiphasées

Les machines multiphasées se démarquent des machines classiques, comme les machines triphasées, par le nombre de phases présentes dans leur stator.

Les machines multiphasées sont classées en fonction du nombre de phases statoriques qui est ou non multiple de trois.[12] [1]

#### 1.5.1.1 Machines multiphasées de «Type 1»

Les machines multiphasées du type 1, également appelées machines multi-étoile, se distinguent par un nombre de phases statoriques «q» multiple de trois.[12]

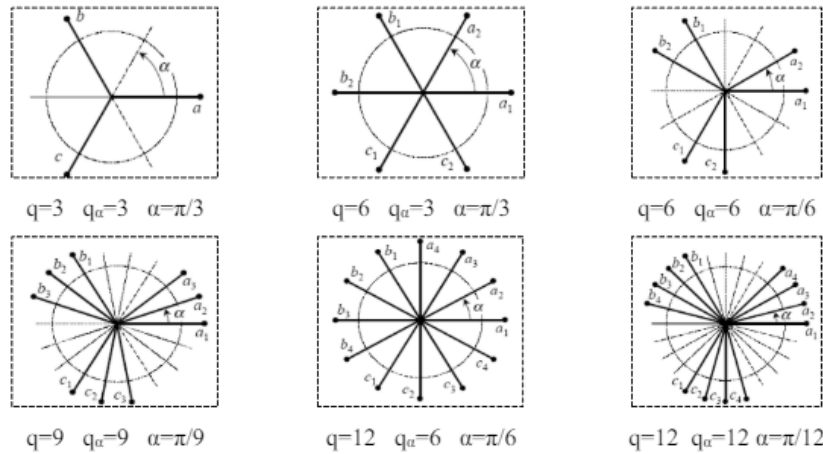


FIGURE 1.9 – Machines multiphasées de type «1».

Le nombre  $\eta$  correspond au nombre d'étoiles triphasées, ce qui explique ce que l'on entend par « machine multi étoile ».

Il est possible d'avoir plusieurs configurations pour un même nombre de phases. En se basant sur le décalage angulaire ( $\alpha$ ) entre deux bobines adjacentes, qui est le décalage angulaire entre deux étoiles adjacentes.

Il est donc essentiel d'introduire un coefficient appelé « nombre équivalent de phases » pour différencier entre les configurations possibles indiquées par :  $q\alpha = \frac{\pi}{\alpha}$

#### 1.5.1.2 Machines multiphasées de «Type 2»

Le type de machine dit 'type 2' regroupe les machines multiphasées ayant un nombre de phases statoriques « q » impair. Les q phases sont décalées d'un angle de «  $\frac{2 * \pi}{q} = 2 * \alpha$  ».

Le nombre équivalent de phases est donné par :

$$q = q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha}$$



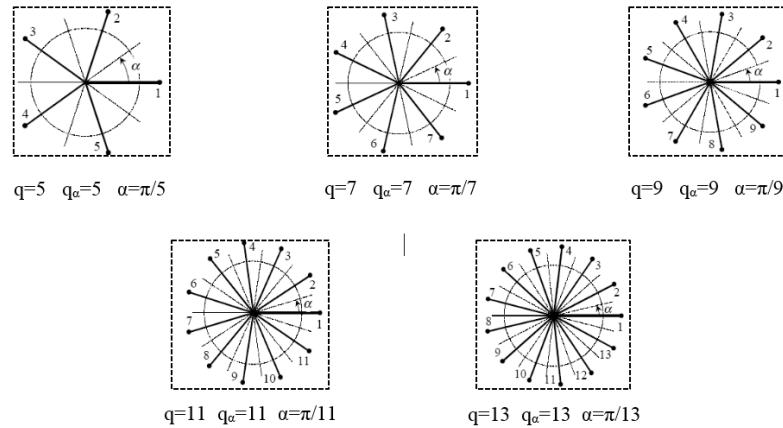


FIGURE 1.10 – Machines multiphasées de type «2».

## 1.5.2 Avantages de la machine multiphasée

Un intérêt particulier est accordé aux machines multiphasées, en particulier aux machines asynchrones à double étoile sont réputées pour les nombreux avantages qu'elles offrent.[2][12]

### 1.5.2.1 Augmentation de la puissance

L'augmentation du nombre de phases du stator conduit à une diminution du courant par phase sans que la tension par phase ne soit augmentée. La puissance totale est distribuée sur les différentes phases. L'onduleur alimentant la machine aura des composants de puissance de calibre inférieur, fonctionnant à des fréquences de commutation plus élevées offrant une minimisation des ondulations de courant et de couple.[2][12]

### 1.5.2.2 Fiabilité

Il peut y avoir jusqu'à  $(q-3)$  phases ouvertes sans que la connexion du neutre ne soit nécessaire. De ce fait la, la machine possédant un très grand nombre de phases offre plus de degré de liberté pour sa commande. [12]

### 1.5.2.3 Élimination d'harmonique d'espace

Les harmoniques d'espace d'un certain ordre sont éliminés dans les machines multiphasées. Il est important de noter que pour un nombre d'encoches spécifié, plus le nombre de phases augmente, plus le nombre d'encoches par pôle et par phase diminue, Cela signifie que le facteur de distribution du fondamental augmente.[12] [11]

### 1.5.2.4 Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques

Les machines multiphasées possèdent la propriété d'éliminer les harmoniques du couple du rang faible. Les ondulations du couple sont, plus rapidement, amorties dans une machine ayant plus de phases. Du fait que certains harmoniques de courant statorique ne créent pas de force magnétomotrice (f.m.m), donc, n'induisent pas de courant au rotor, la machine multiphasée aura moins de perte rotorique.[12] [11]

### 1.5.2.5 Amélioration du facteur de puissance

De la même manière que les machines comportant un grand nombre de phases, le facteur de puissance de la machine asynchrone à double étoile est amélioré par rapport à la machine asynchrone triphasée.

## 1.5.3 Inconvénients de la machine multiphasée

Malgré leurs nombreux avantages, les machines multiphasées présentent également quelques inconvénients.

### 1.5.3.1 Courants harmoniques de circulation

Les onduleurs de tension convertissent le courant continu (CC) en courant alternatif (CA). Ce processus de conversion n'est pas toujours parfait et peut générer des distorsions dans la forme d'onde du courant (CA), ce qui se traduit par la présence d'harmoniques.

### 1.5.3.2 Le coût

Les machines multiphasées sont généralement plus coûteuses que les machines monophasées de puissance comparable. Cela est dû à l'augmentation de nombre de phases qui engendre une augmentation de semi-conducteurs à utiliser, ce qui provoque un surcroît du coût de l'ensemble.

### 1.5.3.3 La commande

Les méthodes utilisées pour les machines triphasées doivent être développées pour être appliquées aux machines multiphasées

## 1.6 conclusion

lors de ce premier chapitre, nous avons abordé les généralités des générateurs photovoltaïques et éoliens, ainsi que la machine asynchrone à double étoile, sans oublier d'évoquer l'importance des systèmes hybrides.

le chapitre suivant fera l'objet de la modélisation de la machine asynchrone à double étoile.

# CHAPITRE 2

## MODÉLISATION DE LA MASDE

### 2.1 Introduction

Dans le but de contrôler et maîtriser un système quelconque, on doit le modéliser. Pour ce là, on devra concevoir un modèle mathématique typique de la machine par l'élaboration des lois de commande décrivant le comportement électrique et dynamique.[1]

Dans ce chapitre nous décrirons en premier lieu la machine asynchrone à double étoile. Nous présenterons par la suite les hypothèses simplificatrices. Enfin nous expliquerons la nécessité d'alimenter la MASDE par des onduleurs de tension.

### 2.2 Description de la machine asynchrone à double étoile

La machine asynchrone à double étoile est une machine constituée de deux stators fixes déphasés d'un angle « $\alpha = 30^\circ$ » et d'un rotor mobile à cage d'écuriel. Les deux étoiles sont alimentées par deux sources de tensions triphasées de même fréquence et de même amplitude, déphasées entre elles d'un même angle « $\alpha$ ». L'enroulement rotorique est déphasé d'un angle « $\theta_r$ » par rapport à la première étoile. [10][1]

### 2.3 Modélisation de la machine asynchrone à double étoile

Des phénomènes difficiles à modéliser tels que l'effet de peau et de saturation magnétique rendent les recherches difficiles. C'est pourquoi certaines hypothèses simplificatrices sont nécessaires pour simplifier la formulation mathématique, ce qui est déjà assez difficile. L'effet de ces hypothèses sur le comportement de la machine est considéré comme négligeable, ce qui permettrait certainement d'obtenir des équations simples (moins complexes) reflétant le fonctionnement de la machine.[1]

#### 2.3.1 Hypothèses simplificatrices

- La machine a une structure symétrique et une épaisseur d'entrefer uniforme ;
- Ignorer la saturation du circuit magnétique ;

- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligeables ;
- La résistance du bobinage ne change pas avec la température ;
- Ignorer l'effet de peau ;
- L'auto-inductance et l'inductance mutuelle sont indépendantes de l'intensité du courant.
- La force magnétomotrice est considérée comme ayant une distribution sinusoïdale. [1]

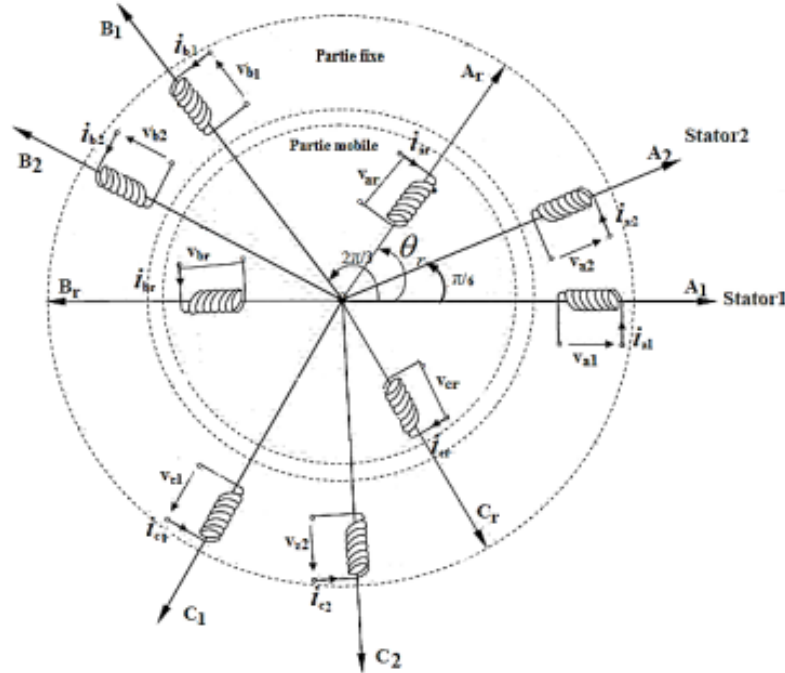


FIGURE 2.1 – Représentation des enroulements de la machine asynchrone à double étoiles.

