

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

**Université A.MIRA-BEJAIA**



**Faculté de Technologie**

**Département d'Electrotechnique**

**Option : Energie Renouvelable**

**Mémoire de Fin d'Etude**

**Thème**

---

**Etude d'un émulateur éolien**

---

**Préparé par :**

Azzag djamal

Bounaim Zine-eddine

**Encadré par :**

**Pr : T. Rekioua**

Mr : S. Ihammouchen

**Année Universitaire : 2020/2021**

## **REMERCIEMENTS**

Tout d'abord on remercie le bon dieu puissant de la **bonne** santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donné tout au long de notre étude. Nous remercions Très sincèrement Ms Pr  
T.RIKIOUA notre  
promoteur de ce travail, pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses sa patience et diligence, et par ses suggestions a grandement facilité ce travail. Notre profonde gratitude à Ms  
S.IHAMMOUCHEN.

Nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

A. Djamel

B. Zine-eddine

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma mère avec toute mon affection.

A mon père avec toute ma reconnaissance.

A mon chère frangine R.ABDERRAHMANE .

A mes frères et mes sœurs.

A la mémoire de notre ami AYADI houssam.

A toute ma famille.

A tous mes amis

AZZAG Djamel  
BOUNAIM Zine-eddine

## SOMMAIRE

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

### **Chapitre I. Généralités sur les systèmes éoliens**

I.1. Introduction.....	2
I.2 Histoire de l'énergie éolienne .....	2
I.3 Définition d'énergie éolienne.....	3
I.4 les composants d'une éolienne.....	3
I.5 les types existants d'une éolienne.....	4
I.5.1. Eolienne a axe horizontale.....	4
I.5.2. Eolienne a axe verticale.....	5
I.5.2.1. Les aéromoteurs Savonius.....	5
I.5.2.2. L'éolienne Darrieus.....	6
I.5.2.3. L'éolienne a voilures tournantes.....	7
I.5.3. L'éolienne offshore.....	7
I.6. Formation de vent.....	8
I.7. Puissance récupérable par une turbine (loi de BETZ).....	8
I.8. Phases de fonctionnement d'une éolienne.....	9
I.9. Topologie des éoliennes connectées au réseau électrique.....	9
I.9.1. Les éoliennes à vitesse fixe.....	9
I.9.2. Les éoliennes à vitesse variable.....	10
I.10. Conclusion.....	11

### **Chapitre II : La modélisation d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne**

II. Introduction.....	12
II.1. Généralités sur la machine asynchrone triphasée.....	12
II.1.1. Présentation de la machine asynchrone.....	12
II.1.1.1. Son principe de fonctionnement.....	12

II.1.1.2. Constitution de la machine asynchrone.....	13
II.1.1.3. Description des différents éléments.....	13
a. Le stator.....	13
b. Le rotor.....	14
b.1. Le rotor bobinée (à bagues).....	14
b.2. Le rotor a cage .....	14
II.2. Modélisation de la turbine éolienne.....	15
II.2.1. Modélisation physique de la turbine.....	15
II.2.2. Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	16
II.3. Modélisation de la machine asynchrone.....	17
II.3.1. hypothèse simplificatrice.....	17
II.3.2. Modèle généralisée triphasée de la MAS.....	17
II.3.3. Modèle électrique de la machine.....	18
II.3.4. Les équations de la machine asynchrone.....	19
a. Equation électriques.....	19
b. Equation magnétiques.....	19
c. Equation mécaniques.....	21
II.4. Transformation de PARK.....	21
II.4.1. Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK.....	22
a. Equation des tensions.....	23
b. Equation des flux.....	23
II.4.2. Choix du référentiel.....	23
II.4.2.1 référentiel fixe par rapport au stator ( $\alpha, \beta$ ).....	24
II.4.2.2. référentiel fixe par rapport au rotor ( $x, y$ ).....	24
II.4.2.3. référentiel fixe par rapport au champ tournant ( $d, q$ ).....	25
II.5. Modélisation d'un redresseur triphasée.....	25
II.6. Modélisation de l'onduleur de tension.....	26
II.7. Modélisation d'un filtre de sortie (condensateur).....	28
II.8.	
Conclusion.....	29

## Chapitre III : Identification de la MAS

III.1 Introduction.....	30
III.2. Schémas équivalent de la machine asynchrone.....	30
III.3. Détermination expérimentale des paramètres de la machine par les essais classiques.....	31
III.3.1 Détermination des paramètres électriques.....	32
III.3.1.1 Mesure des résistances statoriques.....	32
III.3.2. Essai a rotor bloqué.....	32
III.3.3. Essai à vide.....	34
III.3.4. Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques .....	35
III.3.4.1. Détermination $P_{méc}$ et $P_{fs}$ .....	35
III.3.4.2 Détermination $R_m$ , $X_m$ .....	36
III.3.5. Identification des paramètres mécaniques.....	37
III.3.5.1 essai de freinage.....	37
a. Mesure du coefficient de frottement.....	37
b. Mesure du moment d'inertie.....	38
III.3.6. Résultats des paramètres identifiés.....	39
III.3.7. Approximation de l'inductance de magnétisation ( $L_m$ ) en fonction du courant de magnétisation ( $I_m$ ).....	39
III.4 CONCLUSION.....	40

## Chapitre IV : Simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

IV.1 Introduction.....	41
IV.2 description d'un émulateur éolien	
IV.3. résultat d'un émulateur éolien.....	41
IV.4. Schéma bloc de simulation avec un modèle non linéaire.....	42
IV.5. Résultats de simulation et interprétation.....	43

IV.5.1. Allure des tensions $V_{abc}$ .....	43
IV.5.2. Allure des courants $I_{abc}$ .....	44
IV.3.3. Allure des puissances active et réactive de la génératrice (GAS).....	44
IV.5.4. Allure de tension redressée ( $V_{dc}$ ).....	45
IV.5.5. Allure de tension de sortie d'un onduleur.....	46
IV.5.6. Allure de courant de sortie d'un onduleur.....	46
IV.6.7. block de simulation de la porteuse MLI.....	47
IV.5. Conclusion.....	48
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>50</b>

# LISTES DES FIGURES

## CHAPITRE I

Figure I.1 : la première éolienne inventée par l'Américain Charles Francis Brush.....	2
Figure I.2 : la conversion d'énergie cinétique de vent.....	3
Figure I.3 : Composants modernes d'éolienne.....	4
Figure I.4 : éolienne a axe horizontale.....	5
Figure I.5 : éolienne de type Savonius.....	6
Figure I.6 : l'éolienne verticale de type Darrieus.....	6
Figure I.8 : éolienne maritime.....	7
Figure I.9 : zones de fonctionnement d'une éolienne.....	9
Figure I.10 : système éolienne basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.....	10
Figure I.11 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable.....	11

## CHAPITRE II

Figure II.1 : principe de moteur asynchrone triphasé.....	12
Figure II.2 : coupe de la machine asynchrone.....	13
Figure II.3 : rotor a cage d'écureuil.....	14
Figure II.4 : Modélisation physique de la turbine éolienne.....	15
Figure II.5 : Coefficient de puissance pour différents angles de calages.....	16
Figure II.6 : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.....	18



Figure II.7 : schéma électrique de la MAS .....	18
Figure II.8 : Système d'axes déphasés (d, q).....	22
Figure II.9 : Représentation des axes biphasés ( $\alpha$ , $\beta$ ), (x, y) et (d, q).....	24
Figure II.10 : Redresseur triphasé à diodes double alternance.....	25
Figure II.11: Tension simple de phase et tension de sortie de redresseur.....	26
Figure II.12 : Schéma de l'onduleur triphasé.....	27
Figure II.13 : Filtre de sortie.....	28

### **CHAPITRE III**

Figure III.1 : Schéma équivalent de MAS.....	30
Figure III.2 : Photo du banc d'essais de laboratoire.....	31
Figure III.3 : mesure de la résistance.....	32
Figure III.4 : montage de mesure.....	33
Figure III.5 : schéma équivalent d'essai bloqué.....	33
Figure III.6 : schéma équivalent d'un essai à vide.....	35
Figure III.7 : Caractéristique de la somme des pertes fer et mécaniques en fonction de $V_0^2$ .....	36
Figure III.8 : courbe de freinage de la MAS.....	37

### **CHAPITRE IV**

Figure IV.1 : Photo du banc d'essais d'un émulateur éolien.....	41
Figure IV.2 : La tension de sortie de l'émulateur éolien.....	42
Figure IV.3 : Schéma bloc de simulation avec un modèle non linéaire.....	42
Figure IV.4 : la vitesse de rotation.....	43

Figure IV.5 : allure des tensions $V_{abc}$ développée par la génératrice.....	43
Figure IV.6 : allure des courants développés par la génératrice.....	44
Figure IV.7 : La puissance active de la génératrice (GAS).....	44
Figure IV.8 : La puissance réactive de la GAS.....	45
Figure IV.9 : tension redresser $V_{dc}$ .....	45
Figure IV.10 : allure de tension de sortie d'un onduleur.....	46
Figure IV.11 : courant de sortie d'un onduleur.....	47
Figure IV.12 : block de simulation de la porteuse MLI.....	47
Figure IV.13 : la tension de porteuse.....	47

## **LISTE DES TABLEAUX**

### **CHAPITRE III**

Tableau III.1 : tableau de mesure $R_s$ .....	32
Tableau III.2 : Résultat de l'essai a rotor bloqué.....	33
Tableau III.3 : Résultat de l'essai à vide.....	35
Tableau III.4 : Résultats de l'identification des paramètres de la MAS.....	39

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18e siècle, puis du pétrole au milieu du 20e siècle. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. [1]

L'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place parmi les énergies renouvelables, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire aux autres sources telles l'énergie nucléaire, l'hydroélectricité, l'énergie thermique, etc. En plus, elle n'émet pas de gaz à effet de serre. [2]

La multiplication des éoliennes dans le monde a conduit les recherches de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et à optimiser la qualité d'énergie produite. Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient des machines asynchrones. [3]. En effet, ces machines présentent plusieurs avantages tels que leur moindre coût, leur robustesse et leur entretien réduit.

Dans le cadre de nos travaux, nous avons donc choisi de contribuer à l'émulation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à cage d'écureuil liée directement à un convertisseur AC/DC puis vers un convertisseur DC/AC afin de connecter au réseau.

Le premier chapitre sera consacré à l'étude des généralités sur les énergies renouvelables plus précisément sur les systèmes d'énergie éolienne. On commence d'abord par la définition de cette énergie, puis on va vers la description de l'énergie éolienne ainsi que la constitution d'une éolienne, puis on a cité les différents types existants.

Le deuxième chapitre, nous allons présenter la modélisation de l'ensemble d'une chaîne éolienne : Le modèle mathématique de la turbine éolienne, la modélisation de la génératrice asynchrone (les équations électriques, magnétiques et dynamiques) le modèle adopté est basé sur la transformation de Park. Ensuite on a cité la modélisation des convertisseurs statiques (redresseur et onduleur) est détaillée.

Dans le troisième chapitre, nous traitons l'identification des paramètres électriques de la machine asynchrone saine. L'identification a pour but de fournir les paramètres électriques et mécaniques d'un modèle standard.

Le dernier chapitre, il s'agit de l'évaluer sous MATLAB/SIMULINK et de mettre en valeur le fonctionnement de la machine asynchrone à cage en mode générateur ; ainsi que le modèle de la turbine éolienne, et nous présentons aussi la structure globale du système de l'éolienne utilisé dans cette étude, et enfin l'interprétation des résultats de simulation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne. On a dédié les résultats de tests pratiques d'un émulateur éolien au laboratoire.



## I.1 Introduction

L'énergie éolienne est utilisée depuis très longtemps déjà, elle a remplacé les rames pour faire avancer les navires. Elle a été utilisée pour actionner les meules des moulins pour moudre du grain, elle permet encore le pompage d'eau dans les champs; à cette époque l'énergie cinétique du vent était uniquement transformé en énergie mécanique. [2]

L'énergie éolienne étant une énergie renouvelable qui produit une énergie propre est devenue un moyen très important dans la production de l'énergie électrique. [2]

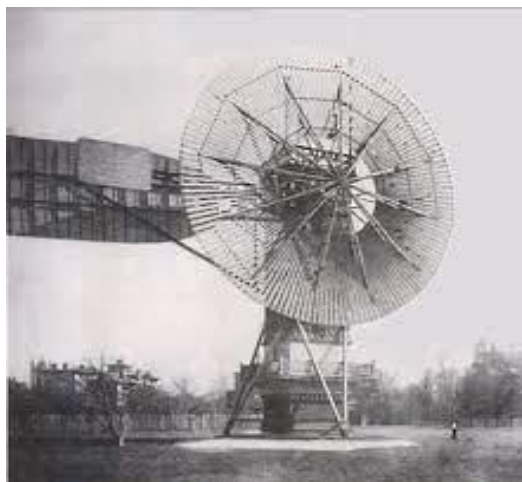
Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs éléments constitutives et leurs principes de fonctionnement ainsi que les puissances produites par la turbine

## I.2 Histoire de l'énergie éolienne

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable.[6]

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Poule La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité.