### 2.3.2 Modèle de la machine asynchrone à double étoiles

#### 2.3.2.1 Équations électriques de la MASDE

Les équations électriques de la MASDE s'écrivent comme suit : [1] [19]

**Première étoile**

$$\begin{cases} V_{a1} = R_{s1} * I_{a1} + \frac{d}{dt} \phi_{a1} \\ V_{b1} = R_{s1} * I_{b1} + \frac{d}{dt} \phi_{b1} \\ V_{c1} = R_{s1} * I_{c1} + \frac{d}{dt} \phi_{c1} \end{cases} \quad (2.1)$$

**Deuxième étoile**

$$\begin{cases} V_{a2} = R_{s2} * I_{a2} + \frac{d}{dt} \phi_{a2} \\ V_{b2} = R_{s2} * I_{b2} + \frac{d}{dt} \phi_{b2} \\ V_{c2} = R_{s2} * I_{c2} + \frac{d}{dt} \phi_{c2} \end{cases} \quad (2.2)$$

Pour le rotor

$$\begin{cases} 0 = R_r * I_{ar} + \frac{d}{dt} \phi_{ar} \\ 0 = R_r * I_{br} + \frac{d}{dt} \phi_{br} \\ 0 = R_r * I_{cr} + \frac{d}{dt} \phi_{cr} \end{cases} \quad (2.3)$$

### 2.3.2.2 Équations magnétiques

$$\begin{bmatrix} \phi, abc1 \\ \phi, abc2 \\ \phi_r, abc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1}, s1] & [L_{s1}, s2] & [L_{s1}, r] \\ [L_{s2}, s1] & [L_{s2}, s2] & [L_{s2}, r] \\ [L_r, s1] & [L_r, s2] & [L_r, r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i, abc1 \\ i, abc2 \\ i_r, abc \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

La relation (2.4) donne l'expression matricielle du flux impliqué en fonction de différents courants.  
[1] [19]

$$\text{Matrice inductance de la 1er étoile } [L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{s1} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{s1} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$\text{Matrice inductance de la 2ème étoile } [L_{s2,s1}] = \begin{bmatrix} L_{s2} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{s2} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{s2} + L_{ms} \end{bmatrix}$$

$$\text{Matrice inductance du rotor } [L_{s1,s1}] = \begin{bmatrix} L_r + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_r + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_r & L_r + L_{mr} \end{bmatrix}$$

Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et 2.

$$[L_{s1,s2}] = L_{ms} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 1 et rotor .

$$[L_{s1,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Il faut noter que :  $[L_{s2,s1}] = [L_{s1,s2}]^t$  ;  $[L_{r,s1}] = [L_{s1,r}]^t$  ;  $[L_{r,s2}] = [L_{s2,r}]^t$  Matrice inductance mutuelle entre l'étoile 2 et le rotor.

$$[L_{s2,r}] = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha + \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha) \end{bmatrix}$$

$L_{s1}$  : Inductance propre du 1er stator.  $L_{s2}$  : Inductance propre du 2ème stator.  $L_r$  : Inductance propre du rotor.  $L_{ms}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelles statoriques.  $L_{mr}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelles rotoriques.  $L_{sr}$  : Valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelles entre l'une des étoiles du stator et le rotor.

### 2.3.2.3 Équations magnétiques développées de la MASDE

$$\begin{bmatrix} \Phi_{a1} \\ \Phi_{b1} \\ \Phi_{c1} \\ \Phi_{a2} \\ \Phi_{b2} \\ \Phi_{c2} \\ \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{a1a1} & M_{a1b1} & M_{a1c1} & M_{a1a2} & M_{a1b2} & M_{a1c2} & M_{a1ar} & M_{a1br} & M_{a1cr} \\ M_{b1a1} & L_{b1b1} & M_{b1c1} & M_{b1a2} & M_{b1b2} & M_{b1c2} & M_{b1ar} & M_{b1br} & M_{b1cr} \\ M_{c1a1} & M_{c1b1} & L_{c1c1} & M_{c1a2} & M_{c1b2} & M_{c1c2} & M_{c1ar} & M_{c1br} & M_{c1cr} \\ M_{a2a1} & M_{a2b1} & M_{a2c1} & L_{a2a2} & M_{a2b2} & M_{a2c2} & M_{a2ar} & M_{a2br} & M_{a2cr} \\ M_{b2a1} & M_{b2b1} & M_{b2c1} & M_{b2a2} & L_{b2b2} & M_{b2c2} & M_{b2ar} & M_{b2br} & M_{b2cr} \\ M_{c2a1} & M_{c2b1} & M_{c2c1} & M_{c2a2} & M_{c2b2} & L_{c2c2} & M_{c2ar} & M_{c2br} & M_{c2cr} \\ M_{ara1} & M_{arb1} & M_{arc1} & M_{ara2} & M_{arb2} & M_{arc2} & L_{arar} & M_{arbr} & M_{arcr} \\ M_{bra1} & M_{brb1} & M_{brc1} & M_{bra2} & M_{brb2} & M_{brc2} & M_{brar} & L_{brbr} & M_{brcr} \\ M_{cra1} & M_{crb1} & M_{crc1} & M_{cra2} & M_{crb2} & M_{crc2} & M_{craar} & M_{crabr} & L_{craar} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \\ I_{c1} \\ I_{a2} \\ I_{b2} \\ I_{c2} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

### 2.3.2.4 Énergie magnétique

L'expression de l'énergie magnétique est :

$$\omega_{mag} = \frac{1}{2} ([I_{s1}]^t [\Phi_{s1}] + [I_{s2}]^t [\Phi_{s2}] + [I_r]^t [\Phi_r]) \quad (2.6)$$

### 2.3.2.5 Couple électromagnétique

Le couple électromagnétique est alors donné par la dérivée partielle de l'énergie par rapport à l'angle mécanique : [1] [?]

$$C_{em} = \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_m} = p * \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_e} \quad (2.7)$$

$p$  : nombre de paire pôle ;  $\theta_m$  : angle mécanique  $\theta_e$  : angle électrique .

### 2.3.2.6 Équation mécanique

L'équation mécanique de base qui régit le mouvement est :

$$J * \frac{d\Omega}{dt} = c_{em} - c_r - F_r * \Omega \quad (2.8)$$

$F_r$  : Coefficient de frottement ;  $J$  : Moment d'inertie ;  $\Omega = \frac{\omega_r}{p}$  :Vitesse angulaire de rotation ;  $c_r$  : couple résistant ou couple de charge et  $c_{em}$  : couple électromagnétique.

### 2.3.3 Modèle biphasé de la machine asynchrone à double étoiles

Ces transformations permettent d'obtenir deux systèmes de bobinages orthogonaux sans interactions magnétiques à partir de systèmes de bobinages rotor et stator réels.

#### 2.3.3.1 Transformation de Park directe

La transformée de Park permet d'étudier facilement tous les régimes transitoires de la machine électrique. Le principe consiste à transformer les systèmes d'enroulements statoriques en un système équivalent à deux enroulements biphasés créant un champ électromagnétique tournant générant la même force magnétomotrice. La transformée de park permet de convertir les grandeurs statoriques et rotoriques d'indices réels (a ; b ; c) en grandeurs d'indices directes, quadrature et homopolaire(d ; q ; o).[1] [10]

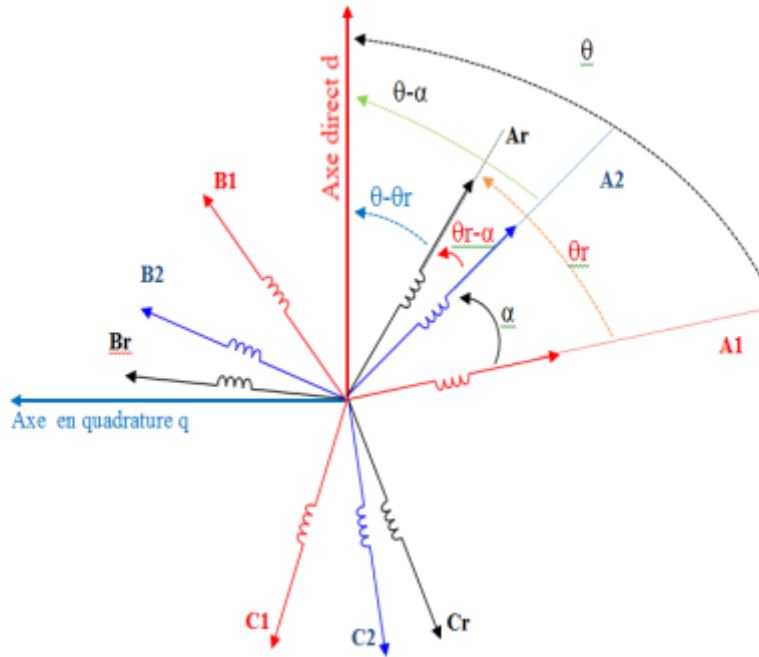


FIGURE 2.2 – Représentation angulaire des systèmes d'axe dans l'espace électrique.

- (A1;Br;C1) et (A2;B2;C2) représentent deux étoiles statoriques ;
- (Ar;Br;Cr) représentent les trois phases rotoriques ;
- $\theta$  Représente angle de transformation de Park de la 1er étoile.

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} ; \quad \omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} ;$$

$$\omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} = \frac{d\theta}{dt}$$

a) Matrice de Park de la première étoile

$$P[\theta_{s1}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

b) Matrice de Park de la deuxième étoile

$$P[\theta_{s2}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) \\ (\frac{1}{\sqrt{2}}) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) \end{bmatrix}$$

c) Matrice de Park du rotor

$$P[\theta_r] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ (\frac{1}{\sqrt{2}}) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) \end{bmatrix}$$

### 2.3.3.2 Transformation de Park inverse

a) Matrice de Park inverse de la première étoile

$$P[\theta]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

b) Matrice de Park inverse de la deuxième étoile

$$P[\theta - \alpha]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \alpha) & -\sin(\theta - \alpha) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) \\ \cos(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) \\ \cos(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) \end{bmatrix}$$



### c) Matrice de Park inverse du rotor

$$P[\theta - \theta_r]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) \\ \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) \\ \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) & (\frac{1}{\sqrt{2}}) \end{bmatrix}$$

#### 2.3.3.3 Choix du référentiel

Ils existent trois systèmes de référence selon la vitesse attribuée au repère d-q tel que.

##### a) Référentiel lié au stator

C'est le meilleur système de référence pour travailler avec les grandeurs instantanées du régime transitoire.

##### b) Référentiel lié au rotor

C'est un système de référence souvent utilisé dans le régime transitoire.

- la vitesse électrique du repère d-q est équivalente à la pulsation électrique.
- la vitesse de rotation est considérée constante.

##### c) Référentiel lié au champ tournant

L'étude de la MASDE sera réalisée à travers un référentiel associé à un champ tournant, où la vitesse du référentiel d-q est égale à la vitesse du champ tournant  $\omega_s$ .

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \rho\Omega \quad (2.9)$$

Il s'agit d'un système de référence qui ne simplifie pas la transformation des équations électriques.

### 2.3.4 Application de la transformation de Park à la MASDE

Après avoir appliqué la transformation de Park aux courants, aux tensions et aux flux, on constatera un nouveau système d'équations tel que :

#### 2.3.4.1 Équations des tensions

En mettant en œuvre la transformation de Park, cela en résulte : [1] [5] [10]

$$\begin{cases} V_{d1} &= R1 * I_{d1} + \frac{d\phi_{d1}}{dt} - \omega_s * \phi_{q1} \\ V_{q1} &= R1 * I_{q1} + \frac{d\phi_{q1}}{dt} + \omega_s * \phi_{d1} \\ V_{d2} &= R2 * I_{d2} + \frac{d\phi_{d2}}{dt} - \omega_s * \phi_{q2} \\ v_{q2} &= R2 * I_{q2} + \frac{d\phi_{q2}}{dt} + \omega_s * \phi_{d2} \\ 0 &= Rr * I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s * -\omega_r) * \phi_{qr} \\ 0 &= Rr * I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s * -\omega_r) * \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.10)$$

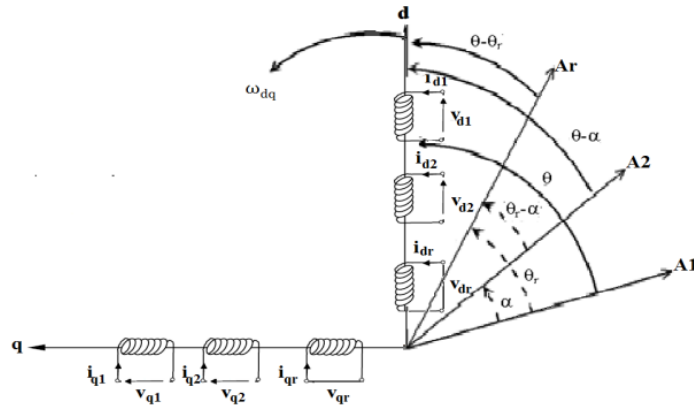


FIGURE 2.3 – Représentation du modèle de PARK de la MASDE dans le repère d-q .