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle .[1]



**Figure I.1** : la première éolienne inventée par l'Américain Charles Francis Brush

### I.3 Définition d'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe.

L'énergie éolienne est une source d'énergie intermittente qui n'est pas produite à la demande, mais selon les conditions météorologiques ; elle nécessite donc des installations de production ou de stockage en remplacement pendant ses périodes d'indisponibilité. Celles-ci peuvent être prévues avec une assez bonne précision. La part de l'éolien dans la production mondiale d'électricité atteignait 4,8 % en 2018 et elle est estimée à 5,3 % en 2019. Les principaux pays producteurs sont la Chine (28,4 % du total mondial en 2019), les États-Unis (21,2 %) et l'Allemagne (8,8 %). [4]

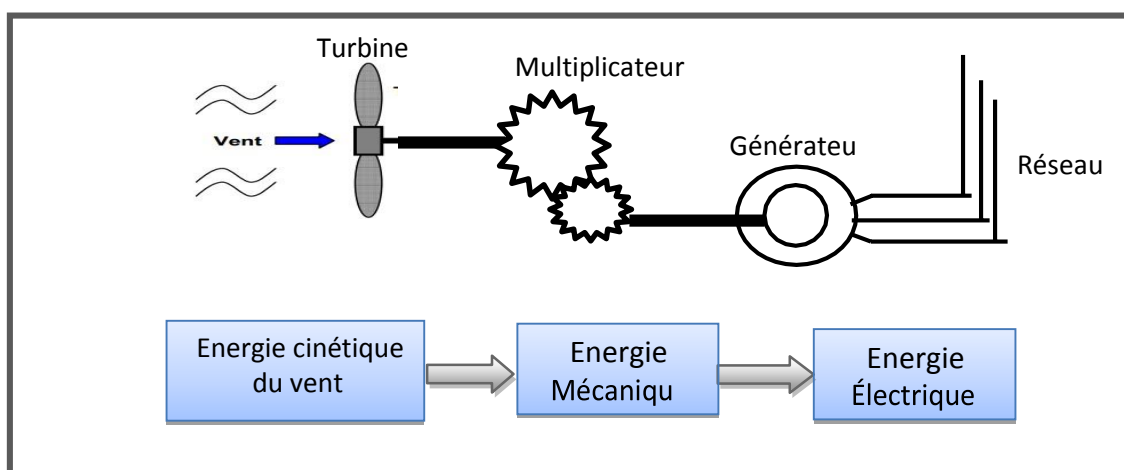


Figure I.2 : la conversion d'énergie cinétique de vent

### I.4 Les composants d'une éolienne

Les principaux composants d'une éolienne sont le rotor, le système de train de transmission, génératrice, système d'orientation des pales et de la nacelle, la tour et la fondation, et les systèmes de contrôle (figure I.3). Le rotor est constitué d'un moyeu et des pales de l'éolienne. Le train d'entraînement se compose d'un axe à vitesse réduite, d'une boîte de vitesses, et de l'axe à grande vitesse du côté de générateur. Le train d'entraînement inclut également des roulements de soutien, des accouplements, et des freins mécaniques. Dans certains cas, le générateur est relié directement au rotor, donc la boîte de vitesse n'est pas utilisée. La nacelle est la couverture qui protège le train et le générateur d'entraînement contre les conditions météorologiques sévères. Le système de lacet (Écart système) garde l'arbre de rotor dans l'alignement du vent. Ce dernier est commandé par un système de contrôle automatique comprenant un capteur qui détecte la direction du vent, il utilise des moteurs électriques pour faire pivoter la nacelle afin qu'elle soit face au vent. [5]

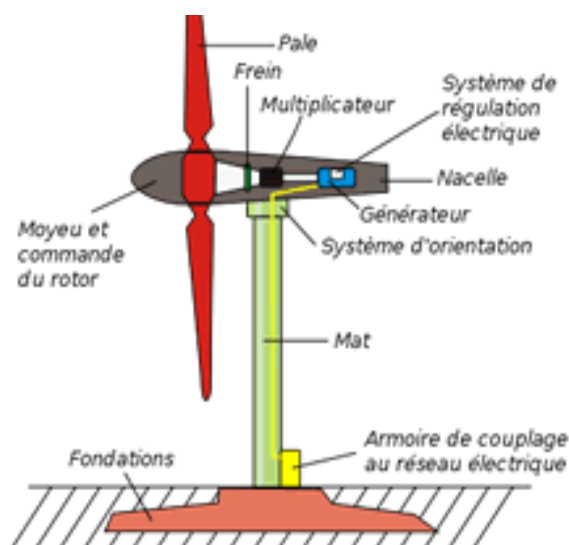


Figure I.3 : Composants modernes d'éolienne

## I.5 Les types existants d'une éolienne

Depuis le début de la technologie de l'énergie éolienne, des machines de plusieurs types et les formes ont été conçues et développées autour de différentes parties du monde. Certains d'entre eux sont des conceptions innovantes qui ne sont pas commercialement acceptées. Bien qu'il y ait plusieurs façons de catégoriser les éoliennes, elles sont généralement classées en machines à axe horizontal et machines à axe vertical, en fonction de leur axe de rotation. [5]

### I.5.1 Eolienne à axe horizontale

L'éolienne horizontale pour particulier possède un axe de rotation placé horizontalement par rapport au sol. Dans la majorité des cas, elle fonctionne avec une hélice qui est composée de 2 ou 3 pales (les éoliennes à axe horizontal à 3 pales sont de loin les plus répandues). Toutes les éoliennes commerciales sont construites sur ce modèle.

Le rendement élevé des éoliennes pour particulier horizontales est dû à un équipement fonctionnel qui leur permet de s'orienter selon la direction du vent et de capter ainsi toute son énergie.





**Figure I.4** : éolienne a axe horizontale

Avantages et inconvénients :

L'éolienne à axe horizontal pour particulier a plusieurs avantages. Tout d'abord, son rendement est excellent. Elle capte au mieux l'énergie du vent et s'oriente seule vers la direction du vent. Son rendement moyen est compris entre 10kW et 20 kW, selon le modèle.

Moins résistante aux vents forts que l'éolienne verticale, l'éolienne horizontale doit être renforcée. Ainsi, dans les régions où le risque de vents violents existe, on a recours à des mâts haubanés (l'ancrage est renforcé), et on installe un frein au niveau du rotor. [6]

### **I.5.2 Eolienne à axe verticale**

Il existe trois grands types d'éoliennes verticales :

L'éolienne Darrieus.

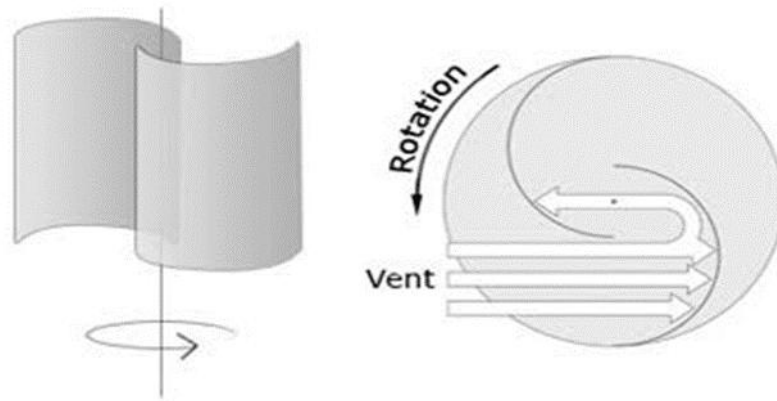
L'éolienne verticale Savonius.

L'éolienne à voilures tournantes.

#### **I.5.2.1 Les aéromoteurs Savonius**

L'éolienne verticale Savonius porte le nom de son inventeur, Sigurd Savonius, qui l'a mise au point dans les années 1920, avant de déposer son brevet en 1929. Montée elle aussi sur une tige verticale, elle se compose de cylindres qui sont volontairement désaxés l'un par rapport à l'autre. [6]

Pour actionner les pales, ou cylindres, de cette éolienne verticale, il est nécessaire que le vent s'engouffre dans l'un des demi-cylindres. Ainsi entraînées, les pales tournent selon la force du vent qui les pousse l'une après l'autre.



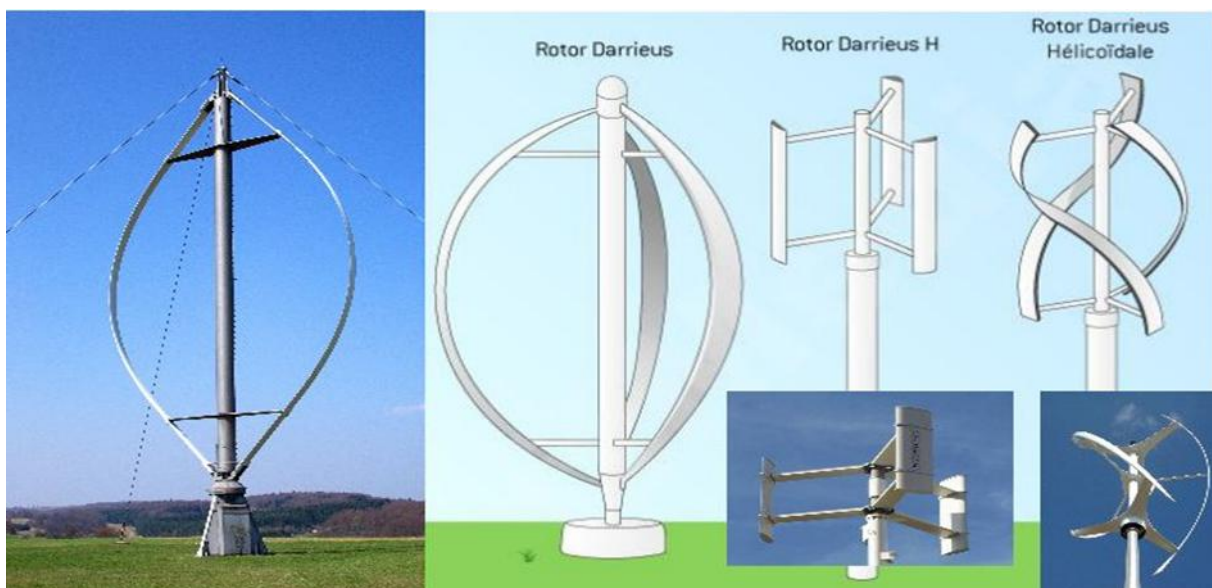
**Figure I.5** : éolienne de type Savonius

Bien que possédant un faible rendement par rapport aux éoliennes "classiques" à pâle, l'éolienne Savonius a l'avantage de fonctionner avec toutes les directions de vent. Ce type d'éolienne peut s'avérer utile pour capter des vents puissants (haute montagne, front de mer...).

### I.5.2.2 L'éolienne Darrieus

L'éolienne Darrieus est une turbine à axe vertical servant à la production d'électricité à partir de la force du vent. Elle tient son nom de l'ingénieur français Georges Jean Marie Darrieus qui déposa le brevet de cette invention aux États-Unis d'Amérique le 1 octobre 1926 et l'obtint le 8 décembre 1931. [6]

L'intérêt de l'éolienne verticale de type Darrieus est qu'elle est adaptée aux conditions météorologiques les plus extrêmes, dont les rafales dépassant les 220 km / heure. Néanmoins, son principal inconvénient, de par son poids important, est d'avoir un démarrage plus difficile en cas de vents faibles. Ces avantages : de pouvoir capter le vent d'où qu'il vienne, générateur électrique se place à la base du dispositif éolien, sur le sol. [6]



**Figure I.6** : l'éolienne verticale de type Darrieus

### I.5.2.3 L'éolienne à voilures tournantes

Les éoliennes à voile tournant (ou anémone) sont caractérisées par l'optimisation dynamique du calage des pales en temps réel, celles-ci se comportent de la même manière que la voile d'un voilier qui ferait un cercle dans l'eau avec un vent déterminé.

Les pales reproduisent ainsi fidèlement toutes les allures d'un voilier suivant leur cap tangentiel (angle) par rapport à la direction du vent. Il en résulte que la poussée tangentielle sur les bras du rotor supportant les pales est toujours optimisée. Cette technique de captation de l'énergie éolienne est très ancienne (Iran, Crète,...). [6]

### I.5.3 Eolienne offshore

Une éolienne implantée en « offshore » (littéralement, au large) est une éolienne installée en mer, à plus de 10 km des côtes. Elle est raccordée au réseau par un câble sous-marin.

L'avantage en mer est que permettent de produire jusqu'à 60 % d'énergie en plus que pour des éoliennes terrestres.

Les éoliennes du type « offshore » sont généralement très hautes. Elles peuvent avoir un diamètre de plus de 150 m et s'élever au-dessus de la mer jusqu'à 176 mètres en bout de pale.

Leurs pales sont aussi plus larges car, plus la surface brassée d'air est importante, plus la puissance de l'éolienne est grande.

Une éolienne ne commence à produire de l'énergie que lorsque la vitesse du vent est supérieure à 10 km à l'heure. Eolienne offshore dont la puissance peut aller jusqu'à 6 MW qui peut alimenter une ville de 5000 habitants



**Figure I.8** : éolienne maritime

## I.6 Formation de vent

Le vent vient du soleil, la variation de la température entre l'équateur et les pôles nord et sud conduit à la naissance des courants thermiques (vent), qui sont répartis à travers le monde, donc l'atmosphère est une machine thermique (machine pour la production du vent). La masse d'air circule entre les zones de basses et hautes pressions. Jusqu'à présent, on peut exploiter les vents jusqu'à 211 mètres au-dessus du niveau du sol par des éoliennes. La plus longue éolienne était créée en 2017, sa hauteur est de 230 mètres. [5]

Les éoliennes peuvent produire de l'électricité à des vitesses de vent allant de 3 m / s à 30 m / s. Il y'a des turbines à air conçues spécialement pour fonctionner à des vitesses de vent inférieures ou supérieures à ces vitesses. Les éoliennes ne peuvent pas être utilisées dans les zones d'ouragan, où les tornades et les orages génèrent des vents inutiles très puissants qui peuvent causer de graves dommages pour les turbines éoliennes. [5]

## I.7 Puissance récupérable par une turbine (loi de BETZ)

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air,  $m$ , qui se déplace avec la vitesse  $v$ , l'énergie cinétique de cette masse est

$$E_C = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{I.1})$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface  $S$ , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors :

$$P_V = \frac{1}{2}\rho SV^3 \quad (\text{I.2})$$

Ou :

$\rho$  : la masse volumique de l'air

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance  $P_e$  inférieure à la puissance incidente  $P_v$ , à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur. On définit alors, le coefficient de puissance de l'aéromoteur par la relation :

$$C_p = \frac{P_e}{P_v} \quad (\text{I.3})$$

Ce coefficient caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter de l'énergie éolienne. La puissance correspondante est donc donnée par :

$$P_e = \frac{1}{2} \rho C_p SV^3 \quad (\text{I.4})$$

a valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée la limite de Betz (théorie de Betz années 1920) du coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.59$$

## I.8 Phases de fonctionnement d'une éolienne

Les zones de fonctionnement d'une éolienne sont définies en fonction de la vitesse du vent, les caractéristiques des zones de fonctionnement d'une éolienne sont représentées dans la figure suivante:

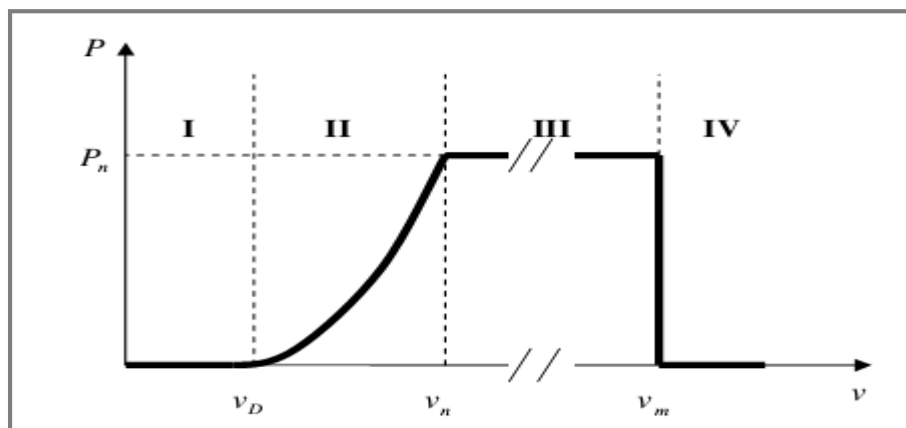


Figure I.9 : zones de fonctionnement d'une éolienne [7]

**Zone I** :  $v < v_D$ : La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

**Zone II** :  $v_D < v < v_n$ : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

**Zone III** :  $v_n < v < v_m$ : La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine ( $P_n$ ). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge

$v_D$ : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine

$v_n$ : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice

$v_m$ : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales

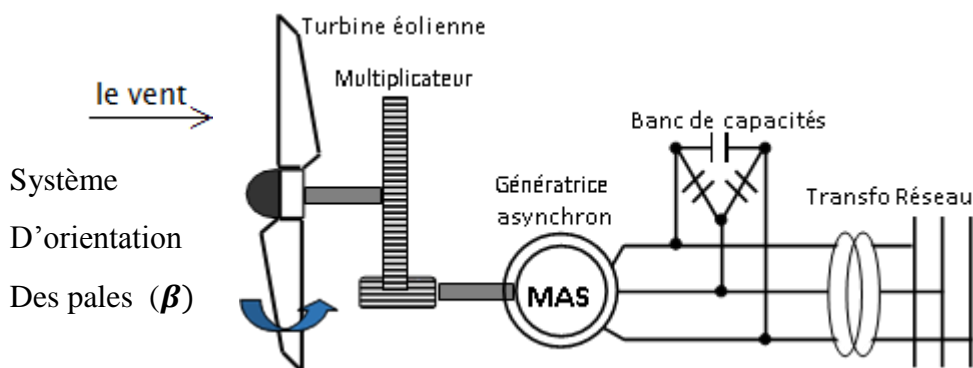
## I.9 Topologies des éoliennes connectées au réseau électrique

### I.9.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écuriel directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante. [18]

Outre la simplicité de la connexion, cette solution bénéficie des avantages de la machine asynchrone à cage qui est robuste et a l'avantage d'être standardisée et fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle de puissances.

Toutefois, la MAS à cage d'écureuil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau, des bancs de capacités lui sont adjointes comme représenté sur ( la figure I.10)



**Figure I.10** : système éolienne basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe

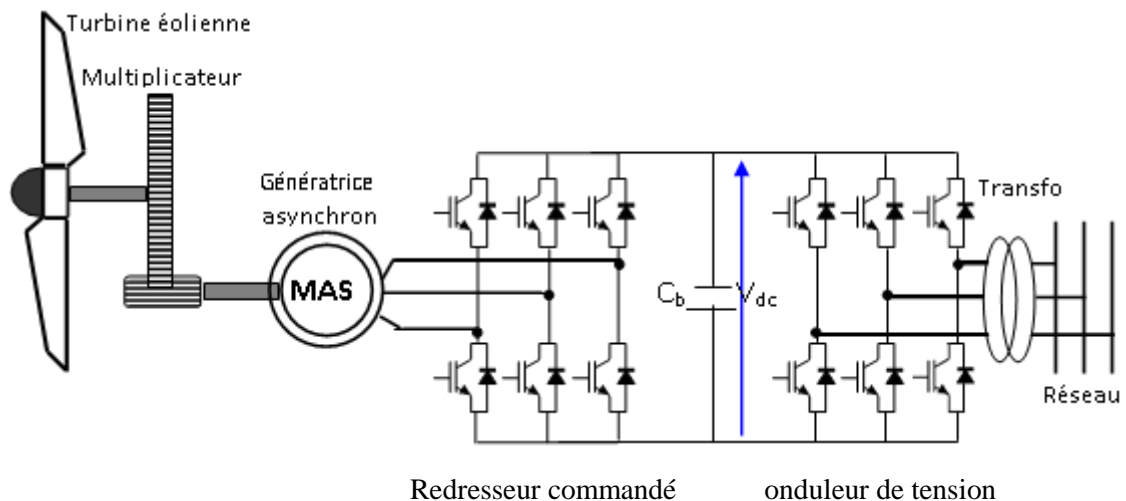
### I.9.2 Les éoliennes à vitesse variable

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. [9]

Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

L'utilisation de convertisseurs de puissance «complexes» de meure son principal inconvénient. Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement des génératrices asynchrones à cage, les aérogénérateurs à vitesse variable peuvent mettre en œuvre d'autres convertisseurs électromécaniques [9]

La machine asynchrone à cage peut être utilisée en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence comme il est montré sur la (figure I.11)



**Figure I.11** : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable

## I.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les notions fondamentales d'une éolienne. En premier lieu, nous avons donné des généralités sur l'éolienne suivie d'un bref aperçu sur la situation actuelle de cette dernière

Ensuite, nous avons décrit les différents types d'aérogénérateurs à savoir les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal. L'aspect aérodynamique de la conversion de l'énergie éolienne est aussi détaillé dans ce chapitre en se basant sur la limite de BETZ et la production d'énergie mécanique

Le contrôle électrique au niveau de la génératrice et transmission au réseau nous offre deux structures essentielles (entraînement à vitesse fixe et variable). Compte tenu des deux principaux modes de fonctionnement d'une éolienne, à savoir: génération d'énergie électrique de façon autonome sur des charges isolées ou raccordement sur un réseau déjà existant, il nous a paru intéressant de pouvoir étudier chaque mode de fonctionnement. Aussi, nous avons exposé l'état de l'art des différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens à vitesse variable.

# CHAPITRE II

## LA MODELISATION D'UNE CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE



### II. Introduction

Tout système physique peut être considéré comme un ensemble de sous-systèmes. Ainsi, pour simplifier l'étude de l'ensemble, chacune de ses parties est abordée séparément. Puis, une synthèse de toutes ces parties constituant le système global est à déduire. [10]

Dans ce chapitre, le concept de la chaîne de conversion éolienne à base de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est proposé. Un modèle mathématique de simulation de l'ensemble, en prenant en considération son caractère multi-physique (prise en charge des phénomènes mécaniques, magnétiques, électriques) est réalisé.

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne, basée sur les modèles du profil du vent, du comportement aérodynamique des pales, de l'aérogénérateur et des convertisseurs statiques du système de commande, est détaillée dans ce chapitre.

#### II.1. Généralités sur la machine asynchrone triphasée

Une machine asynchrone est une machine à courant alternatif dont la vitesse de rotor est la vitesse du champ magnétique tournante ne sont pas identiques. Le rotor est toujours en retard par rapport à la vitesse du champ statorique, c'est qu'appel le glissement.

La machine asynchrone est dite machine à induction car l'énergie transférée du stator au rotor, ou inversement se fait par induction électromagnétique. [10]

##### II.1.1. Présentation de la machine asynchrone

###### II.1.1.1. Son Principe de fonctionnement

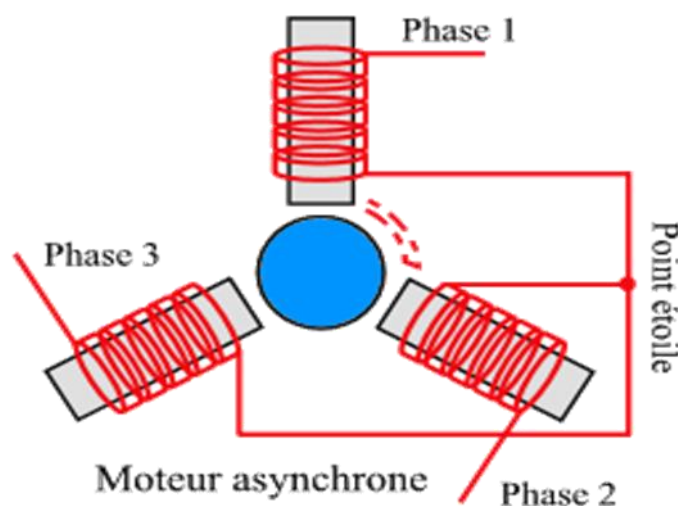


Figure II.1 : principe de moteur asynchrone triphasé

Les courants statoriques de pulsation créent un champ tournant à la vitesse dite de synchronisme  $N_s$  et qui a la même fréquence que le courant statorique. Ce champ traverse le bobinage rotorique et y induit des forces électromotrices "f.e.m".

Ces f.e.m produisent des courants car le bobinage du rotor est en court-circuit. L'action des courants sur le champ tournant qui le sa induits (d'après la loi de Lentz les courants induits

## Chapitre II : Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

s'opposent à la cause qui leurs à donne la naissance) crée le couple. Ce moteur est souvent appelé machine à induction. [11]

Si le rotor tourne à la vitesse de synchronisme  $N_s$ , soit aussi rapidement que le champ tournant, le champ à travers chaque bobine rotorique est constant. Les f.e.m induites n'existent plus au rotor donc plus de courant ni de couple.

Il faut donc que  $N_r$  vitesse de rotation du rotor diffère de  $N_s$  vitesse de synchronisme pour qu'il y ait un couple d'où le nom de machine asynchrone.

Le fonctionnement de moteur est caractérisé par l'écart relatif entre ces deux vitesses, il s'agit de glissement est définit par :  $g = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$

### II.1.1.2 Constitution de la machine asynchrone

Quels que soient les constructeurs de machines tournantes, nous constatons une très grande stabilité des techniques de constructions:

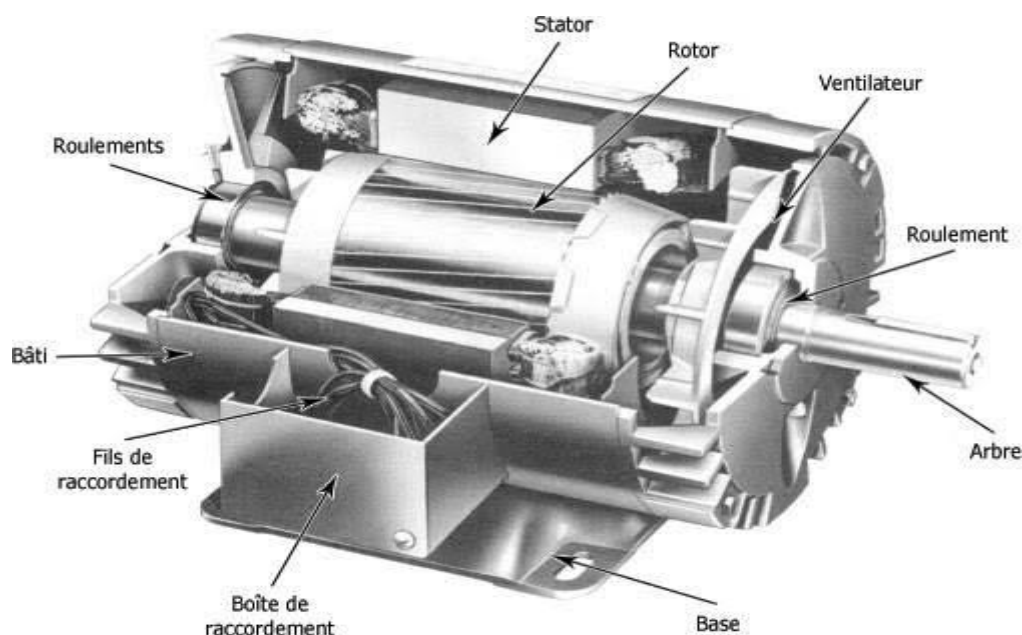


Figure II.2 : coupe de la machine asynchrone

### II.1.1.3 Description des différents éléments

Le moteur asynchrone comprend deux parties principales :

- Le stator (partie fixe).
- Le rotor (partie mobile).

a. Le stator :

- Fonction : Le rôle du stator est de créer un champ tournant et de canaliser le flux magnétique.
- Constitution : Il est constitué d'une carcasse comprenant les trois enroulements identiques répartis sur un circuit magnétique feuilleté ; ces enroulements sont constitués de

## Chapitre II : Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

conducteurs logés dans les encoches du circuit magnétiques. Ils sont alimentés par le réseau via la plaque à borne [12]

b. Le rotor :

- Fonction : Le rôle du rotor est de canaliser le flux venant du stator et de créer le champ tournant rotorique.

- Constitution : Le rotor possède comme pour le stator un ensemble de tôles ferromagnétiques isolées entre elles pour former le circuit magnétique, Le feuilletage par tôles Fe +Si permet de diminuer les pertes par courant de Foucault et les pertes par hystérésis.(18)

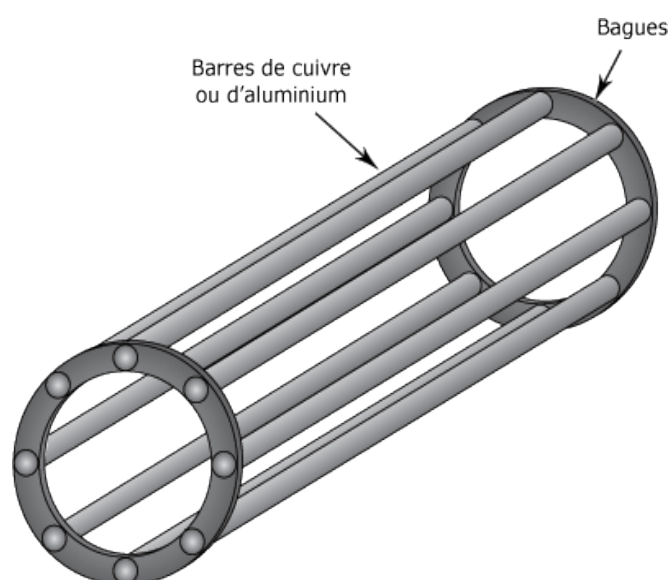
Pour la partie électrique on rencontre deux types de rotor :

b.1 Le rotor bobiné (à bagues) :

Il porte un système d'enroulements triphasés, raccordés en étoile trois bagues sur les quelles frotte trois balais accessibles par la plaque bornes et mis en court-circuit pendant les régimes de fonctionnements normaux. Ce mode d'exécution permet l'accès direct aux grandeurs électriques rotoriques, et éventuellement la modification de certaines caractéristiques, spécialement couple-vitesse, par insertion d'un rhéostat extérieur ou par adjonction d'un convertisseur statique [13]

b.2 Le rotor à cage :

il est formé d'un certain nombre de barres conductrices, une par encoche, reliées entre elles à chaque extrémité du rotor par des anneaux. On distingue trois types des rotors à cage : cage d'écureuil simple, encoches profondes et à double cage d'écureuil. [13]



**Figure II.3** : rotor a cage d'écureuil

## II.2 Modélisation de la turbine éolienne

### II.2.1 Modélisation physique de la Turbine Eolienne

L'éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Toutefois, et c'est un point important, le modèle en question doit décrire la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non pas uniquement le comportement quasi-statique. Une voilure éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique. [14]

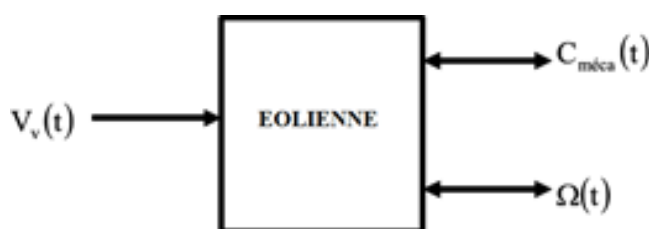


Figure II.4 : Modélisation physique de la turbine éolienne

La puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_v} \cdot P_v = C_p(\lambda) \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (\text{II.1})$$

La puissance extraite par une éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S V_v^3 \quad (\text{II.2})$$

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R}{v} \quad (\text{II.3})$$

D'où l'expression du couple

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$C_p$  : Coefficient de puissance qui est fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$

$\lambda$  : Vitesse spécifique, qui représente le rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et de la vitesse du vent =  $\Omega \cdot w.p$  :

$\rho$  : La densité du vent en [Kg/m<sup>3</sup>].