### 2.3.4.2 Équations magnétiques

$$\begin{cases} \phi_{d1} = L_1 * i_{d1} + L_m * (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \phi_{q1} = L_1 * i_{q1} + L_m * (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \phi_{d2} = L_2 * i_{d2} + L_m * (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \phi_{q2} = L_2 * i_{q2} + L_m * (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \\ \phi_{dr} = L_r * i_{dr} + L_m * (i_{d1} + i_{d2} + i_{dr}) \\ \phi_{qr} = L_r * i_{qr} + L_m * (i_{q1} + i_{q2} + i_{qr}) \end{cases} \quad (2.11)$$

La tension propre cyclique du stator 1 :  $L_1 + \frac{3}{2} * L_{ms} = L_1 + L_m$

La tension propre cyclique du stator 2 :  $L_2 + \frac{3}{2} * L_{ms} = L_2 + L_m$

La tension propre cyclique du rotor :  $L_r + \frac{3}{2} * L_{mr} = L_r + l_m$

et la liaison mutuelle cyclique entre le stator 1, le stator 2 et le rotor est :

$$L_m = \frac{3}{2} * L_{ms} = \frac{3}{2} * l_{sr} = \frac{3}{2} l_{mr}$$

### 2.3.4.3 Puissance instantanée

L'expression de la puissance absorbée par la machine est donnée par :

$$P = [v_s]^t * [i_s] = v_{a1} * i_{a1} + v_{b1} * i_{b1} + v_{c1} * i_{c1} + v_{a2} * i_{a2} + v_{b2} * i_{b2} + v_{c2} * i_{c2} \quad (2.12)$$

Étant donné que la transformation de Park utilisée repose sur l'invariance de la puissance instantanée, cela aboutit à leur équivalence physique. L'équation (2.12) devient :

$$P = v_{d1} * i_{d1} + v_{q1} * i_{q1} + v_{d2} * i_{d2} + v_{q2} * i_{q2} \quad (2.13)$$

Après le développement, la puissance devient :

$$\begin{aligned}
P = & [R1i_{d1}^2 + R2i_{d2}^2 + R1i_{q1}^2 + R2i_{q2}^2] \\
& + \left[ \frac{d}{dt} \phi_{d1} i_{d1} + \frac{d}{dt} \phi_{d2} i_{d2} + \frac{d}{dt} \phi_{q1} i_{q1} + \frac{d}{dt} \phi_{q2} i_{q2} \right] \\
& + \omega s [\phi_{d1} i_{q1} + \phi_{d2} i_{q2} - \phi_{q1} i_{d1} - \phi_{q2} i_{d2}]
\end{aligned} \tag{2.14}$$

D'où on aura les trois termes suivant : [1] [5] [10]

**a) Puissance mécanique**

$$P_{mec} = \omega s [\phi_{d1} i_{q1} + \phi_{d2} i_{q2} - \phi_{q1} i_{d1} - \phi_{q2} i_{d2}]$$

**b) Pertes joules**

$$P_j = [R1i_{d1}^2 + R2i_{d2}^2 + R1i_{q1}^2 + R2i_{q2}^2]$$

**c) Puissance électromagnétique emmagasinée**

$$P_{em} = \left[ \frac{d}{dt} \phi_{d1} i_{d1} + \frac{d}{dt} \phi_{d2} i_{d2} + \frac{d}{dt} \phi_{q1} i_{q1} + \frac{d}{dt} \phi_{q2} i_{q2} \right]$$

**2.3.4.4 Couple électromagnétique**

$$C_{em} = p \frac{L_m}{L_r + L_m} [\phi_{dr} (i_{q1} + i_{q2}) - \phi_{qr} (i_{d1} + i_{d2})] \tag{2.15}$$

**2.3.4.5 Équation mécanique**

$$J \frac{d\Omega}{dt} + Fr\Omega = C_{em} - C_r \tag{2.16}$$

avec  $\Omega = \frac{\omega r}{p}$

## 2.4 Alimentation de la MASDE par des onduleurs de tension

Il est nécessaire d'alimenter MASDE par des onduleurs de tension pour que :

- Contrôler de manière précise la vitesse et le couple de la machine.
- Flexibilité de la tension et de la fréquence en fournissant une tension et une fréquence ajustables, ce qui est cruciale pour l'adaptation aux exigences spécifiques de la charge entraînée par la machine.
- Adaptabilité aux systèmes de conversion d'énergie : ils sont particulièrement adaptés aux systèmes de conversion d'énergie, comme les éoliennes ou les générateurs photovoltaïques, où la MASDE est utilisée pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. [1] [10]

### 2.4.1 Modélisation de l'onduleur

On ne peut varier la vitesse de rotation du moteur si elle est directement connectée au réseau électrique. Pour des applications industrielles, une alimentation via des onduleurs de tension permet la variation de la vitesse par action simultanée sur la fréquence et l'amplitude de la tension statorique. Un onduleur autonome est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une source d'énergie alternative de fréquence fixe ou variable. Les onduleurs sont constitués, le plus souvent, d'interrupteurs électroniques tels que les IGBT, de transistors de puissance ou thyristors. Par un jeu de commutations commandées de manière appropriée, généralement, par modulation de largeur d'impulsion, la source est modulée afin d'obtenir un signal alternatif de fréquence désirée. Afin d'alimenter les deux étoiles de la machine, on utilise deux onduleurs triphasés à commutation commandée. Les trois bras de chaque onduleur sont composés de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits.[1]

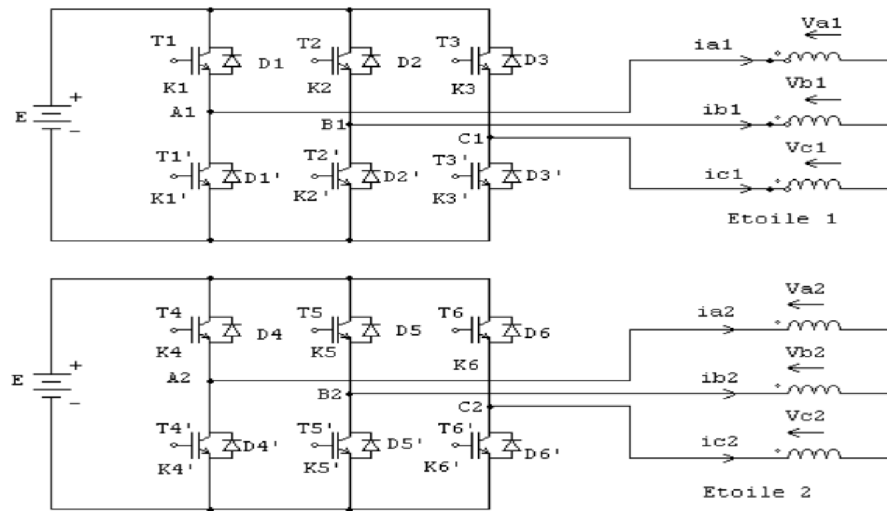


FIGURE 2.4 – Alimentation de la MASDE par des onduleurs de tensions.[1]

La représentation de l'interrupteur par une paire de ((transistor-diode)) est illustrée par : [1] [10]

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrupteur "i" est fermé (Ki conduit - Ki' bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrupteur "i" est ouvert (Ki bloqué - Ki' conduit)} \end{cases} \quad (2.17)$$

Avec  $f_i + f_i' = 1$ ;  $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6$

$$\begin{bmatrix} v_{a1} \\ v_{b1} \\ v_{c1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \text{ et } \begin{bmatrix} v_{a2} \\ v_{b2} \\ v_{c2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix}$$

### 2.4.2 Commande par modulation des largeurs d'impulsions sinus-triangle

Pour moduler la largeur des impulsions en fonction de la tension de sortie appropriée, on utilise la technique de modulation des largeurs d'impulsions MLI.

La MLI sinus-triangle est obtenue en comparant une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire.[1] [10] [11]

### 2.4.2.1 L'onde modulante

Le déphasage entre les étoiles du stator est représenté par l'angle  $\alpha = \frac{\pi}{6}$ . Il n'y a qu'à remplacer  $(2\pi ft)$  des équations régissant la 1ère étoile par  $(2\pi ft - \alpha)$  dans le système d'équations régissant la 2ème étoile.

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{\text{refa1}} = v_m \sin(2\pi ft) \\ v_{\text{refb1}} = v_m \sin(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}) \\ v_{\text{refc1}} = v_m \sin(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}) \end{array} \right. \quad \text{et} \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{\text{refa2}} = v_m \sin(2\pi ft - \frac{\pi}{6}) \\ v_{\text{refb2}} = v_m \sin(2\pi ft - \frac{5\pi}{6}) \\ v_{\text{refc2}} = v_m \sin(2\pi ft - \frac{3\pi}{2}) \end{array} \right.$$

### 2.4.2.2 La porteuse

L'équation de la porteuse est donnée par : [1] [10]

$$V_p(t) = \begin{cases} v_{pm}(\frac{4t}{T_p} - 1) & \text{Si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ v_{pm}(\frac{-4t}{T_p} + 3) & \text{Si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases}$$

Les points d'intersection représentent les instants de commutation entre la porteuse et la modulante. [1] [10] [5]

### 2.4.2.3 L'indice de modulation

Cet indice correspond au rapport entre la fréquence de modulation ( $f_p$ ) et la fréquence de la tension de référence ( $f_s$ ).

$$m = \frac{f_p}{f_s}$$

### 2.4.2.4 Le coefficient de réglage en tension

Égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence ( $v_m$ ) à la valeur crête de l'onde de modulation ( $v_{pm}$ ). [1] [10] [5]

$$r = \frac{v_m}{v_{pm}}$$

A titre d'exemple un indice de modulation  $m=21$  et un coefficient de réglage de tension  $r=0.8$

## 2.5 Conclusion

Au cours de ce deuxième chapitre, nous avons présenté la machine asynchrone à double étoiles, puis nous avons décrit les hypothèses simplificatrices et la nécessité d'alimenter la MASDE par des onduleurs de tension.

Le chapitre suivant fera l'objet du dimensionnement des générateurs photovoltaïques et éoliens.

## CHAPITRE 3

# DIMENSIONNEMENT DES GÉNÉRATEURS PHOTOVOLTAÏQUE ET ÉOLIEN

### 3.1 Introduction

Les générateurs photovoltaïques et éoliens se présentent comme des solutions incontournables pour subvenir aux besoins énergétiques, notamment dans les sites éloignés. Dans ce chapitre nous décrirons en premier lieu le dimensionnement du générateur photovoltaïque et par la suite le dimensionnement de la turbine.

### 3.2 Dimensionnement du générateur photovoltaïques

L'évaluation de l'énergie solaire disponible dépend des valeurs moyennes journalières et mensuelles de l'irradiation solaire disponible. [1] [4]

#### 3.2.1 Dimensionnement des panneaux photovoltaïque

La meilleure façon de déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques à utiliser est de calculer, ( $P_s$ ) la puissance normalisée sous les condition (Noct) d'un panneaux à partir des données d'irradiation du site et ensuite chercher le nombre de panneaux nécessaires. Dans le but de déterminer la puissance normalisée du GPV à utiliser, nous allons effectuer le dimensionnement pour une installation photovoltaïque, avec des panneaux solaires normalisés de type SIEMENS SM 110-24 ayant une puissance nominale normalisée de 110Wc.

Les constructeurs de panneaux photovoltaïques fournissent les paramètres du module ( $I_{sc}$ ,  $I_{mpp}$ ,  $V_{oc}$ ,  $V_{mpp}$ ) sous les conditions standard de fonctionnement, notamment une insolation de  $1000W/m^2$  et une température de  $25^\circ C$  (AM 1.5).[1]

TABLE 3.1 – Paramètres du module photovoltaïque SIEMENS SM 110-24

Paramètres		Valeurs
Puissance maximale du panneau.	« POP »	110 W
Courant au point de puissance maximale.	« IOP »	3,15 A
Tension au point de puissance maximale.	« VOP »	35 V
Courant de court-circuit.	« ICC »	3,45 A
Tension en circuit ouvert.	« VCO »	43,5 V
Coefficient d'incrémentation du courant ICC.	« T »	1,4 mA/°C
Coefficient d'incrémentation de la tension VCO.	« T »	-152 mV/°C

### 3.2.2 Détermination du nombre de panneaux photovoltaïques

#### a) Calcul du nombre de panneaux photovoltaïques

Le nombre de panneaux requis est déterminé par : [1]

$$N_p = \frac{P_g}{P_{op}} \quad (3.1)$$

$$\text{An : } N_p \geq \frac{3912.5}{110} = 35.56 \text{ panneaux.}$$

Le nombre de panneaux requis est donc 36 panneaux

#### b) Puissance normalisée du GPV

La puissance normalisée de GPV sera donc : [1]

$$P_{GPV} = N_p * P_{op} \quad (3.2)$$

$$\text{An : } P_{GPV} = 36 * 110 = 3960W$$

#### c) Nombre de panneaux en série

La tension de l'onduleur est de 630 Volts, donc le nombre de panneaux photovoltaïques à brancher en série est : [1]

$$N_{PV\text{série}} = \frac{V_{bus}}{V_{op}} \quad (3.3)$$

$$\text{An : } N_{PV\text{série}} = \frac{630}{35} = 18 \text{ panneaux en série}$$