$S$  : La surface balayé par les pales de l'éolienne [m<sup>2</sup>].

$\Omega$  : La vitesse mécanique angulaire du rotor de la turbine éolienne [rad/s].

$V_v$  : Vitesse du vent [m/s].

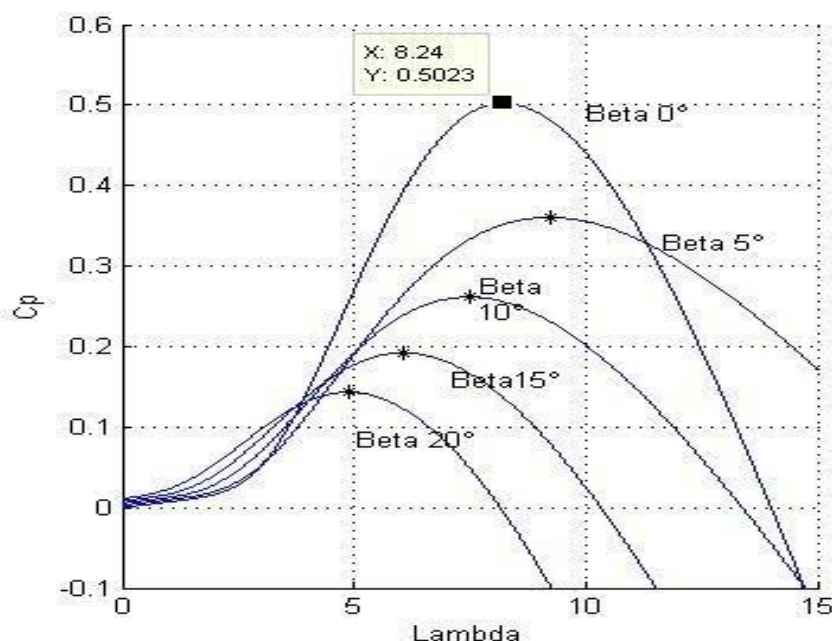
$R$  : Rayon d'une pale de la turbine [m]

$T_t$  : Couple de la turbine éolienne

Le coefficient de puissance représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure représente la variation de ce coefficient en fonction de la ration de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$

Le choix s'est porté sur l'expression ci-dessous :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 - 0.0167(\beta - 2) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda+0.1)}{14.8-0.3(\beta-2)}\right) - 0.00184 (\lambda - 3)(\beta - 2)$$



**Figure II.5 :** Coefficient de puissance pour différents angles de calages [8]

### II.2.2. Equation dynamique de l'arbre de transmission

L'équation fondamentale du moment du couple dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

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

$J$  : est l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II.6)$$

-  $C_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice

-  $C_g$  : Le couple issu du multiplicateur

-  $C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements

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

-  $f$  : le coefficient de frottement total du couplage mécanique

### II.3 Modélisation de la machine asynchrone

L'étude de la MAS traduit les lois de l'électromagnétisme dans un contexte habituel d'hypothèses simplificatrices qui tout en permettant de simplifier notablement les calculs, constitue une approche acceptable dans la plupart des fonctionnements normaux des machines asynchrones.

Le modèle de Park permet d'apporter certaines simplifications. Un choix judicieux du repère de Park permet d'obtenir un modèle de la machine asynchrone.

#### II.3.1 Hypothèse simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont :

Les circuits magnétiques sont symétriques.

- La répartition de l'induction dans l'entrefer est sinusoïdale.
- L'entrefer est constant.
- On néglige les phénomènes de saturation, ce qui permet de considérer le flux magnétique comme fonction linéaire des courants .
- L'effet de l'encochage est négligeable.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte.

Ainsi, parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité du flux.
- La constance des inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique entre leurs axes magnétiques.

#### II.3.2 Modèle généralisé triphasé de la MAS

Le modèle de la machine asynchrone triphasé est illustré par le schéma de la (Figure II.6) avec les armatures statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé, sont trois enroulements du stator : A, B et C, et pour les trois enroulements rotoriques : a, b et c.

Et  $\theta$  : Angle entre l'axe de la phase statorique (A) et la phase rotorique (a).

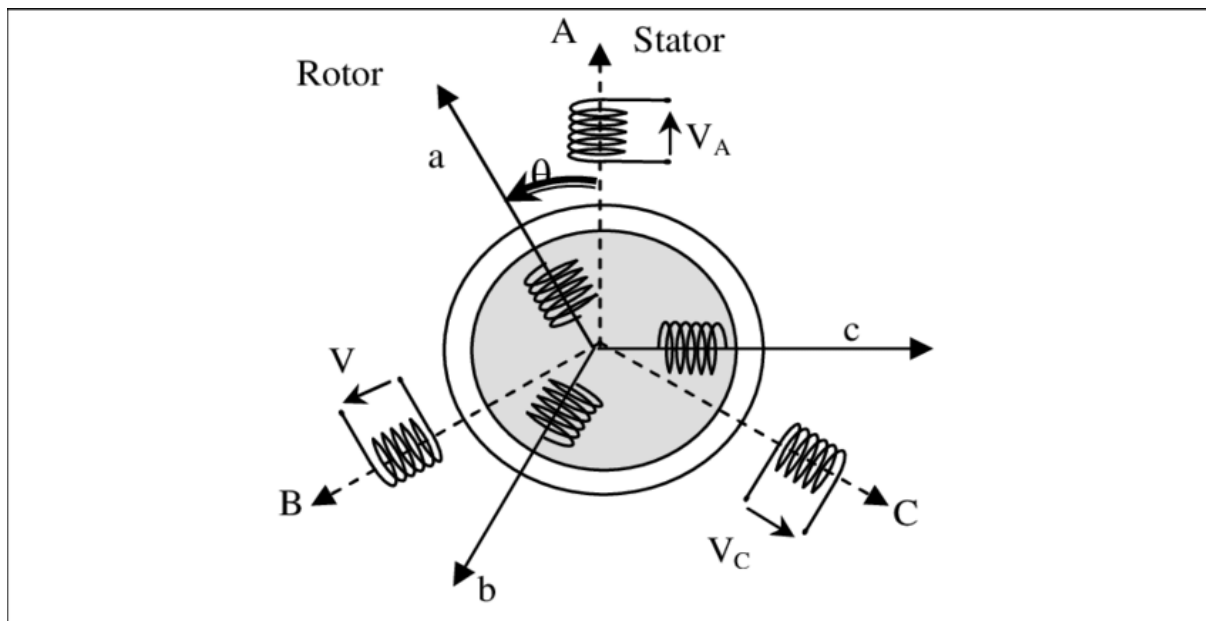


Figure II.6 : Représentation schématique d'une machine asynchrone triphasée.

Au niveau de la méthode de modélisation mathématique, notre machine est à une paire de pôles, le passage à plusieurs paires de pôles s'effectuant de manière simple en divisant alors les angles par ce nombre de paires de pôles, on parle alors d'angle électrique.

Le stator sera composé de 3 bobines identiques (As, Bs et Cs) régulièrement déphasées de  $\frac{2\pi}{3}$  radians électriques. Le rotor sera considéré comme équivalent à 3 bobines identiques (ar, br et cr) court-circuitées sur elles-mêmes également régulièrement déphasées de  $\frac{2\pi}{3}$  radians électriques.

### II.3.3 Modèle électrique de la machine

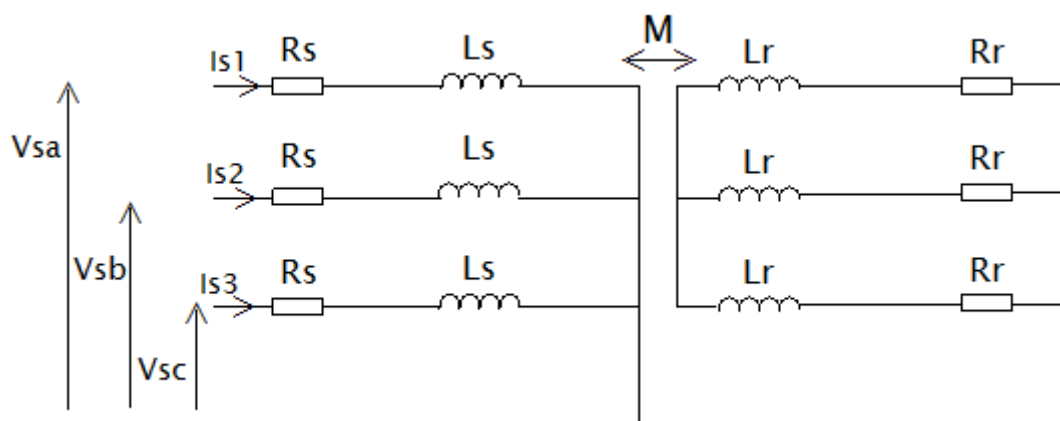


Figure II.7 : schéma électrique de la MAS

### II.3.4 Les équations de la machine asynchrone

#### a. Equation électriques :

$$\begin{cases} V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa} \\ V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb} \\ V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

En désignant par:

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}$  : Flux totaux à travers ces enroulements.

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : Tensions rotoriques

$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$  : Courants rotoriques

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$  : Flux rotoriques

$R_s$ : Résistance d'une phase statorique.

$R_r$ : Résistance d'une phase rotorique

Les équations (I-2) et (I-3) peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante:

Pour le stator:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$[V_{s(abc)}] = [R_s][i_{s(abc)}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{s(abc)}] \quad (\text{II.10})$$

**Pour le rotor**

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$[V_{r(abc)}] = [R_r][i_{r(abc)}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{r(abc)}] \quad (\text{II.12})$$

#### b. Equation magnétiques:

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matricielle comme suit :



**Pour le stator :**

$$\begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

**Pour le rotor :**

$$\begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Tel que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (\text{II.15})$$

On désigne par:

$[L_s]$ : Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$  : Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$ : Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$ : Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

**Où:**

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M_o \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$L_s$  : Inductance propre d'une phase statorique.:

$L_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$ : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$M_r$ : Inductance mutuelle entre phases rotoriques. :

$\theta$  : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisi comme axes des références.

## Chapitre II : Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

M : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase  
Correspondent du rotor

### c. Equations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire du variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse).

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p[I_s]^t \frac{d}{d\theta} [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II.19})$$

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \omega \quad (\text{II.20})$$

Tel que

J: moment d'inertie du moteur asynchrone.

$K_f$ : Coefficient de frottement visqueux.

$C_r$ : Couple résistant.

$\omega$ : vitesse rotorique.

$C_{em}$ : Couple électromagnétique.

### II.4 Transformation de PARK

Le principe de cette transformation consiste à appliquer aux grandeurs électriques (tension, courant) et à la grandeur magnétique (flux) un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et l'axe d et q [15]

Cette transformation consiste à transformer la représentation du moteur triphasé équilibré à une représentation biphasée équivalente.

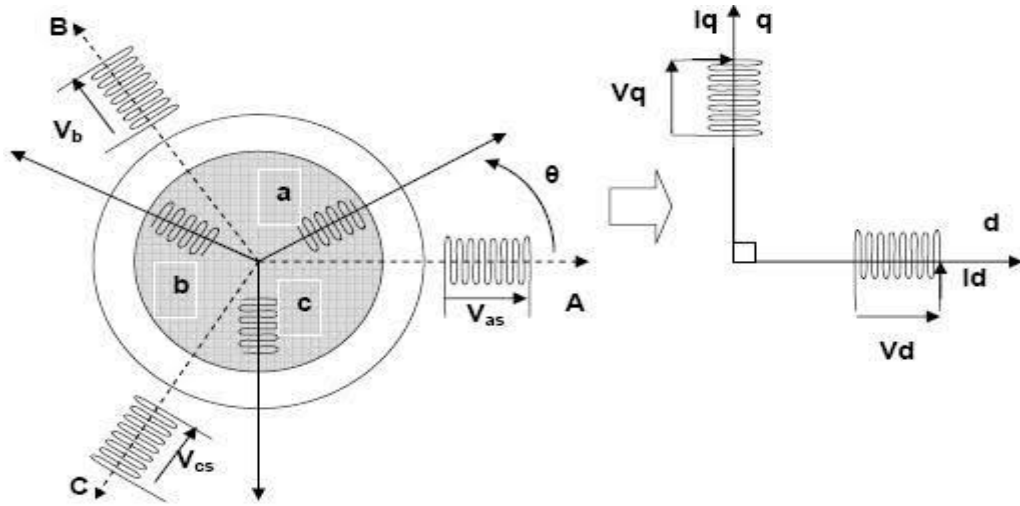


Figure II.8 : Système d'axes déphasés (d, q)

Cette transformation est définie par sa matrice  $[P(\theta)]$  telle que :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

La matrice de PARK écrite sous cette forme est orthogonale, ce qui conduit à l'égalité des valeurs efficaces des grandeurs physiques dans les deux repères. De ce fait, la conservation de la puissance pour ce changement de repère est vérifiée. L'orthogonalité nous permet d'écrire :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

**Remarque :**

Tout au long de cette modélisation, cette transformation sera utilisée afin de conserver l'équivalence énergétique.

$$[X_d, X_q, X_0]^t = [P(\theta)][X_A, X_B, X_C]^t \quad (\text{II.23})$$

X : Tension, courant ou flux.

**II.4.1 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de PARK**

En appliquant la transformation de PARK aux équations, nous obtenons le système d'équations suivant :

### a. Equations des tensions :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_p \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_p \phi_{ds} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$$\begin{bmatrix} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_p - \omega) \phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_p - \omega) \phi_{dr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$$\omega_p = \frac{d\theta_p}{dt} \quad \omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{II.26})$$

### b. Equations des flux

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{bmatrix} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Et:

$L_s = l_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M$  : Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator

### II.4.2 Choix du référentiel

Ce qui rend la transformation de Park attrayante, est que l'orientation du repère (u, v) peut être quelconque. Il existe trois choix importants, le repère (u, v) peut être fixé au stator, au rotor ou au champ tournant, Selon l'objectif de l'application. Le schéma de la figure II.9 représente les trois référentiels biphasés particuliers du système. [16]

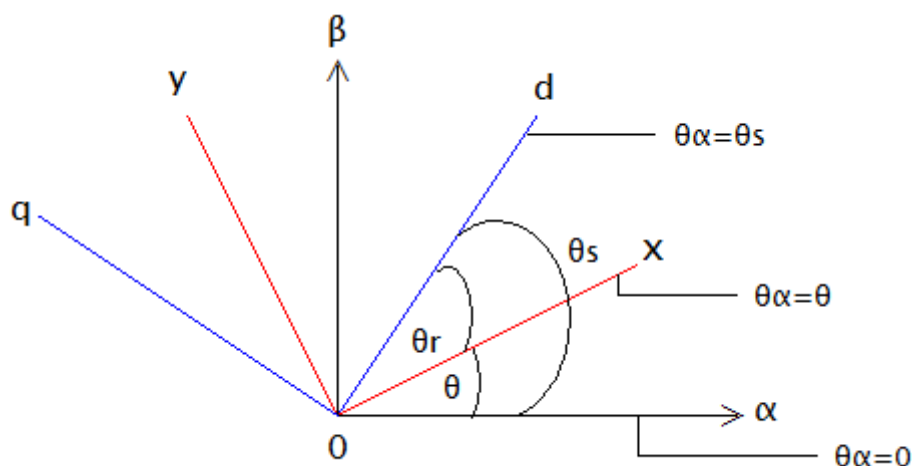


Figure II.9 : Représentation des axes biphasés  $(\alpha, \beta)$ ,  $(x, y)$  et  $(d, q)$  [19]

#### II.4.2.1 Référentiel fixe par rapport au stator $(\alpha, \beta)$

Il est utilisé de préférence pour étudier des variations importantes de la vitesse de rotation associées au non avec des variations de fréquence d'alimentation. Cela se traduit par les conditions

$$\theta_\alpha = 0 \quad \text{Alors} \quad \omega_\alpha = \frac{d\theta_\alpha}{dt} = 0 \quad (\text{II.28})$$

$$\theta_r = -\theta \quad \text{Alors} \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega \quad (\text{II.29})$$

Les équations électriques prennent la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\alpha} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Phi_{s\beta} \\ V_{r\alpha} = 0 \\ V_{r\beta} = 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

#### II.4.2.2 Référentiel fixe par rapport au rotor $(x, y)$

Toutes les grandeurs dans ce référentiel varient de manière alternative à la pulsation  $\omega_r$  (pulsation des grandeurs rotoriques réelles). On a donc un modèle dont la dynamique est moins oscillatoire et qui sera intéressant pour l'étude des grandeurs statoriques. Il est très peu utilisé car celles-ci sont en général connues

Les conditions qui déterminent ce référentiel sont :

$$\theta_\alpha = \theta \quad \text{alors} \quad \omega_\alpha = \omega$$

$$\theta_r = 0 \quad \text{alors} \quad \omega_r = 0$$

Les équations électriques s'écrivent alors

$$\begin{bmatrix} V_{sx} = R_s i_{sx} + \frac{d}{dt} \Phi_{sx} - \omega \Phi_{sy} \\ V_{sy} = R_s i_{sy} + \frac{d}{dt} \Phi_{sy} + \omega \Phi_{sx} \\ V_{rx} = 0 \\ V_{ry} = 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

### II.4.2.3 Référentiel fixe par rapport au champ tournant (d, q)

Dans ce référentiel lié au synchronisme, toutes les grandeurs sont continuées non pulsatoires. Ce référentiel fait donc correspondre, en régime permanent, des grandeurs continues aux grandeurs réelles qui sont sinusoïdales.

$$\theta_\alpha = \theta_s \quad \text{donc} \quad \omega_\alpha = \omega_s$$

$$\theta_r = \theta_s \quad \text{donc} \quad \omega_r = \omega$$

Les équations des tensions sont comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} = 0 \\ V_{rq} = R_s i_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} - (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} = 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.32})$$

## II.5 Modélisation d'un redresseur triphasé :

Le redresseur est un convertisseur « alternatif / continu ». Une conversion d'énergie électrique permet de disposer d'une source de courant continu à partir d'une source alternatif, il est représenté par la (figure II.10)

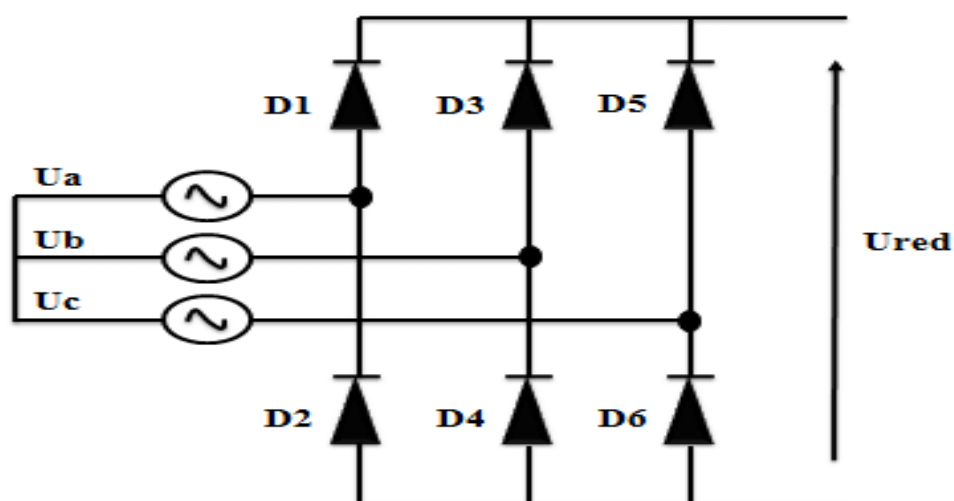


Figure II.10 : Redresseur triphasé à diodes double alternance

## Chapitre II : Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

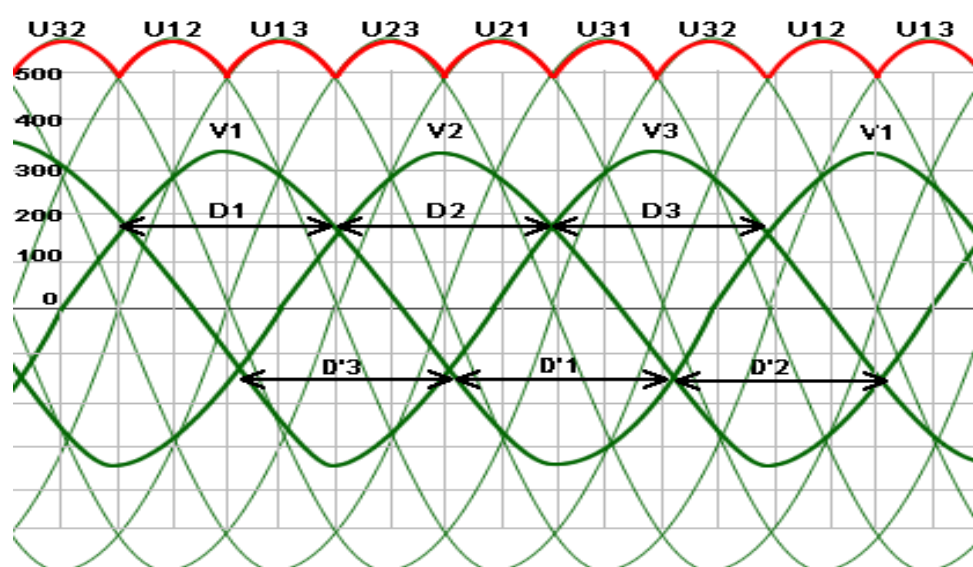
Ce redresseur comporte trois diodes (D1, D3, D5) à cathode commune assurant l'allée du courant, Id et trois diodes (D2, D4, D6) à anode commune, assurant le retour du courant Id. Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin(\omega t - \varphi) \\ V_2 = V_m \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_3 = V_m \sin\left(\omega t - \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

Et si on néglige l'effet d'empîement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suite :

$$U_{\text{red}} = \text{Max}(V_1, V_2, V_3) - \text{Min}(V_1, V_2, V_3) \quad (\text{II.34})$$

Cette tension est représentée par (la figure II.11) :



**Figure II.11:** Tension simple de phase et tension de sortie de redresseur

### II.6 Modélisation de l'onduleur de tension :

Un onduleur autonome (à commande M.L.I) est un convertisseur statique qui assure la transformation de l'énergie d'une source continue en une énergie alternative, qui peut être à fréquence fixe ou variable. Le contrôle de la vitesse et du couple de la MAS se réalise par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la, tension statorique, à base d'onduleurs de tension à fréquence variable. Chaque étoile de la MAS est connectée à un onduleur triphasé. Ce dernier est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états définis par la fonction de connexion logique suivante : [17]

$$f_i = \begin{cases} 1 & \text{l'interrepteur } i \text{ est fermé } (K_i \text{ conduit, } \bar{K}_i \text{ bloqué)} \\ 0 & \text{l'interrepteur } i \text{ est ouvert } (K_i \text{ bloqué, } \bar{K}_i \text{ conduit)} \end{cases} \quad \left. \vphantom{f_i} \right\}$$

Avec:

$$\begin{cases} f_i + \bar{f}_i = 1 \\ i = 1 \dots 3 \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

La figure II.8 représente le schéma de l'onduleur triphasé.

Les tensions composées sont :

$$V_{AB} = v_{as1} - v_{bs1} = E(f_1 - f_2) \quad (\text{II.36})$$

$$V_{BC} = v_{bs1} - v_{cs1} = E(f_2 - f_3) \quad (\text{II.37})$$

$$V_{CA} = v_{cs1} - v_{as1} = E(f_3 - f_1) \quad (\text{II.38})$$

Les tensions simples  $v_{as1}, v_{bs1}, v_{cs1}$  forment un système triphasé équilibré, tel que :

$$v_{as1} + v_{bs1} + v_{cs1} = 0 \quad (\text{II.39})$$

La relation des équations

$$\begin{bmatrix} v_{as1} \\ v_{bs1} \\ v_{cs1} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Pour le second onduleur, on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{as2} \\ v_{bs2} \\ v_{cs2} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_4 \\ f_5 \\ f_6 \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

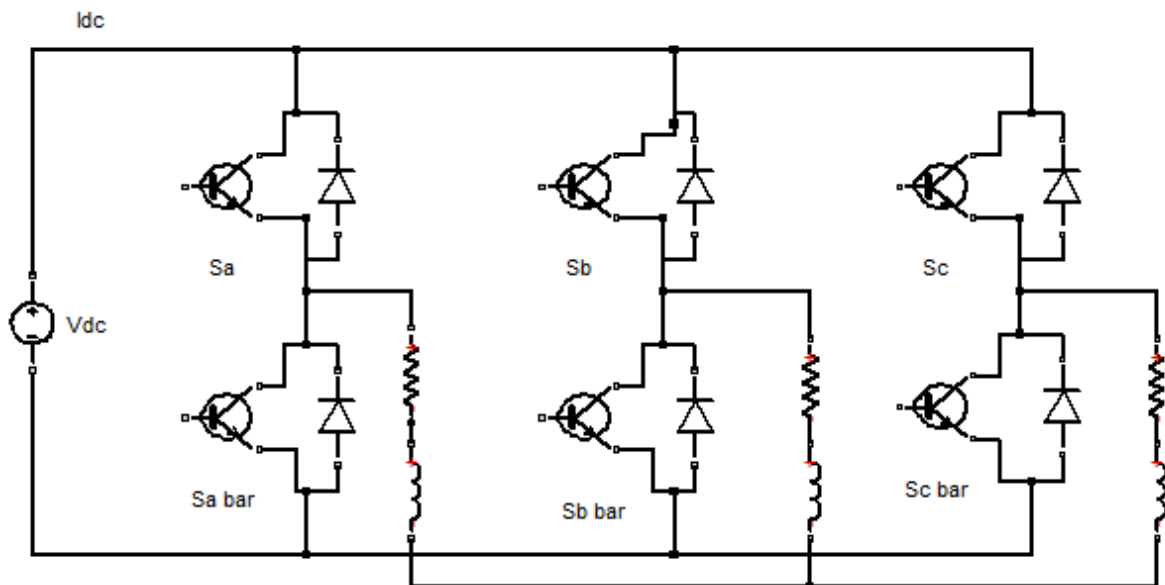


Figure II.12 : Schéma de l'onduleur triphasé.



## II.7 Modélisation d'un filtre de sortie (condensateur) :

Le condensateur à une importance capitale dans le montage du fait qu'il stocke l'énergie nécessaire pour le système. Par conséquent, la conception de ce composant dépendra de l'application et aura habituellement un effet significatif sur le poids, la taille et le coût final.

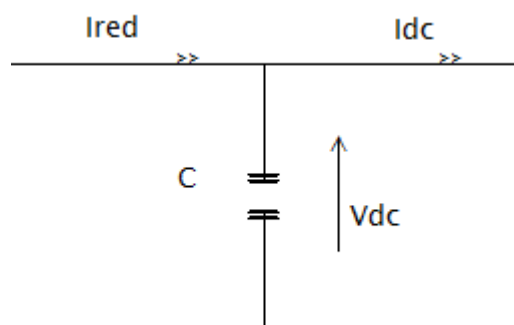


Figure II.13 : Filtre de sortie

Le courant dans le condensateur est donné par :

$$\frac{C dv_{dc}}{dt} = I_{red} - I_{dc} \quad (\text{II.42})$$

Considérant l'énergie stockée dans le condensateur donnée comme suit :

$$W = \frac{1}{2} C \cdot v_{dc}^2 \quad (\text{II.43})$$

Sa variation peut être exprimée comme :

$$\frac{dw}{dt} = C \cdot v_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} \quad (\text{II.44})$$

Tenant compte de cette expression et multipliant par  $V_{dc}$ , il est possible d'obtenir l'équation d'équilibre des puissances suivante :

$$\frac{dw}{dt} = P_c - P_{ch} = \Delta P \quad (\text{II.45})$$

Où :

$P_c$ : la puissance active à la sortie du redresseur ;

$P_{ch}$ : la puissance active consommée par la charge ;

A partir des équations (II.44), (II.45) et pour une variation maximale de la tension continue

$\Delta v_{dc \max}$ , la valeur du condensateur peut être approchée comme suit :

$$C \geq \frac{\Delta P \cdot \Delta T}{\Delta v_{dc \max} \cdot V_{dc}} \quad (\text{II.46})$$

Où  $\Delta T$ : est le retard du temps requis par la commande pour ajuster la puissance sortante  $P_{ch}$  à la nouvelle puissance entrante  $P_c$ .