#### d) Nombre de panneaux branches en parallèle

Le courant nominal de la machine asynchrone à double étoile est de 6.5A, le nombre de branches à brancher en parallèle est : [1]

$$N_{PV//} = \frac{I_{nominal}}{I_{op}} \quad (3.4)$$

$$\text{An : } N_{PV//} = \frac{6.5}{3.15} \approx 2 \text{ branches de panneaux en parallèle}$$

### 3.3 Dimensionnement de la turbine

#### a) Puissance électrique à utiliser

La puissance électrique à utiliser pour dimensionner l'éolienne est de  $P_{\text{elec}} = 3960W$  qui représente la puissance normalisée

#### b) Puissance mécanique

Le rendement de la GASDE est de 0,88, une différence de glissement de 1% et un multiplicateur de vitesse de 0,9. La puissance mécanique nécessaire pour faire pivoter les pales de l'éolienne est : [1] [3]

$$P_{\text{mec}} = \frac{P_{\text{elec}}}{G_{\text{Multi}} * R_{\text{GASDE}}} \quad (3.5)$$

$$\text{Application numérique : } P_{\text{mec}} = \frac{P_{\text{elec}}}{G_{\text{Multi}} * R_{\text{GASDE}}} = \frac{3960}{0.9 * 0.88} = 5000W$$

#### c) Détermination de la longueur des pales

On a la longueur des pales est donnée par : [1] [3]

$$R = \sqrt[3]{\frac{2 * P_{\text{mec}}}{\rho_{\text{air}} * \pi * C_p * V_w^2}} \quad (3.6)$$

$$\text{Application numérique : } R = \sqrt[3]{\frac{2 * 5000}{1.22 * \pi * 0.48 * 6.5^2}} = 5.04 \approx 5m$$

avec  $C_p = 0.48$  et  $\lambda = 8$

#### d) Vitesse des pales

La vitesse des pales est donnée par :

$$N = \frac{30 * \lambda * V_w}{\pi * R} \quad (3.7)$$

$$\text{Application numérique : } N = \frac{30 * \lambda * v}{\pi * R} = \frac{30 * 8 * 6.5}{\pi * 5} = 98.36 \text{ tr/mn}$$

#### e) Le coefficient multiplicateur

Le coefficient multiplicateur est donné par : [1] [3]

$$K = \frac{N_s}{N} \quad (3.8)$$

$$\text{An : } K = \frac{N_s}{N} = \frac{3000}{98.36} = 30.5$$



TABLE 3.2 – Récapitulation des dimensionnements des diverses sources

Désignation	Valeur	Désignation	Valeur
<b>Générateur photovoltaïque</b>			
Puissance normalisée	3960 W	Nombre de panneaux	36
Nombre de panneaux en série	18	Branche en parallèle	2
<b>Eolienne</b>		Puissance mécanique	5000 W
Rendement de la GASDE	0.88	Gain du multiplicateur	0.9
Coefficient multiplicateur	30.5	Rayon de la pale	5 m

Ainsi les pales de l'éolienne utilisée possèdent une longueur de 5 m et un multiplicateur de vitesse ayant un rapport  $K = 30,5$

## 3.4 Essais sur le GPV

### 3.4.1 Influence de l'ensoleillement sur les performances du GPV

Les essais sont réalisés à une température constante de  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , avec des différentes valeurs de l'ensoleillement  $G_s$ . La figure 3.1 montre clairement que la baisse de l'éclairement  $G_s$  provoque une baisse du courant de court-circuit, cependant, la tension de circuit ouvert diminue faiblement.

Si l'on applique les mêmes conditions d'essais, la puissance générée diminue considérablement si l'éclairement diminue et la figure 3.2 montre que le point optimal chute rapidement. Les caractéristiques du champ photovoltaïque sont représentées par la figure 3.7 pour  $P_{\text{GPV}} = f(V_{\text{GPV}})$  et la figure 3.8 pour  $I_{\text{GPV}} = f(V_{\text{GPV}})$  et la tension générée pour un ensoleillement donné est représentée par la figure 3.9.

### 3.4.2 Influence de la température sur les performances du GPV

Pour un ensoleillement constant de  $1 \text{ kW}/\text{m}^2$ , on effectue des simulations pour diverses valeurs de la température  $T$ . Il est probable que cela ait un impact significatif sur les caractéristiques électriques du semi-conducteur.

On obtient les courbes pour des températures allant de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $30^{\circ}\text{C}$ , avec un pas de  $5^{\circ}\text{C}$ , et à titre comparatif pour une valeur de  $60^{\circ}\text{C}$ .

Les courbes de la figure 3.3 indiquent que le courant de court-circuit est faiblement lié à la température, alors que la tension à vide diminue de manière significative lorsque la température augmente.

La puissance optimale varie inversement avec la température telle qu'elle est illustrée par la figure 3.3, ce qui permet de ne pas confondre température du soleil exprimée en degrés et son rayonnement exprimé en  $\text{W}/\text{m}^2$ .

Après avoir comparé les résultats, il est clair que les caractéristiques du module photovoltaïque  $P_{\text{GPV}} = f(V_{\text{GPV}})$  et  $I_{\text{GPV}} = f(V_{\text{GPV}})$  diffèrent en fonction de la température.

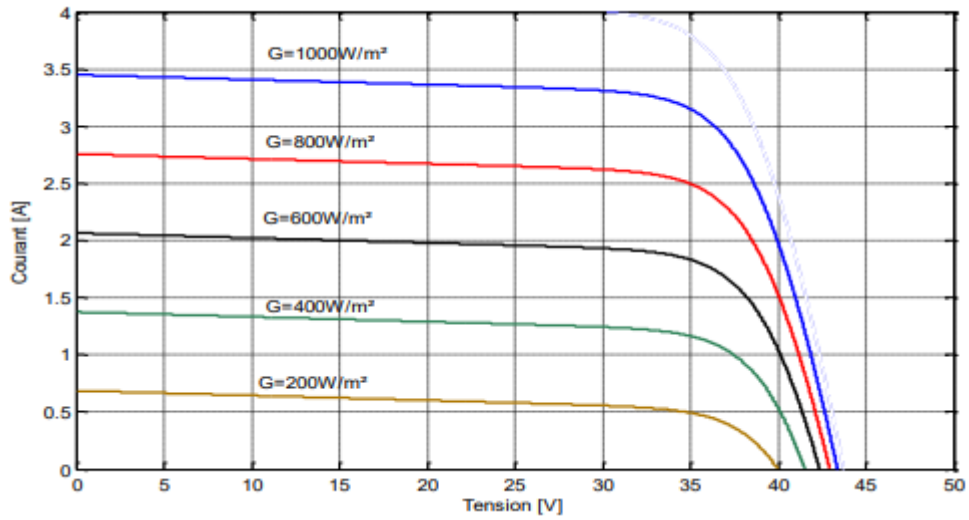


FIGURE 3.1 – Influence de l’ensoleillement sur la caractéristique  $IGPV = f(VGPV)$

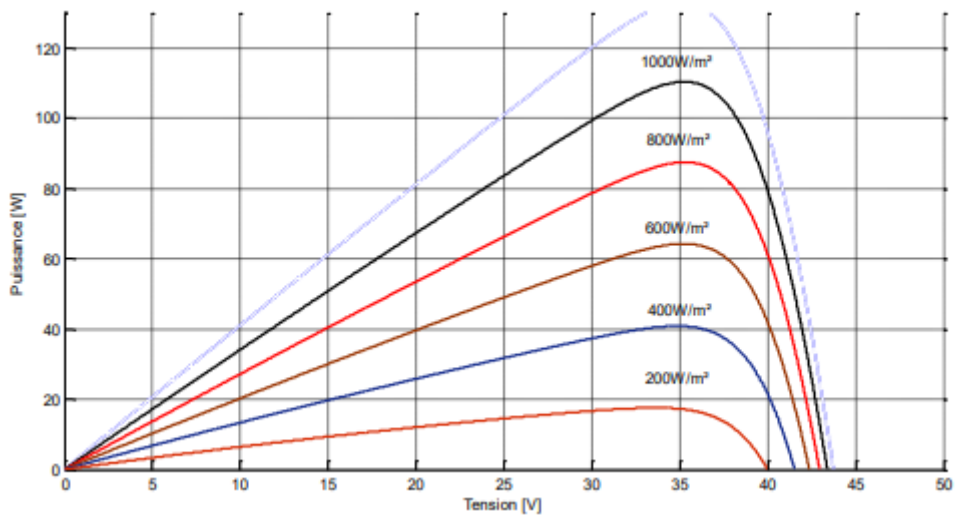


FIGURE 3.2 – Influence de l’ensoleillement sur la caractéristique  $PGPV = f(VGPV)$

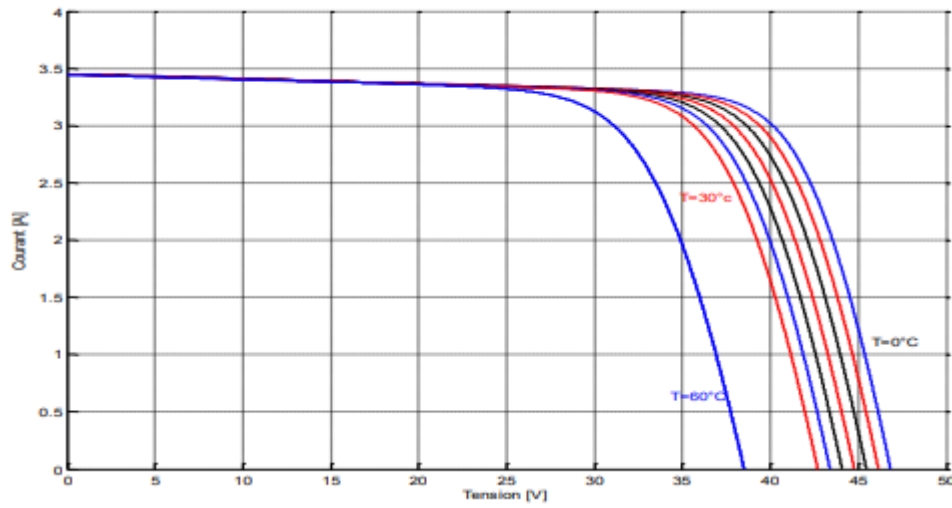


FIGURE 3.3 – Influence de la température sur la caractéristique  $IGPV = f(VGPV)$

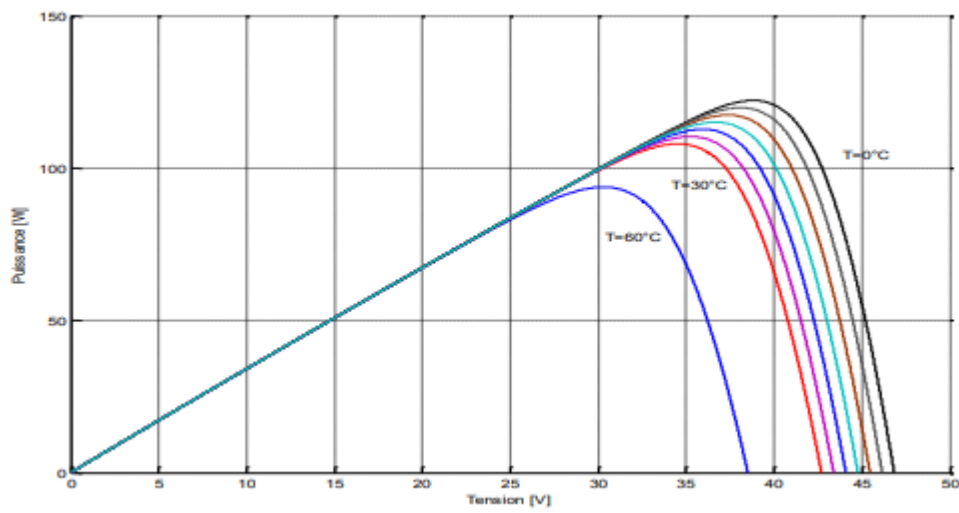


FIGURE 3.4 – Influence de la température sur la caractéristique  $PGPV = f(VGPV)$