### II.8. Conclusion

Ce chapitre traite de la modélisation des éléments constituant la chaîne de conversion éolienne. Pour le début de chapitre, un aperçu sur les généralités de la machine asynchrone ainsi que sa représentation, constitution et son principe de fonctionnement. Puis, la modélisation de la chaîne conversion éolienne, les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine ont été présentés.

Ensuite vers la modélisation de la machine asynchrone a cage d'écureuil : établir le modèle mathématique, utilisation la transformation de PARK qui ramène la MAS triphasé en une machine biphasé équivalent ce qui facilite de déterminer les paramètres de la MAS.

Les modélisations des convertisseurs statique ; redresseur (PD3), onduleur de tension (à commande M.L.I) et de filtre avec condensateur ont été abordées.

# **CHAPITRE III**

## **IDENTIFICATION DE MAS**

### III.1. Introduction

L'identification des paramètres d'un modèle de la MAS est l'un des objectifs les plus importants dans beaucoup d'applications industrielles. Or, elle revêt d'un intérêt capital pour la simulation de son comportement. Pour cela on recourt à des essais pratiques pour la détermination de ces paramètres, et avant ça, il faut élaborer un modèle mathématique de la machine asynchrone composé par un système d'équations contient des paramètres qu'il faut les déterminer avant tout étude sur ces machines. [18]

Ce chapitre sera consacré, à l'établissement des différents schémas équivalents de MAS, ensuite on procédera à la méthode conventionnelle basée sur les essais classiques pour l'identification des paramètres électriques et mécanique de MAS.

### III.2. Schéma équivalent de MAS

Le schéma équivalent est un modèle électrique issu de l'approche de modélisation électrique (équations du circuit). C'est le modèle classique d'étude et de conception de la machine asynchrone

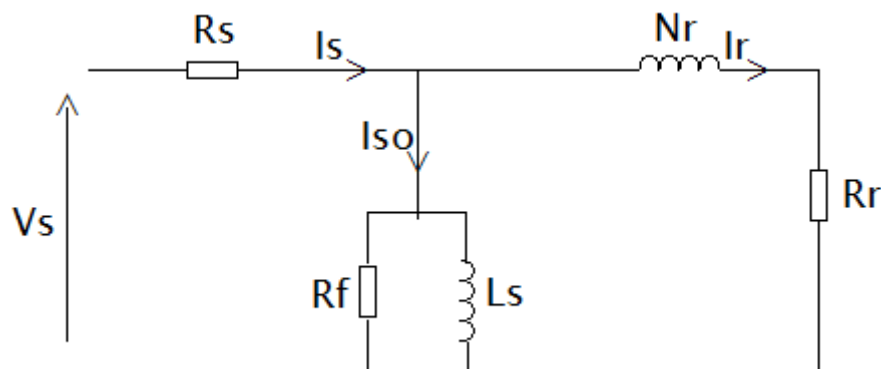


Figure III.1 : Schéma équivalent de MAS

**V<sub>s</sub>** : tension simple statorique

**R<sub>s</sub>** : résistance statorique

**R<sub>f</sub>** : résistance magnétisante

**L<sub>s</sub>** : réactance magnétisante

**N<sub>r</sub>** : réactance au rotor

**R<sub>r</sub>'** : résistance rotorique ramenée au stator

**I<sub>s</sub>** : courant statorique

**I<sub>r</sub>** : courant rotorique

### III.3. Détermination expérimentale des paramètres de la machine par les essais classiques



**Figure III.2** : Photo du banc d'essais de laboratoire

Les valeurs nominales indiquées sur la plaque signalétique de la machine asynchrone triphasée, utilisée au cours de ce travail sont les suivantes :

Nous avons utilisé le couplage étoile:

- Puissance utile nominale: 1.5kW
- Fréquence nominale : 50Hz
- Tension stator nominale : 230 V
- Courant stator nominale : 5.5 A
- vitesse nominale : 1445tr/min
- Facteur de puissance nominale:0.8

#### **Matériels utilisées**

- Fils de raccordement.
- Bloc d'alimentation.
- Autotransformateur.
- Moteur asynchrone à cage d'écureuil.
- Ampèremètre, Wattmètre, Voltmètre, multimètre, oscilloscope
- Moteur a courant continue

### III.3.1 Détermination des paramètres électriques

#### III.3.1.1 Mesure des résistances statoriques:

La mesure des résistances statoriques est faite par la méthode volt-ampérométrique, on effectue plusieurs mesures de la tension et du courant au niveau d'un seul enroulement statorique. La résistance du stator est obtenue par le calcul de la valeur moyenne des différentes mesures

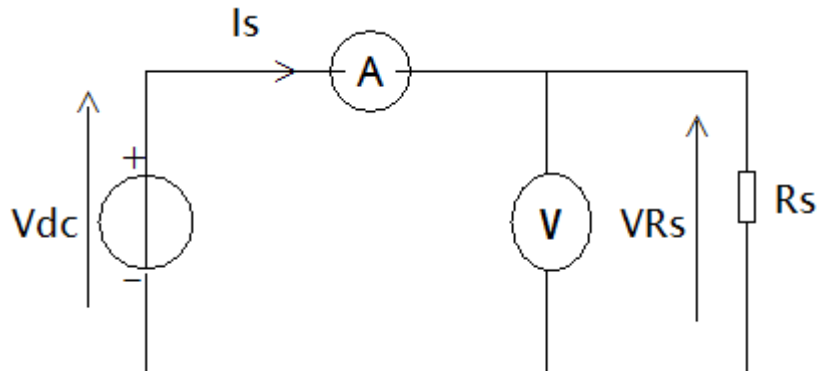


Figure III.3 : mesure de la résistance

La résistance du stator est obtenue par des différentes mesures de courant et tension à partir de plusieurs valeurs de tension d'entrée. Pour la phase statorique on relève  $V_s$  et  $I_s$

On Aura : 
$$R_s = \frac{V_s}{2I_s} \quad (III.1)$$

#### Résultats de l'essai :

V (v)	24.2	37.8	40.3
I (A)	2.9	4.5	4.8
$R_s(\Omega)$	4.17	4.20	4.19

Tableau III.1 : tableau de mesure  $R_s$ .

Alors La valeur de multimètre :  $R_{s_{multi}} = 3.91 (\Omega)$

#### III.3.2. Essai a rotor bloqué :

Dite aussi essai a court-circuit, il s'agit de bloquer mécaniquement le rotor de la machine afin d'empêcher sa rotation, et puis alimenter le moteur progressivement jusqu'à  $I \leq I_n$ , et on relève les grandeurs :

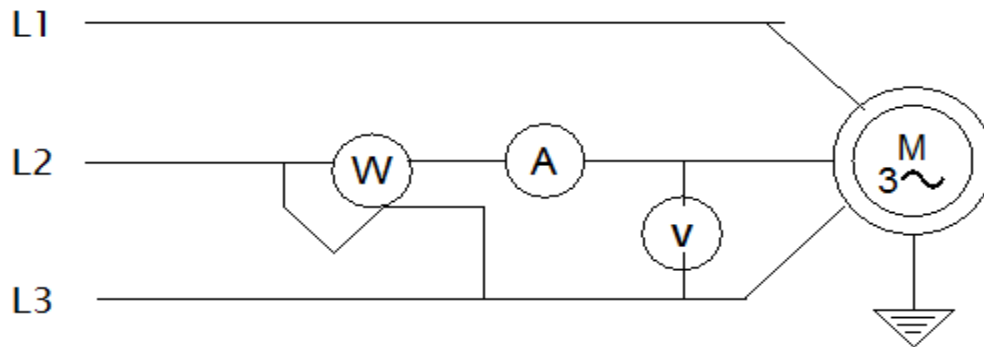
- la tension d'alimentation
- le courant statorique
- la puissance absorbée

Le rotor de la machine asynchrone est bloqué, donc la vitesse de rotation étant nulle et la valeur du glissement est maximale ( $g=1$ ).

La puissance utile est nulle et les pertes par frottement et ventilation sont nulles:  $P_{méca}=0$ .

Le courant de l'inductance magnétisante est négligeable donc  $I_s=I_r'$ .

-Montage électrique :



FigureIII.4: montage de mesure

$V_{cc}$ (V)	42.1	78.1	98
$I_{cc}$ (A)	1	2	3
$P_{cc}$ (W)	2	14	24

TableauIII.2 : Résultat de l'essai a rotor bloqué



Figure III.5 : schéma équivalent d'essai a rotor bloqué

a. Calcul de  $R_r'$  : (resistance rotorique ramenée au stator)

$$\text{On a } P_{cc} = 3R_s I_{cc}^2 + 3R_r' I_{cc}^2 \quad (\text{III.2})$$

$$R_r' = \frac{P_{cc}}{3I_{cc}^2} - R_s \quad (\text{III.3})$$

$$R'_r = 3.63 (\Omega)$$

### b. Calcule $L_s$ est $L_r$ (inductance magnétisante)

L'impédance équivalente est comme suit :

$$Z_{cc} = \frac{\overline{V_{cc}}}{I_{cc}} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{On a } Z_{cc} = (R_s + R'_r) + j(X_s + X'_r) \quad (\text{III.5})$$

$$R_{cc} = R_s + R'_r \quad \text{Avec } X_{cc} = X_s + X'_r \quad (\text{III.6}), (\text{III.7})$$

$$R_{cc} = 7.73 (\Omega)$$

$$X_{cc} = \sqrt{\left(\frac{V_{cc}}{I_{cc}}\right)^2 - R_{cc}^2} \quad (\text{III.8})$$

$$X_{cc} = 25.38 (\Omega)$$

Pour les moteurs de petite puissance on suppose que :

$$X_s = X'_r \quad (\text{III.9})$$

On a

$$X_s = X'_r = \frac{1}{2} X_{cc} \quad (\text{III.10})$$

$$X_s = X'_r = 12.69 (\Omega)$$

Nous déterminons les inductances de fuites comme suit :

$$L_s = L_r = \frac{X_s}{\omega} \quad \text{est} \quad \omega = 100\pi \quad (\text{III.11})$$

$$L_s = L_r = 0.0403 (\Omega)$$

### III.3.3.Essai à vide

A vide, le moteur n'entraîne pas de charge. Dans ce fonctionnement, le rotor tourne pratiquement au synchronisme  $g=0$ . Cet essai nous permet de mesurer les pertes à vide de la machine, ces dernières peuvent être calculés à partir les grandeurs suivants :

- La tension d'alimentation à vide
- Le courant absorbé à vide
- La puissance absorbée à vide



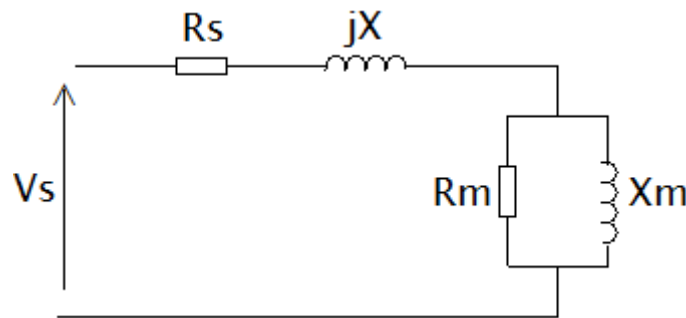
Tableau de mesure :

$I_0(A)$	0.72	0.6	0.65	0.7
$P_0(W)$	90	37.5	65	72.5
$V_0(V)$	220	93.5	161.2	194.8

**Tableau III.3 :** Résultat de l'essai à vide

Dans un fonctionnement à vide, le glissement du la MAS à vide est très bas. Ainsi, la valeur de la résistance équivalente ( $R_r \frac{1-g}{g}$ ), dans le rotor la branche du circuit équivalentest très grande. Le courant du rotor sans charge est alors négligeable et la branche de rotor du circuit équivalent peut être négligée.

Le circuit équivalent approximatif pour l'essai à vide devient (figure III.6)



**Figure III.6 :** schéma équivalent d'un essai à vide

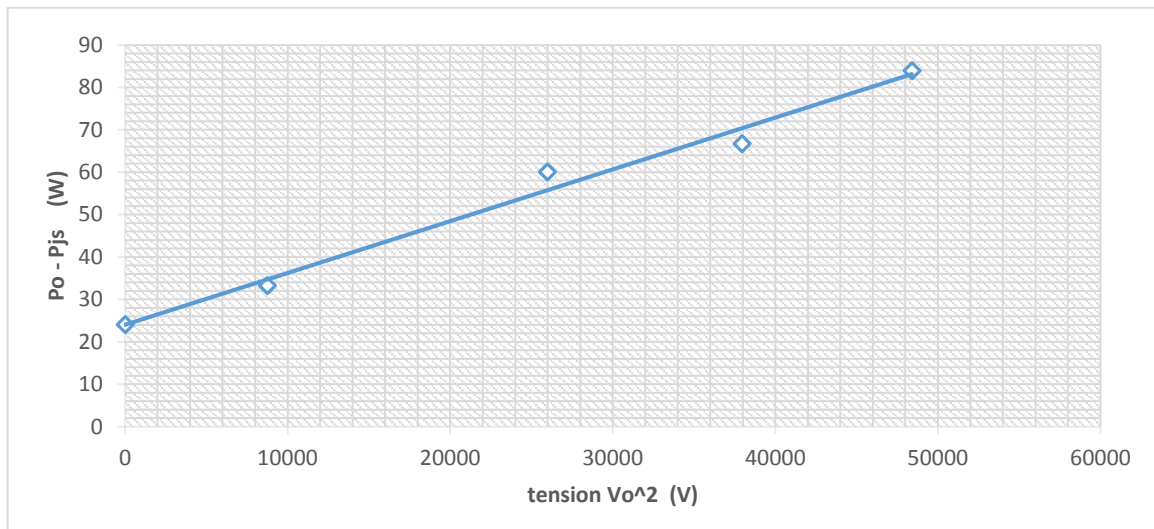
### III.3.4.Détermination des pertes fer et des pertes mécaniques :

La puissance électrique absorbée à vide  $P_0$  correspond à la somme des pertes Joules et des pertes fer du stator et des pertes mécaniques tel que :

$$P_0 = 3 R_s I_0^2 + P_{fs} + \Delta P_{méc} \tag{III.12}$$

#### III.3.4.1.Détermination $P_{méc}$ et $P_{fs}$ :

Nous traçons alors en  $P_0 - 3 R_s I_0^2$  fonction de  $V_0^2$  qui devrait être une droite. L'extrapolation de cette droite à l'origine donne la valeur des pertes mécaniques qui sont supposées constantes quand la vitesse est maintenue constante.



**Figure III.7 :** Caractéristique de la somme des pertes fer et mécaniques en fonction de  $V_0^2$

On trouve la valeur des pertes mécaniques :  $\Delta P_{\text{méc}} = 24.04 \text{ w}$

Les pertes fer sont déduites comme suit :

$$P_{\text{fs}} = P_0 - 3 R_s I_0^2 - \Delta P_{\text{méc}} \quad (\text{III.13})$$

$$P_{\text{fs}} = 90 - (3 \times 3.91 \times 0.72^2) - 24.04$$

$$P_{\text{fs}} = 60.21 \text{ w}$$

### III.3.4.2 Détermination $R_m$ , $X_m$

En négligeant la chute de tension aux bornes de  $R_s$ , les pertes fer peuvent s'exprimer sous la forme :

$$P_{\text{fs}} = \frac{3}{R_m} V_s^2 \quad (\text{III.14})$$

La résistance de fuite  $R_m$  calculée par l'équation :

$$R_m = \frac{3}{P_{\text{fs}}} V_s^2 \quad (\text{III.15})$$

$$R_m = 2411.56 (\Omega)$$

Inductance de fuite :

$$L_m = \frac{3}{Q_0 \omega_s} V_s^2 \quad (\text{III.16})$$

Facteur de puissance à vide :

$$P_0 = 3 V_0 I_0 \cos \varphi_0 \quad (\text{III.17})$$

$$\cos \varphi_0 = 0.19$$

$$Q_0 = 3 V_0 I_0 \sin \varphi_0 \quad (\text{III.18})$$

$$Q_0 = 453.13 \text{ var}$$

### III.3.5. Identification des paramètres mécaniques :

L'identification des paramètres électriques seuls, ne sont pas suffisants afin d'effectuer une étude correcte pour la machine électrique, pour cette raison, une identification des paramètres mécaniques est nécessaire. Les équations électriques et mécaniques sont en effet liées par la position angulaire du rotor qui intervient dans l'expression des inductances mutuelles stator-rotor.

La connaissance des paramètres mécaniques permet de déterminer la dynamique de la vitesse de rotation selon l'équation de mouvement suivante :

$$C_e - C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + K_f \Omega \quad (\text{III.19})$$

#### III.3.5.1 essai de ralentissement

Le principe de la méthode de ralentissement utilisée consiste à lancer la machine à sa valeur nominale  $\omega_n$  puis à couper l'alimentation et à laisser la machine ralentir sous l'effet des frottements. La vitesse diminue progressivement sous l'effet des pertes mécaniques ( $f_r \cdot \Omega^2$ )

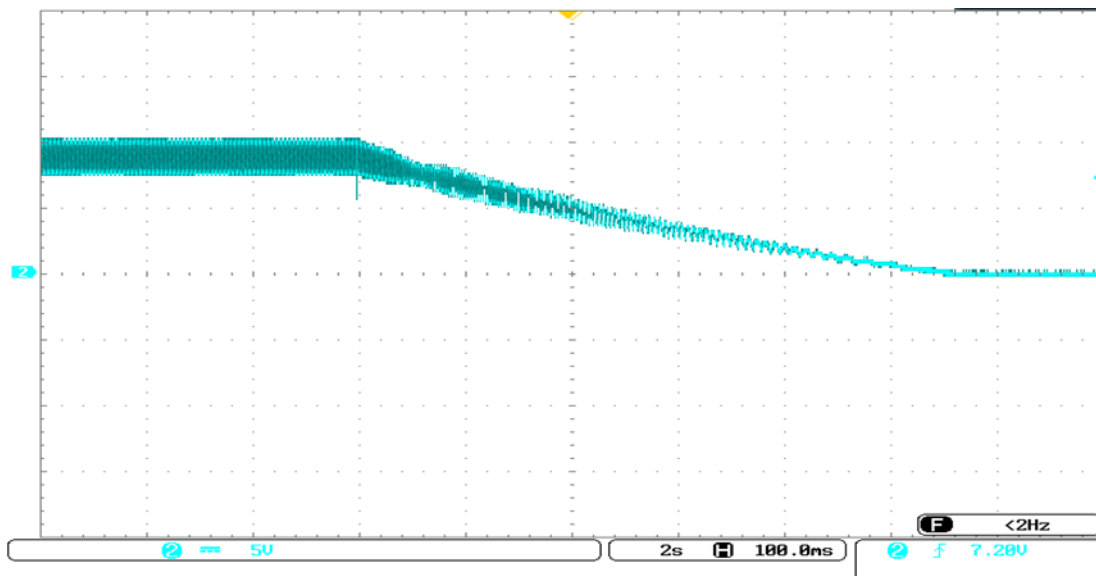


Figure III.8 : courbe de ralentissement de la MAS

#### a. Mesure du moment d'inertie

$$\Delta P_{méc} = -f_r \cdot \Omega^2 = J \Omega \left( \frac{d\Omega_r}{dt} \right)$$

Le terme  $d\Omega_r/dt$  représente la pente de la tangente à la courbe de ralentissement

$\Omega_r$  : est la vitesse angulaire du rotor en (rad/s).

$\Delta P_{méc}$ : Les pertes mécaniques

D'après l'expression du couple résistant, l'inertie peut être calculée par :

$$J = \frac{\Delta P_{méc}}{\Omega_{r0} \left( \frac{d\Omega_r}{dt} \right)}$$

$\Omega_{r0}$ : la vitesse angulaire du rotor initiale

A partir de la figure (III.8), on trouve :

$$\Omega_{r0} = 151.32 \text{ rad/s}$$

$$d\Omega_r = 148.5 \text{ rad/s}$$

$$dt = 10 \text{ s}$$

$$J = \frac{24.04}{151.32 \left( \frac{148.5}{10} \right)}$$

$$J = 0.0106 \text{ Kg.m}^2$$

#### **b. Mesure du coefficient de frottement**

$$K_f = \frac{\Delta P_{méc}}{\Omega^2}$$

$$K_f = \frac{24.04}{151.32^2}$$

$$K_f = 0.001 \text{ Nm.s/rad}$$

**III.3.6. Résultats des paramètres identifiés :**

Les paramètres identifiés par les essais classiques sont représentés dans le tableau suivant :

Résistance statorique	$R_s = 3.91 (\Omega)$
Résistance rotorique ramenée au stator	$R'_r = 3.63(\Omega)$
Inductance statorique	$L_s = 0.0403 H$
Inductance rotorique ramenée au stator	$L_r = 0.0403 H$
Résistance de magnétisation	$R_m = 2217.8 \Omega$
Inductance de magnétisation	$L_m = 1.01 H$
Coefficient de frottements	$K_f = 0.001 [Nm.s/rad]$
Moment d'inertie	$J = 0,0106 [Kg.m^2]$

**Tableau III.4 :** Résultats de l'identification des paramètres de la MAS

### III.3.7. Approximation de l'inductance de magnétisation ( $L_m$ ) en fonction du courant de magnétisation ( $I_m$ )

L'identification de l'inductance de magnétisation ( $L_m$ ) en fonction du courant de magnétisation ( $I_m$ ) est une étape importante pour la prise en compte de la saturation dans le cas du fonctionnement en mode générateur asynchrone.

La fonction polynomiale de degré 5 est se forme comme suit :

$$L_m = (0.0033I_m^5 - 0.0444I_m^4 + 0.238I_m^3 - 0.603I_m^2 + 0.524I_m + 0.635) \quad (\text{III.25})$$

## III.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons déterminé les paramètres électriques et mécaniques de la machine asynchrone à cage d'écureuil à partir des essais classiques :

- Essai a rotor bloqué
- Essai à vide
- Essai de ralentissement

La plaque signalétique ou les données fournies par le constructeur ne sont pas assez suffisants pour connaître directement ces paramètres. L'identification est une opération qui intervient pour les déterminer. Il s'agit évidemment de déterminer aussi bien les paramètres électriques que mécanique.

On remarque aussi que dans tous les essais effectués, l'identification des paramètres est différente d'un paramètre à un autre et d'un essai à un autre.

# **CHAPITRE IV**

## **SIMULATION D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE**

## IV.1 Introduction

La simulation est un moyen efficace et économique, couramment utilisé pour faire des études préliminaires et comparatives, tant au stade du développement (conception), qu'au cours du fonctionnement normal des systèmes. Actuellement, plusieurs outils de simulation, parmi lesquels MATLAB/SIMULINK, sont utilisés dans l'industrie et dans les milieux universitaires.

Dans ce dernier chapitre on apporte notre contribution à l'étude d'une simulation grâce au logiciel MATLAB/SIMULINK; toute la chaîne de conversion éolienne sera traitée afin de confirmer le bon fonctionnement du système proposé.

## IV.2. Description d'un émulateur éolien

Les études menées sur les systèmes éoliens dans les laboratoires n'utilisent pas directement les éoliennes mais plutôt les émulateurs vu leur souplesse et leur facilité de réglage. Ces derniers temps la structure la plus utilisée des émulateurs sont généralement celles des moteurs asynchrones à cage. L'émulateur a pour but de reproduire les mêmes caractéristiques que celle de la turbine éolienne.

L'émulateur est basé sur le système de conversion d'énergie montré à la (figure IV.1), comme il n'est pas possible d'utiliser une éolienne dans un laboratoire, les chercheurs remplacent le vent et la turbine éolienne par un moteur à pour but de produire un couple mécanique afin d'émuler le comportement de la turbine éolienne par une vitesse de rotation. Le couple généré par la turbine est connecté à la génératrice asynchrone triphasée.

Pour que la sortie de la chaîne éolienne délivre une énergie électrique il faut une présence d'une compensation réactive (banc de capacité).

## IV.3. résultat d'un émulateur éolien :

Dans ce test pratique d'un émulateur éolien entraîne la génératrice asynchrone avec une vitesse fixe (hyper-synchronisme) à l'aide d'une autre machine asynchrone qui remplace la turbine éolienne. Pour assurer le fonctionnement de la génératrice il faut alimenter le stator par un banc de capacité (la compensation réactive) est on relève la tension développée par la génératrice par un oscilloscope (la figure IV.2).





Figure IV.1 : Photo du banc d'essais d'un émulateur éolien

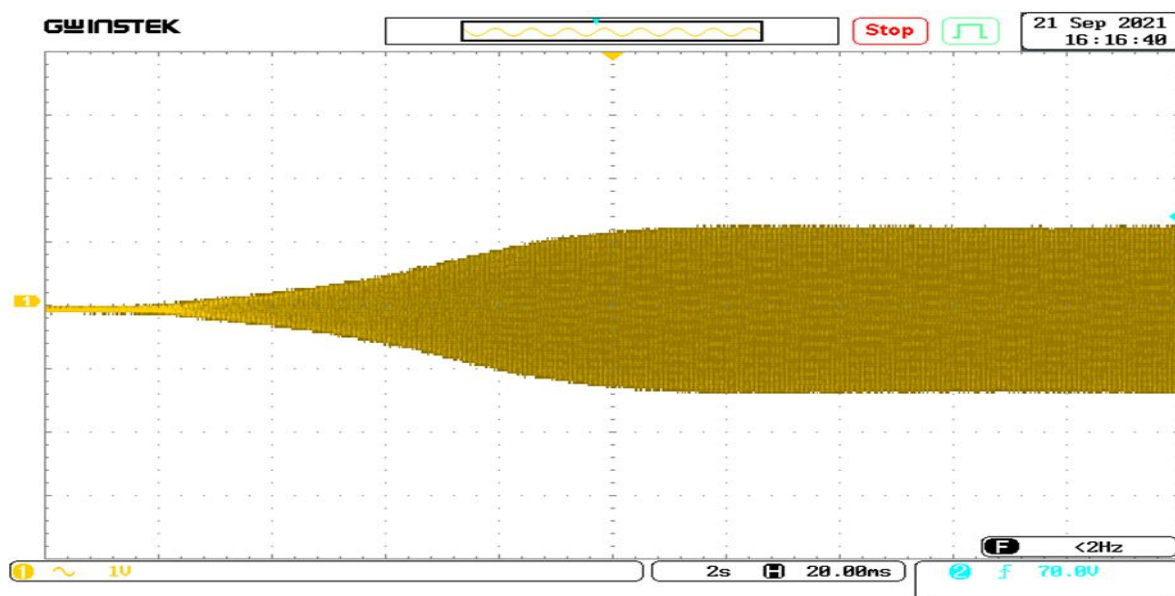


Figure IV.2 : La tension de sortie de l'émulateur éolien.

La figure (IV.2) montre les tensions de sortie en temps réel de l'émulateur éolien avec l'utilisation de 50 % de la compensation du band capacitive, on remarque que les résultats obtenus par les deux simulations, MATLAB/SIMULINK et l'émulateur éolien sont presque identique.