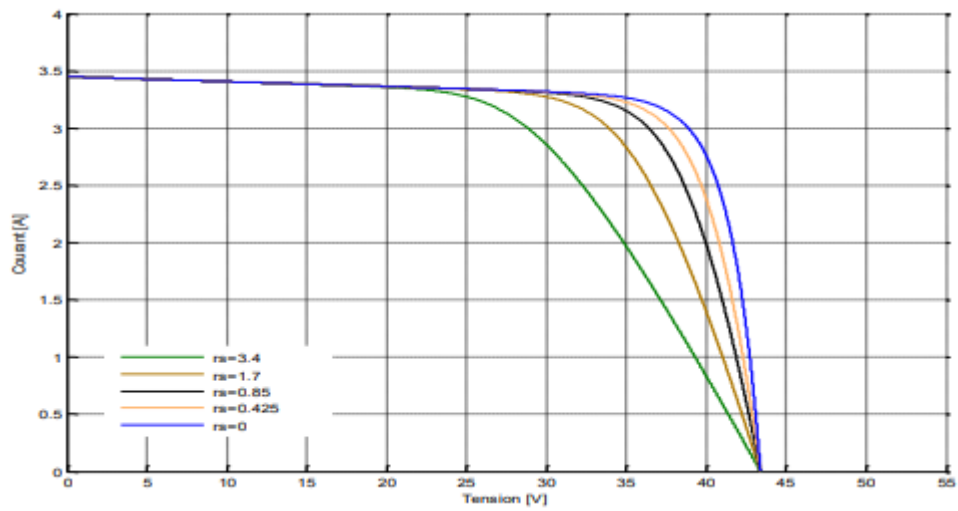


FIGURE 3.5 – Influence de la résistance série sur les caractéristiques du GPV

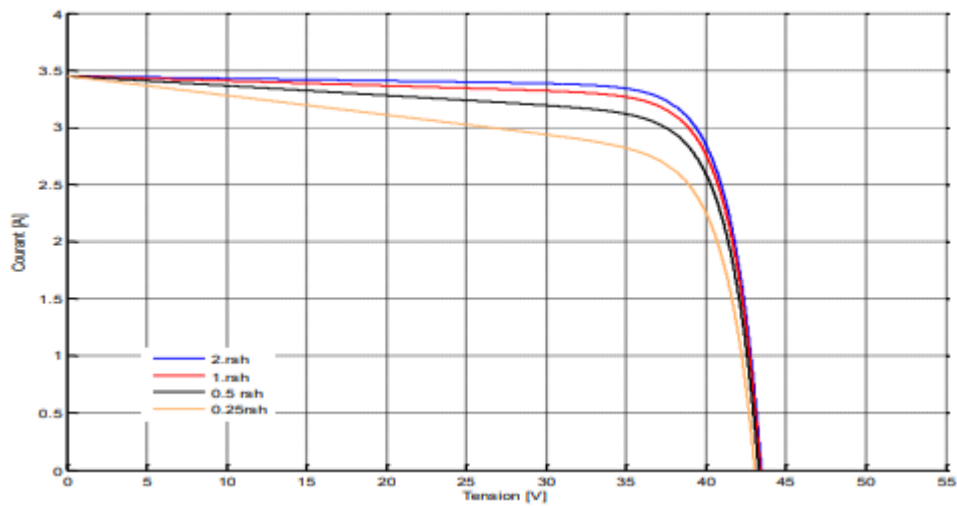


FIGURE 3.6 – Influence de la résistance shunt sur les caractéristiques du GPV

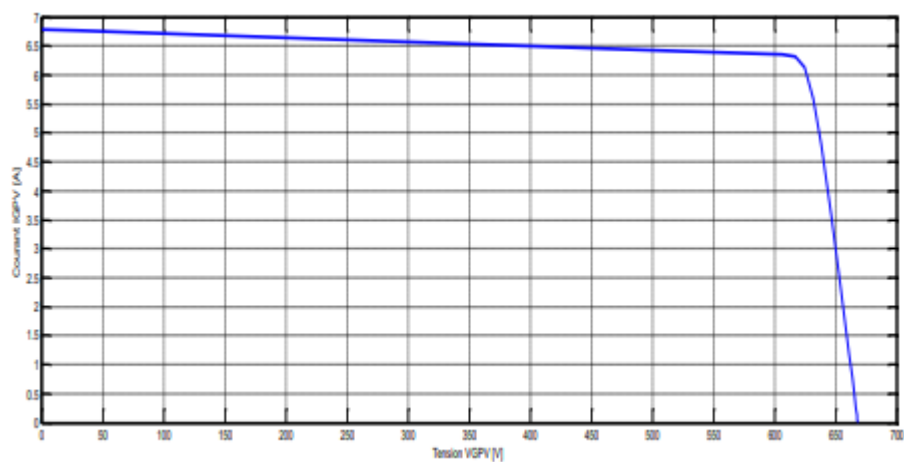


FIGURE 3.7 – Caractéristique  $I_{GPV} = f(V_{GPV})$  du champ photovoltaïque

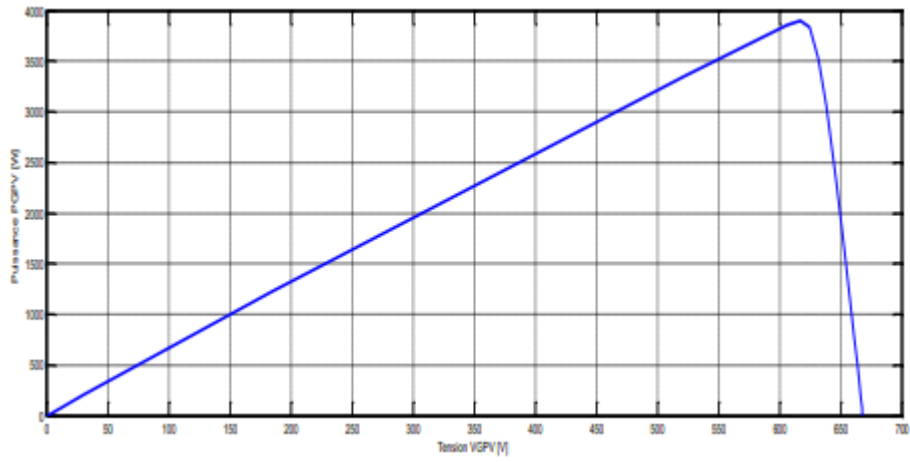


FIGURE 3.8 – Caractéristique  $P_{GPV} = f(V_{GPV})$  du champ photovoltaïque

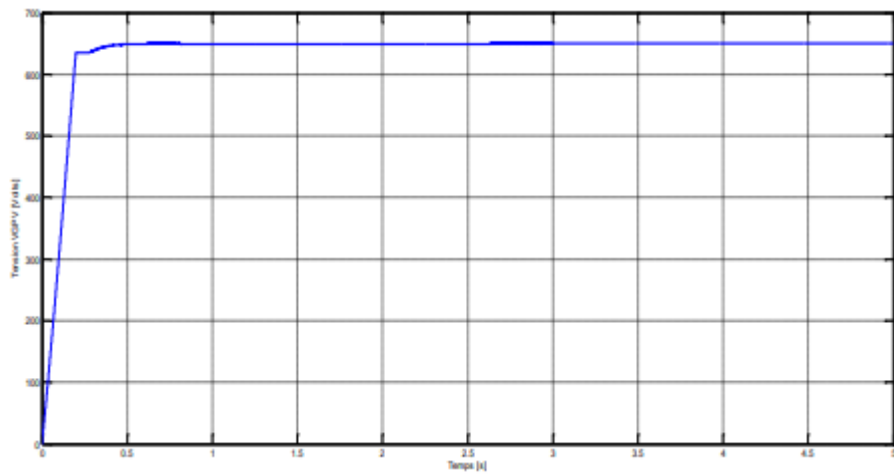


FIGURE 3.9 – Tension générée du champ photovoltaïque

### 3.4.3 Influence de la résistance série et shunt sur la caractéristique PV du module

La résistance interne de la cellule, qui est la résistance série, est principalement influencée par la résistance du semi-conducteur utilisé.

La résistance série a un impact sur la partie où la photo-diode agit comme un générateur de tension.

Cette résistance a un impact sur la pente de cette caractéristique, entraînant une diminution de la valeur du courant de court-circuit.

La résistance shunt est généralement la caractéristique du courant de fuite par effet de bord autour de la cellule solaire. [1]

## 3.5 Composants du système hybride GPV – Turbine éolienne

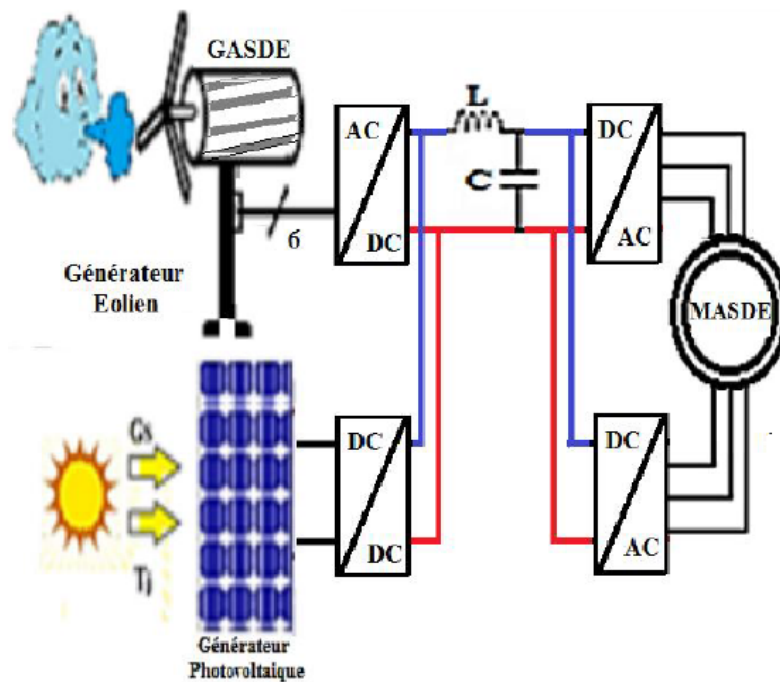


FIGURE 3.10 – Installation hybride photovoltaïque-turbine éolienne[1]

La figure 3.10 montre que ce système est constitué d'une source photovoltaïque et d'une éolienne équipée d'une GASDE, d'un convertisseur AC/DC, de deux convertisseurs DC/DC, deux onduleurs DC/AC qui alimentent le MASDE.

### 3.6 Redressement des tensions générées par la GASDE

Les condensateurs utilisés pour amorcer la GASDE sont illustrés par la figure 3.11 ont une valeur de  $40 \mu\text{F}$ . Les tensions générées par la GASDE doivent être redressées afin de pouvoir alimenter les onduleurs de la MASDE.[8]

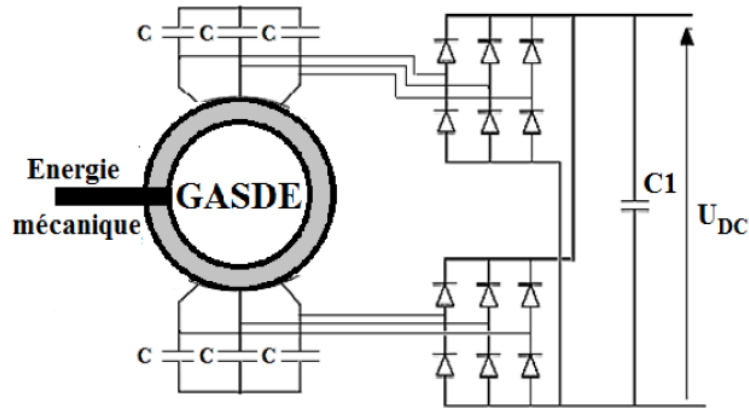


FIGURE 3.11 – Redressement double PD3 de la tension générée par la GASDE

La valeur moyenne de la tension redressée est donnée par :

$$U_{dc} = \sqrt{3} * V_m * \frac{\sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} \quad (3.9)$$

Et la valeur efficace de la tension redressée est donnée par :

$$U_{eff} = V_m * \sqrt{\frac{3 * (1 + \sin \frac{2\pi}{6})}{2 * \frac{2\pi}{6}}} \quad (3.10)$$

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé le dimensionnement des générateurs photovoltaïques et éolien, puis on a analysé l'influence de la température sur les performances du GPV et aussi l'influence de la résistance série et shunt sur la caractéristique PV du module puis, les composantes du système hybride GPV – Turbine éolienne sont étalées.

Le chapitre suivant est consacré à la simulation et l'interprétation des résultats.

# CHAPITRE 4

## APPLICATION ET INTERPRÉTATIONS DES RÉSULTATS

### 4.1 Introduction

Par l'observation et l'analyse des différentes évolutions des grandeurs d'un système, le « modéliser » en vue de le simuler est une étape primordiale en vue de le contrôler et (ou) de le maîtriser. Donc modéliser, c'est concevoir un modèle mathématique typique de la machine par l'élaboration des lois de commande de son comportement électrique et dynamique.

Pour les besoins de simulation numérique du comportement de la machine asynchrone à double étoile, le choix s'est porté sur l'utilisation du logiciel MATLAB SIMULINK.

### 4.2 Simulation de la MASDE alimentée par le réseau électrique

#### 4.2.1 Source de tension alimentant la MASDE

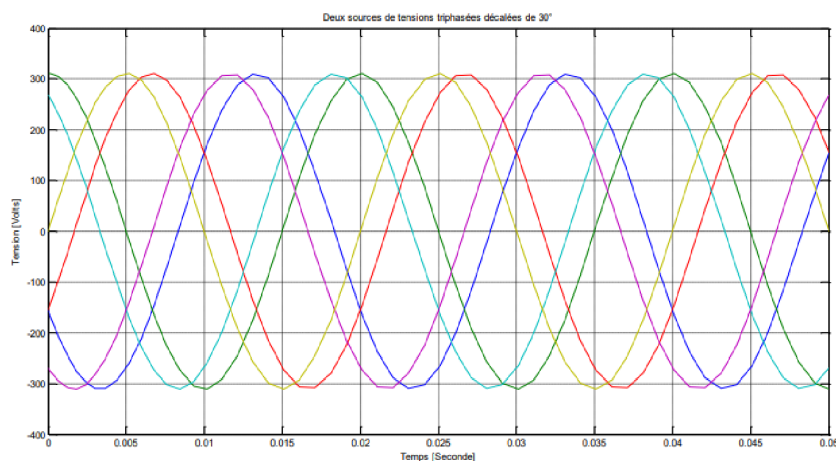


FIGURE 4.1 – Allures des deux sources de tensions déphasées de 30°.

Deux sources de tensions triphasées équilibrées décalées entre elles d'un angle  $=30^\circ$ , sont utilisées pour



alimenter les deux stators de la machine.

Pour étudier le comportement de la MASDE, elle sera directement alimentée par le réseau. La machine tourne à vide, puis dans l'intervalle de temps [1sec, 2.5sec] est appliquée une charge d'une valeur du couple résistant égale à « 14 Nm », ensuite la charge est déconnectée dans l'intervalle [2.5, 3.5] et enfin au-delà de  $t=3.5$  sec est connectée une charge de « -14 Nm »

#### 4.2.2 Vitesse de rotation

Au démarrage, la machine étant à vide, la vitesse augmente d'une manière presque linéaire pour atteindre la vitesse de « 313.83 rd/s » très proche de la vitesse de synchronisme « 314.16 rd/s ».

A  $t=1$ sec, avec  $C_r=14$ Nm, la machine fonctionne comme moteur et la vitesse de rotation glisse jusqu'à «  $N = 298$  rd/s », puis la machine tourne à vide avant l'application de la charge  $C_r = -14$ Nm, à  $t=3.5$ sec où la machine fonctionne comme génératrice, l'arbre de la machine est entraîné à une vitesse de rotation de « 327.35 rd/s »

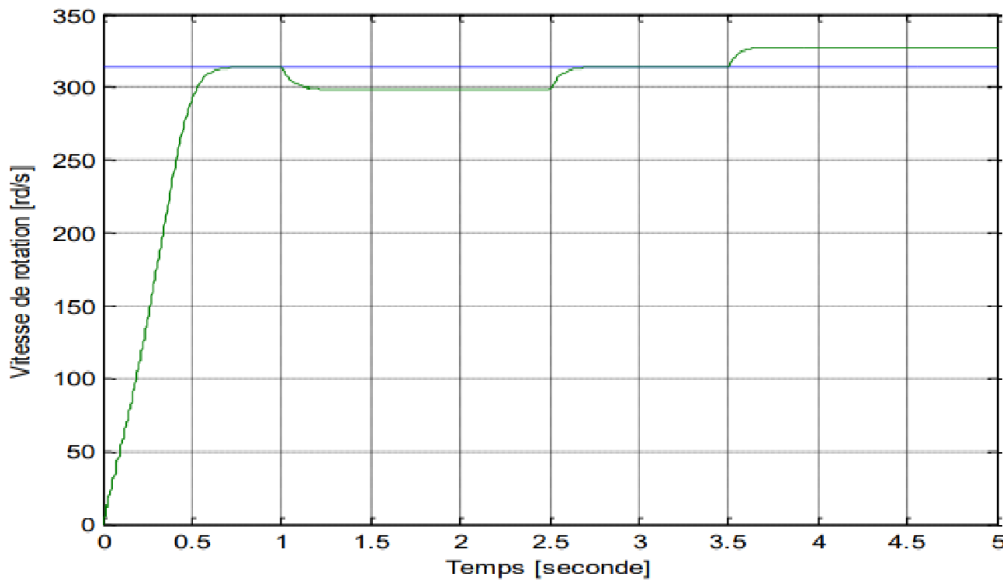


FIGURE 4.2 – Vitesses de rotation et de synchronisme.

#### 4.2.3 Couple électromagnétique

Au démarrage le couple atteint des valeurs proches de 80 Nm, puis au bout de 0.3 sec les vibrations s'estompent avant d'atteindre une valeur à vide de 0.32 Nm qui correspond aux pertes fer à vide et aux pertes mécaniques par frottement.

A  $t=1$ sec, le couple électromagnétique passe de 0.32 Nm à 14.3 Nm en suivant la valeur du couple résistant. A  $t=2.5$ sec, le couple électromagnétique chute et reprend sa valeur à vide. A  $t=3.5$ sec, la MASDE est entraînée à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme, le fonctionnement de la machine étant en mode génératrice, le couple suit de près la référence du couple résistant, ainsi le couple électromagnétique passe de 0.32 Nm à -13.7 Nm.

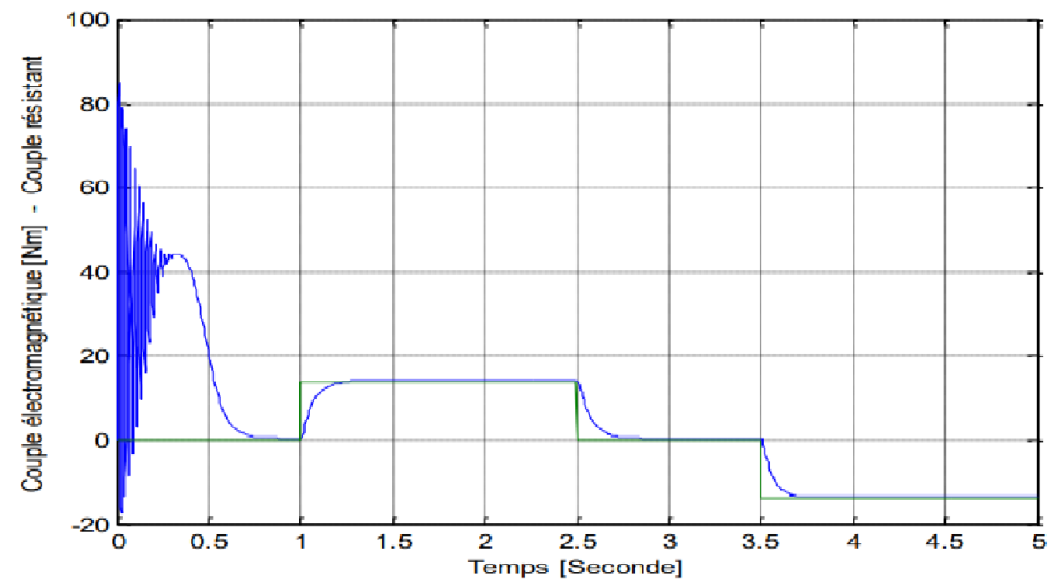


FIGURE 4.3 – Couples électromagnétique et résistant.

#### 4.2.4 Flux rotoriques

L'allure du flux rotorique direct et du flux rotorique en quadrature ressemble de très près à l'allure du couple électromagnétique.

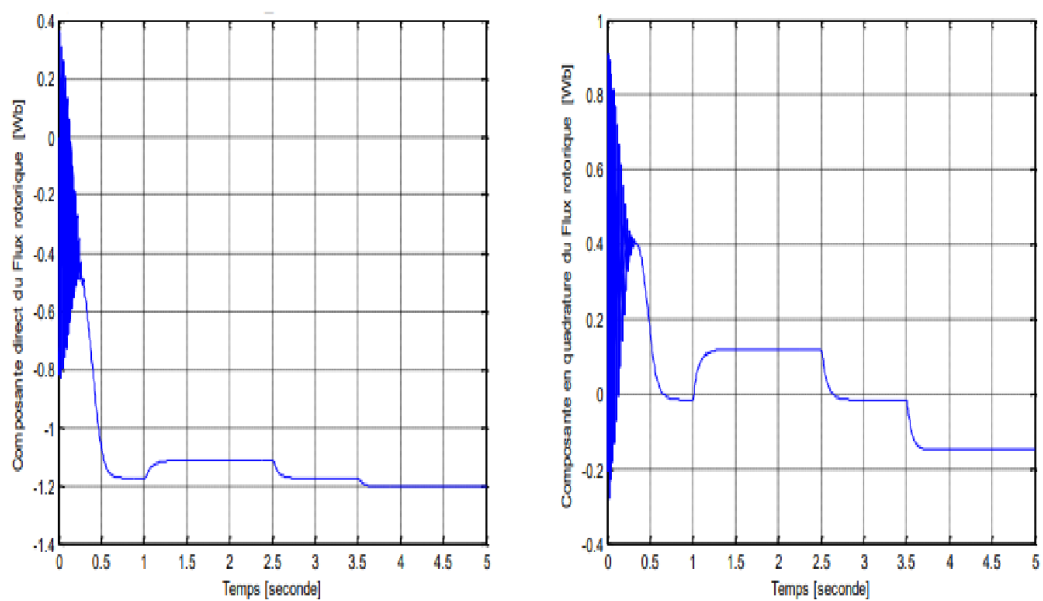


FIGURE 4.4 – Couples électromagnétique et résistant.

### 4.2.5 Courants direct et en quadrature

Les allures des composantes directes et en quadrature du courant évoluent d'une manière analogue à l'évolution de la vitesse de rotation de la machine.

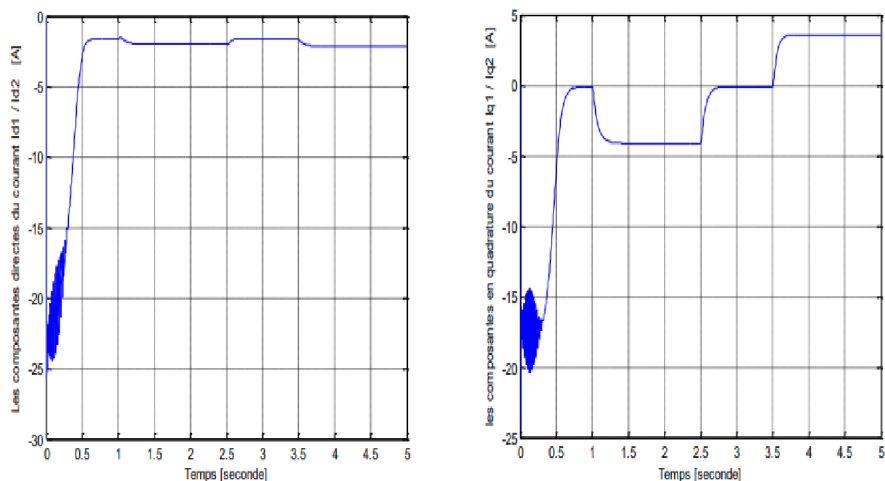


FIGURE 4.5 – Courant direct Courant en quadrature.

### 4.2.6 Courants statoriques

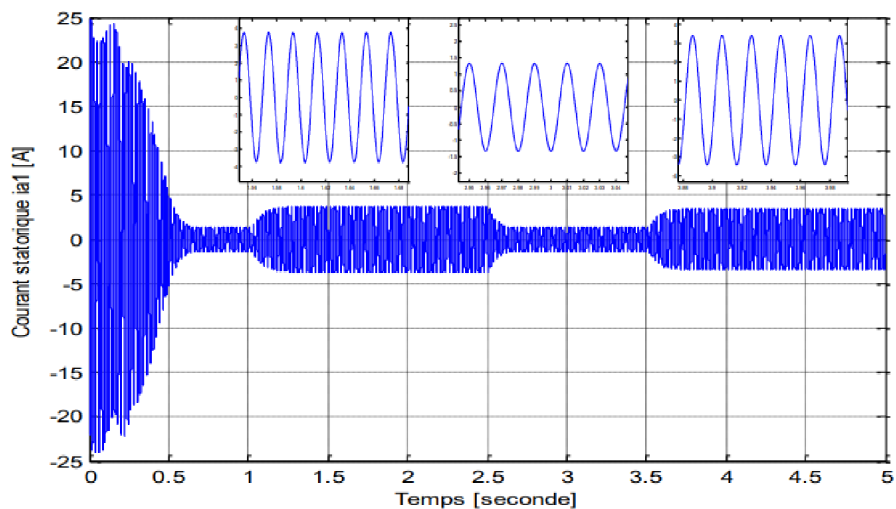


FIGURE 4.6 – Courant statorique ia1.

Au démarrage, les courants absorbés par les deux étoiles du stator atteignent des valeurs de presque quatre fois le courant nominal soit « 24A ». Le régime permanent est atteint après une période de « 0.6 seconde » et la machine absorbe un courant d'une valeur « 1.33A » à vide. après l'attelage de la charge, la MASDE absorbe du réseau davantage de courant. En mode moteur le courant oscille autour de

« 3.7A », par contre, en fonctionnement générateur le courant passe à « 3.4A » environ. L'effet inductif de la machine explique le déphasage en arrière du courant statorique  $ia_1$ , par rapport, à la tension d'alimentation  $Va_1$ . D'où le sens de transition de la puissance est positif de fait que les deux grandeurs sont de même signe. La MASDE absorbe de l'énergie active et réactive nécessaire pour l'alimentation de la charge et pour sa magnétisation.

En mode générateur, le fait que la tension  $Va_1$  et le courant  $ia_1$  sont presque déphasés de 180 degrés, la puissance produite est de signe négatif, cela veut dire que la machine fournit de l'énergie active à la source et absorbe une certaine portion de l'énergie réactive nécessaire pour sa magnétisation.

### 4.3 Simulation de la MASDE alimentée par des onduleurs de tensions

En effet les deux systèmes d'enroulements logés dans la partie fixe de la machine sont alimentés par deux onduleurs triphasés commandés par la technique 'MLI' ayant comme indice de modulation 'm = 21' et 'r = 0.8' comme coefficient de réglage de tension.

#### 4.3.1 Fonctions Sinus-Triangle

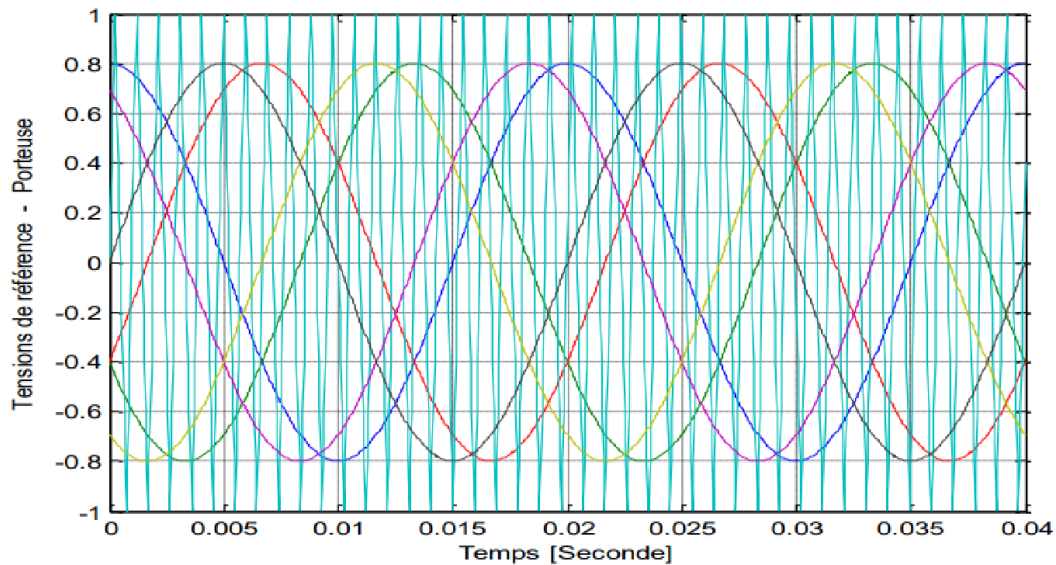


FIGURE 4.7 – Intersection tension de référence et de la porteuse.

Les points d'intersections entre la fonction sinus et la fonction triangle déterminent les instants de commutations des interrupteurs statiques.

#### 4.3.2 Tension simple issue de l'onduleur

la tension simple obtenue par l'onduleur est caractérisée par la courbe suivante.

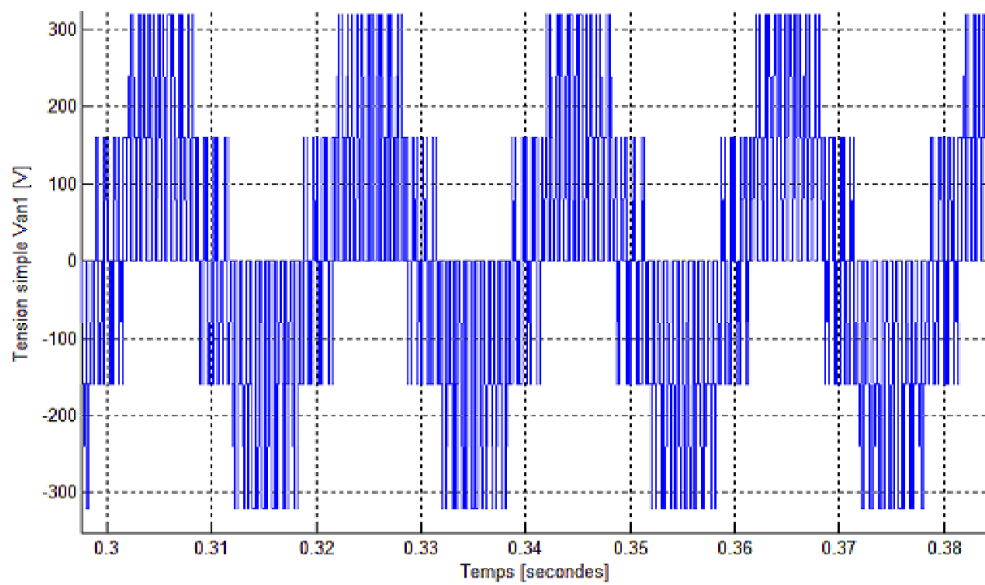


FIGURE 4.8 – Tension simple issue de l'onduleur.

Les mêmes conditions d'alimentation directement par le réseau sont appliquées pour l'alimentation par des onduleurs de tension.

### 4.3.3 Vitesse de rotation

. La vitesse de rotation a la même allure que pour l'essai effectué avec la machine alimentée directement par les sources de tension. Au démarrage, la vitesse atteint 313.8 rd/s avant la connexion de la charge où la vitesse de rotation glisse à 297 rd/s, puis reprend sa valeur à vide et enfin à  $t=3.5$ secondes la vitesse de rotation est de 328.15 rd/s.

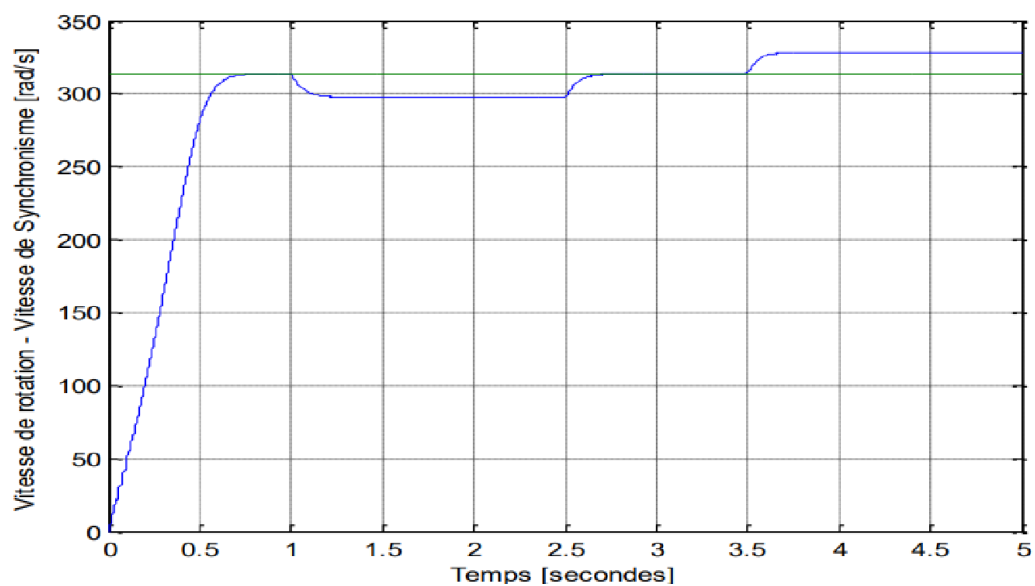


FIGURE 4.9 – Vitesse de rotation et de synchronisme.

### 4.3.4 Couple électromagnétique

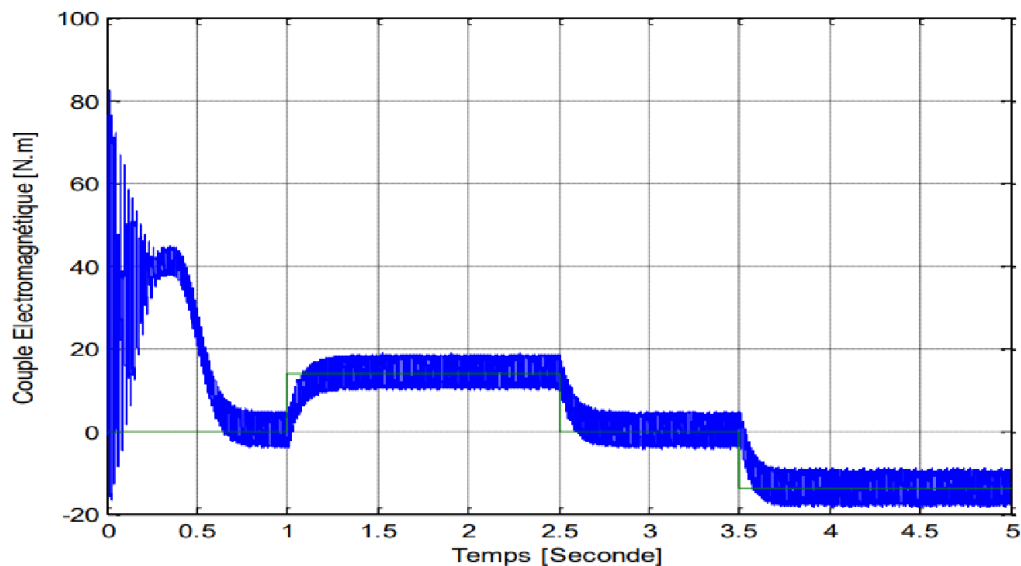


FIGURE 4.10 – Couples électromagnétique et couple résistant.

Pour une alimentation par onduleur de tension, le couple évolue exactement de la même manière que pour une alimentation par un réseau équilibré. Cependant, des ondulations du couple autour de la valeur consignée par la charge apparaissent. Des ondulations comprises entre « -4 Nm » et « 4 Nm » sont dues, essentiellement, à la présence d'harmoniques créées par les onduleurs de tension.

### 4.3.5 Flux rotorique direct et en quadrature

L'apparence du flux rotorique direct et du flux rotorique en quadrature concorde de très près avec l'allure du couple électromagnétique.

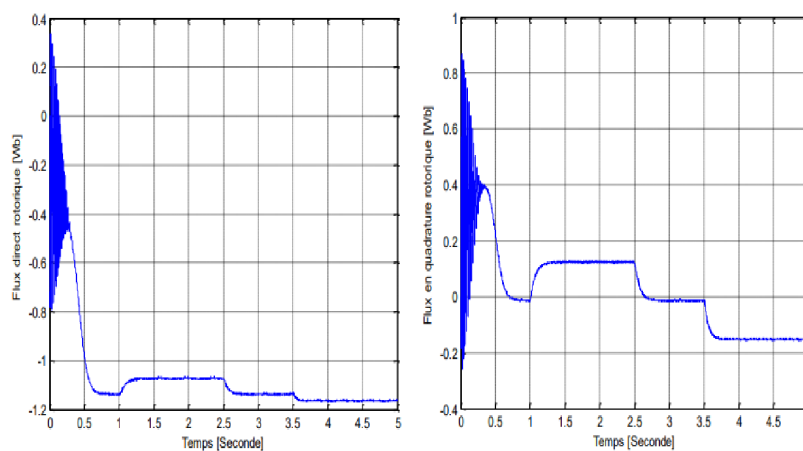


FIGURE 4.11 – Flux rotorique.

### 4.3.6 Courants direct et en quadrature

. Les courants directs et en quadrature évoluent d'une manière similaire à celle de la vitesse de rotation. Selon le mode de fonctionnement, les valeurs des deux composantes du courant rotorique varient en suivant l'allure de la vitesse.

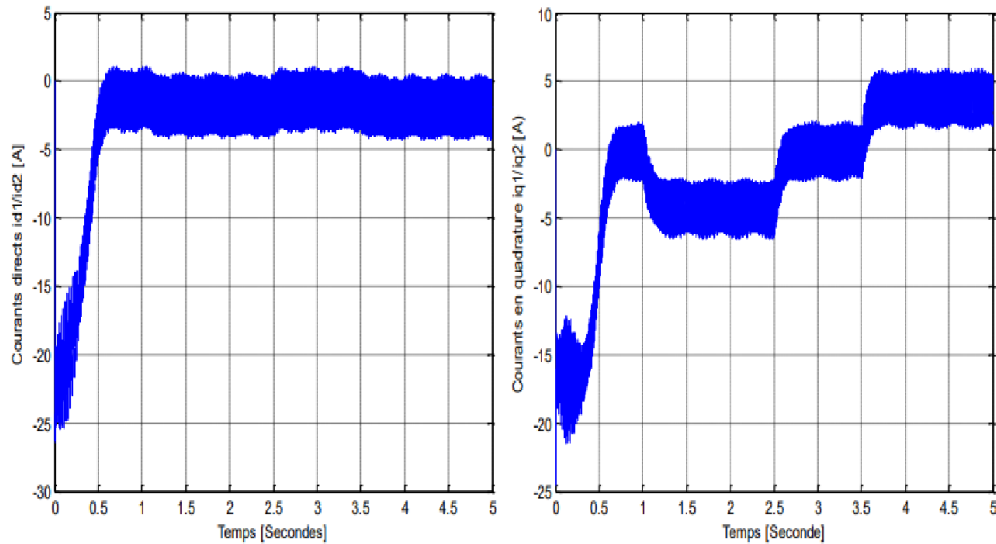


FIGURE 4.12 – Courants direct et en quadrature.

### 4.3.7 Courant statorique

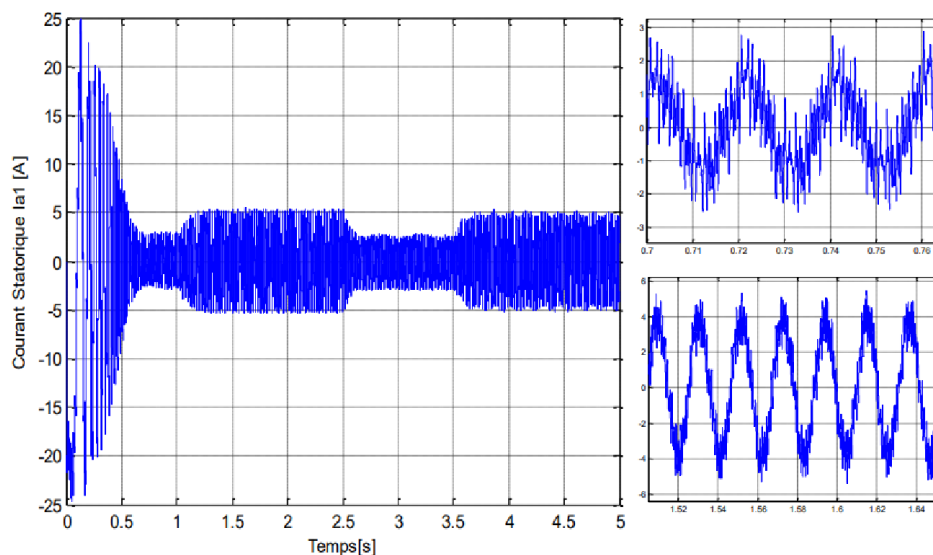


FIGURE 4.13 – Courants statorique.

Au démarrage, les courants absorbés par les deux étoiles du stator atteignent des valeurs de quatre

à cinq fois les valeurs nominales. Le régime permanent est atteint, rapidement, après une période de 0.4 seconde. A vide, la machine absorbe un courant de presque « 2 A » et en charge, le courant absorbé est de « 4 A ». Ces ondulations et cette légère augmentation des valeurs des courants sont dues essentiellement à l'alimentation de la machine par des onduleurs de tensions.

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation de la machine s'avère très importante en vue de maîtriser son comportement lors des différentes étapes de l'étude.

Par l'alimentation de la machine, directement, par le réseau électrique, le relevé des différentes grandeurs caractérisant la Masde nous renseigne, à plus d'un titre, sur son comportement lors des différents fonctionnements, soit à vide, soit en mode moteur ou bien en mode générateur.

L'obligation industrielle à utiliser des onduleurs de tension au lieu du réseau montre les avantages et les inconvénients engendrés avec ce genre d'alimentation.

Le choix s'est fait porter pour la commande de ces onduleurs sur la technique de modulation de largeurs d'impulsions sinus – triangle. Les ondulations observées sur le couple, la vitesse, les flux rotoriques et les courants de la machine fictive sont dues, essentiellement, à la présence d'harmoniques engendrés par les onduleurs



## *CONCLUSION GÉNÉRALE*

Le moteur asynchrone à double étoiles est identique au moteur asynchrone triphasé, avec la particularité de posséder une étoile supplémentaire au stator, décalée d'un angle de trente degrés par rapport à la première étoile.

L'alimentation, via des onduleurs de tensions, est une obligation dans le milieu industriel. La commande, par modulation de largeurs d'impulsions sinus-triangle, est responsable des ondulations qui surviennent sur le couple, la vitesse, les flux rotoriques et les courants du moteurs.

Le choix des machines multiphasées n'est pas fortuit et la possibilité d'un fonctionnement en mode dégradé où deux phases suffisent pour donner naissance à un couple moteur, sont autant de raisons pour opter à ce genre d'actionneurs au détriment des autres genres de machines tournantes.

Avec ses qualités de haute fiabilité, d'une segmentation de puissance, d'un pouvoir d'élimination d'harmoniques d'espace, de minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, les moteurs multiphasés surplombent tout les autres moteurs.

Néanmoins, quelques perspectives sont citées, avec l'espoir de pouvoir les réaliser à l'avenir, tels que :

- Etude des stratégies de commande de la MASDE ;
- Etude de la régulation des courants de phases de la MASDE en mode dégradé ;
- Comparer les caractéristiques du couple et de la vitesse lors d'un faible ensoleillement avec celles d'un fonctionnement avec une seule étoile, lors de l'alimentation conventionnelle.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] A .Adjati. « etude des machines asynchrones à double étoile en pompage », thèse de magister de université a. mira bejaia, systèmes èlectro-énergétique. 2012.
- [2] A .Adjati. « etude des machines asynchrones à double étoile en pompage hybride à énergies renouvelables », thèse de doctorat de université a. mira bejaia, systèmes èlectro-énergétique. 2022.
- [3] A.Guettaf. "direct field oriented control of induction motor fed by wind turbine generator under saturation effect". mediterranean journal of measurement and control, vol 7, n°1, pp 190-196,. 2011.
- [4] M.Villoz A.Labouret. Energie solaire photovoltaïque, livre 3ème édition dunod, decembre. 2007.
- [5] L .Benalia. «commande en tension des moteurs à induction double alimentés», doctorat en sciences èlectrotechnique, electricité industrielle, université de batna. 2010.
- [6] Carson D.J. Boundary layer meteorology, introduction lectures. workshop on an atmospheric area modelling, ictp. 1990.
- [7] Turbelin. G. Modélisation de la structure atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets de vent. université d'evry val d'essone, u.f.r. de sciences et technologie. 2000.
- [8] F.Notelet G.Seguir. «electrotechnique industrielle, technique et documentation»,page 484, édition lavoisier, paris. 1994.
- [9] A. Ilinca H. Ibrahim. Investigations des différentes alternatives renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites isolés, laboratoire de recherche en Énergie Éolienne lree-03-septembre 2008. 2008.
- [10] D. Hadiouche. «contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile : modélisation, alimentation et structure», thèse de doctorat de l'université henri poincaré de nancy 1, faculté des sciences et technique. 2001.
- [11] H.Amimeur. «contribution à la commande d'une masde par mode de glissement », magister en èlectrotechnique, université de batna, mai. 2008.
- [12] H.S.Rauschenbach. , « solar cell array design handbook », van nostrand-reinhold, ny, 1980. 1980.
- [13] J.M.Rodriguez J.L. Fernadez D. Beato R.Iturbe J.R. Wihelmi J.Usaola, P.Ledesma. « transient stability studies in grids with great wind power penetration. modelling issues and operation requirements », 2003 ieee pes transmission and distribution. conference and exposition, septembre 7-12, 2003, dallas (usa), cd. 2003.

- [14] J. Belhadj M. Turki and X. Roboam. "water / energy management approaches of an autonomous water desalination unit fed by a hybrid (photovoltaic-wind) system," international conference on electrical sciences and technologies in maghreb 2014; 1-8. 2014.
- [15] Nachida KASBADJI MERZOUK. Evaluation du gisement énergétique éolien, contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en algérie. université abou bekr belkaid de tlemcen. 2006.
- [16] Frédéric POITIERS. Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. thèse de doctorat de l'université de nantes. 2003.
- [17] C. Ruhl. Bp statistical review of world energy. 2007.
- [18] S.M.Ait-Cheikh. Etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques. thèse de doctorat d'état, ecole nationale polytechnique. 2007.
- [19] N.Sami S.Belkacemi S.Arezki I.Messaif Z.Oudjebour, E.M.Berkouk. « indirect space vector control of a double start induction fed by two five levels npcvs », international conference on electric machine, icem'04, poland. 2004.

## RÉSUMÉ

Dans ce travail, le premier chapitre est consacré aux généralités sur les systèmes hybrides, notamment, le photovoltaïque et l'éolienne et quelques notions sur les machines triphasées seront présentées.

Le moteur asynchrone à double étoile est identique au moteur asynchrone triphasé, avec la particularité de posséder une étoile supplémentaire au stator, décalée d'un angle de trente degrés par rapport à la première étoile. La commande, par modulation de largeurs d'impulsions sinus-triangle, est responsable des ondulations qui surviennent sur le couple, la vitesse, les flux rotoriques et les courants du moteurs. Le choix des machines multiphasées n'est pas fortuit et la possibilité d'un fonctionnement en mode dégradé où deux phases suffisent pour donner naissance à un couple moteur, sont autant de raisons pour opter à ce genre d'actionneurs au détriment des autres genres de machines tournantes. Avec ses qualités de haute fiabilité, d'une segmentation de puissance, d'un pouvoir d'élimination d'harmoniques d'espace, de minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques, les moteurs multiphasés surplombent tout les autres moteurs. .

**Mots clés :** : Système hybride - Eolien - Photovoltaïque - machine asynchrone à double étoiles - onduleur MLI - machine multiphasé .

## ABSTRACT

In this modest work, the first chapter is devoted to generalities on hybrid systems, in particular, photovoltaics and wind turbines, and a few notions on three-phase machines will be presented.

The double-star asynchronous motor is identical to the three-phase asynchronous motor, with the particularity of having an additional star in the stator, offset at an angle of thirty degrees to the first star. The control system, based on sine-triangle pulse width modulation, is responsible for ripples in torque, speed, rotor flux and motor currents. The choice of multiphase machines is not accidental, and the possibility of operating in degraded mode, where only two phases are needed to generate motor torque, are further reasons for opting for this type of actuator over other types of rotating machine. With its qualities of high reliability, power segmentation, power to eliminate space harmonics, minimization of torque ripples and rotor losses Multiphase motors outperform all other motors

Translated with DeepL.com (free version) .

**Key words :** Hybrid system - Wind - Photovoltaic - asynchronous machine with double stars - PWM inverter - multiphase machine ..