### IV.4. Schéma bloc de simulation avec un modèle non linéaire

Bloc globale voir annexe

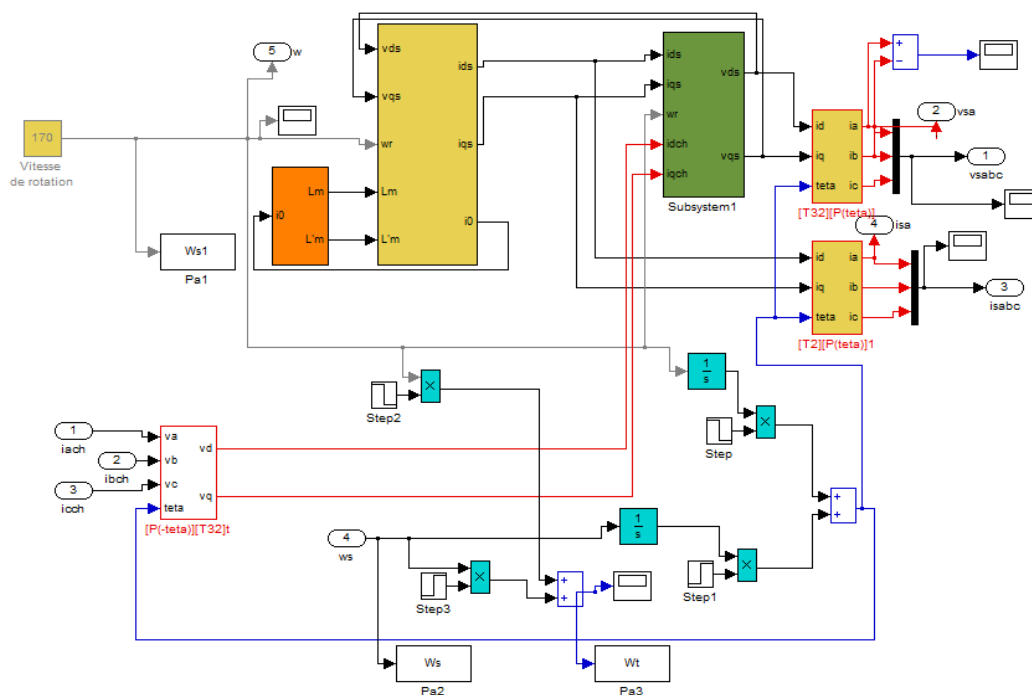


Figure IV.3 : Schéma bloc de simulation avec un modèle non linéaire

### IV.5. Résultats de simulation et interprétation

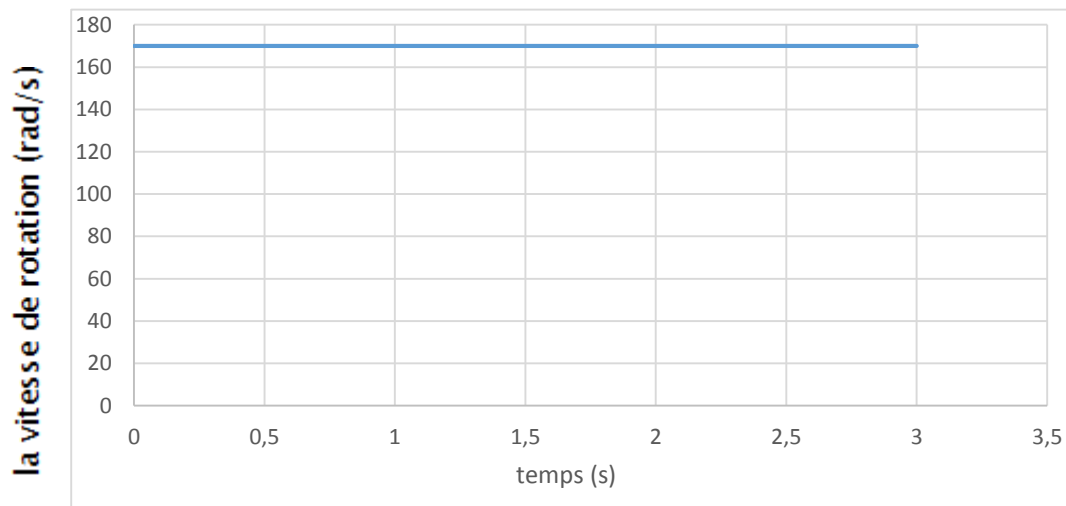
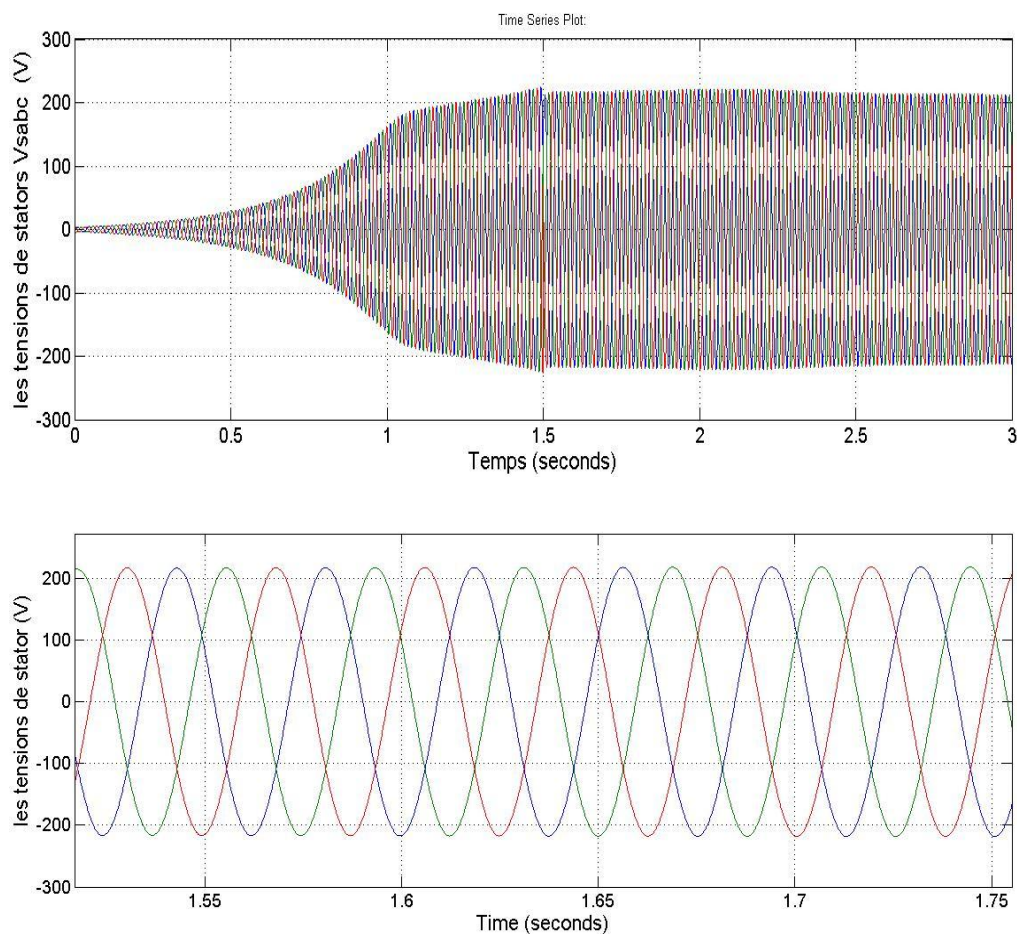


Figure IV.4 : la vitesse de rotation.

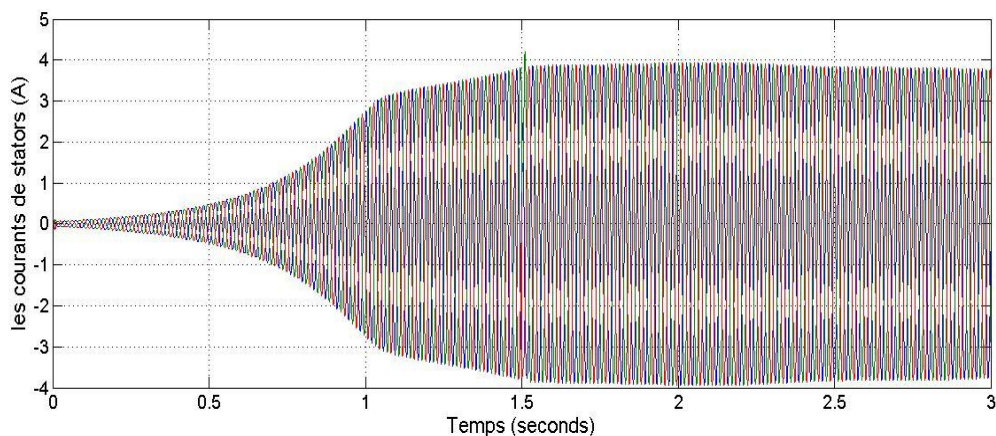
La figure (IV.4) représente le profil de vitesse de rotation imposé à notre génératrice, nous avons choisi le mode de fonctionnement, hyper-synchrone ( $N > 1500 \text{tr/mn}$ ).

**IV.5.1. Allure des tensions Vabc :**



**Figure IV.5 :** allure des tensions Vabc développée par la génératrice

**IV.5.2. Allure des courants Iabc :**



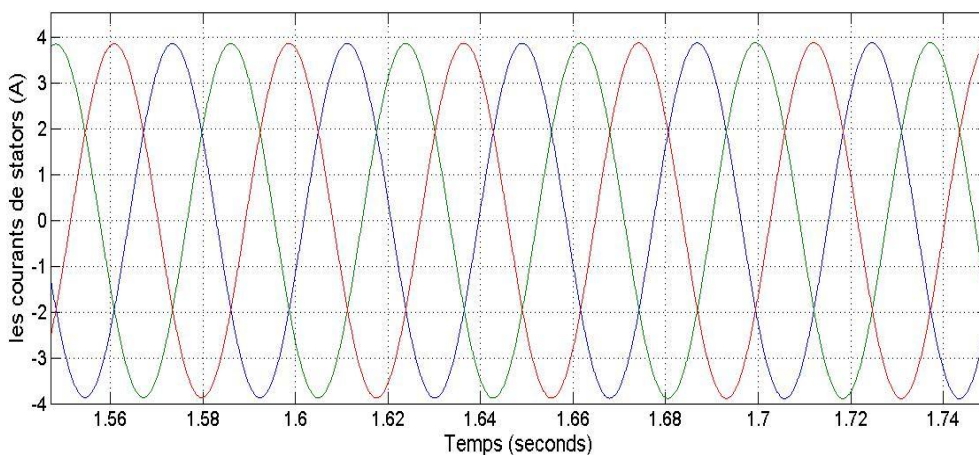


Figure IV.6 : allure des courants développés par la génératrice

Les figures (IV.(5 ,6)) : montrent les tensions et les courants statorique.

**IV.5.3. Allure des puissances active et réactive de la génératrice (GAS) :**

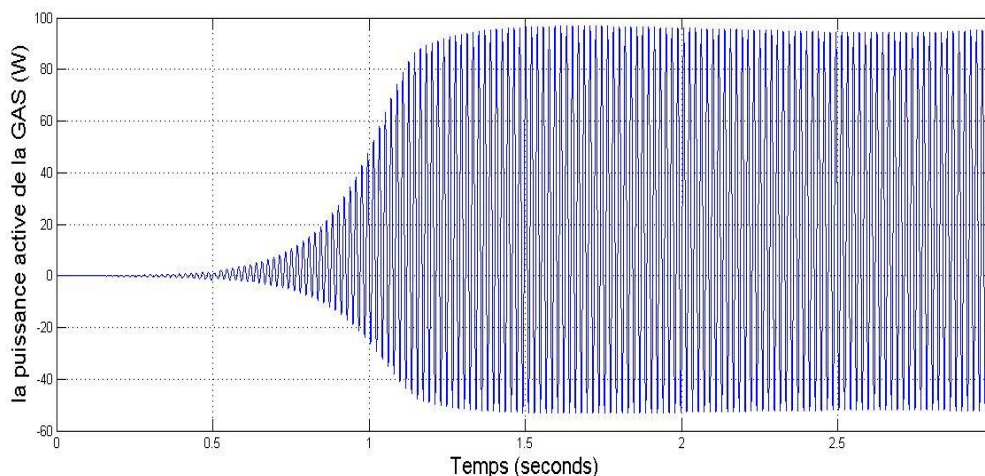


Figure IV.7 : La puissance active de la génératrice (GAS)

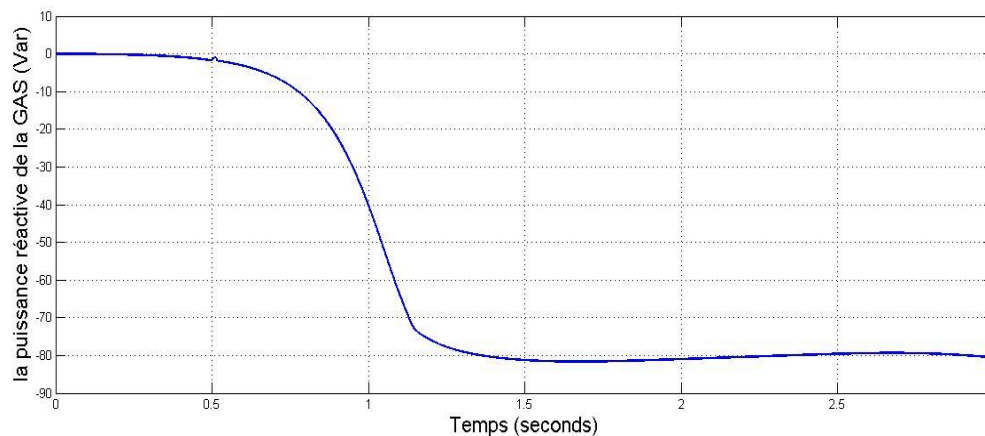
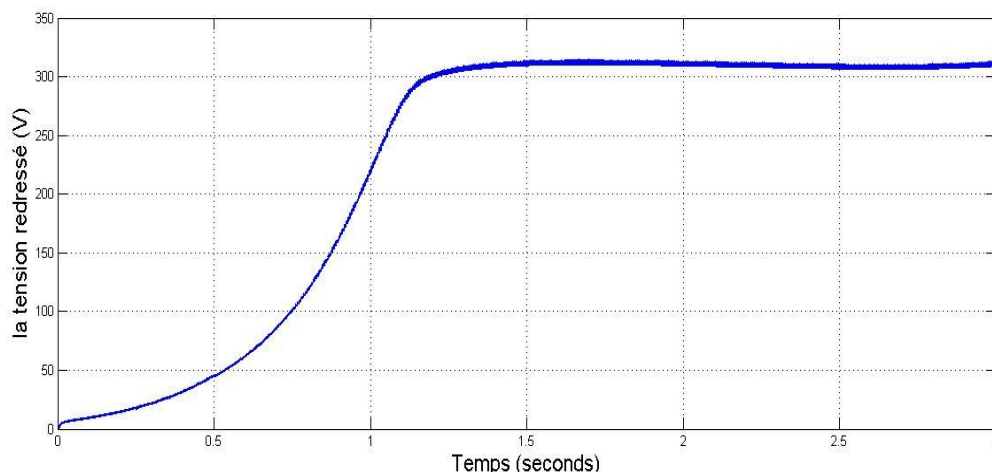


Figure IV.8 : La puissance réactive de la GAS

Les figures (VI. (7 ,8)) : représente les puissances active et réactive de la génératrice asynchrone, on remarque que la puissance active est positive donc la génératrice fournit de l'énergie vers le réseau. On observe sur la figure que la puissance réactive est négative car la génératrice asynchrone consomme la puissance réactive à sa magnétisation.

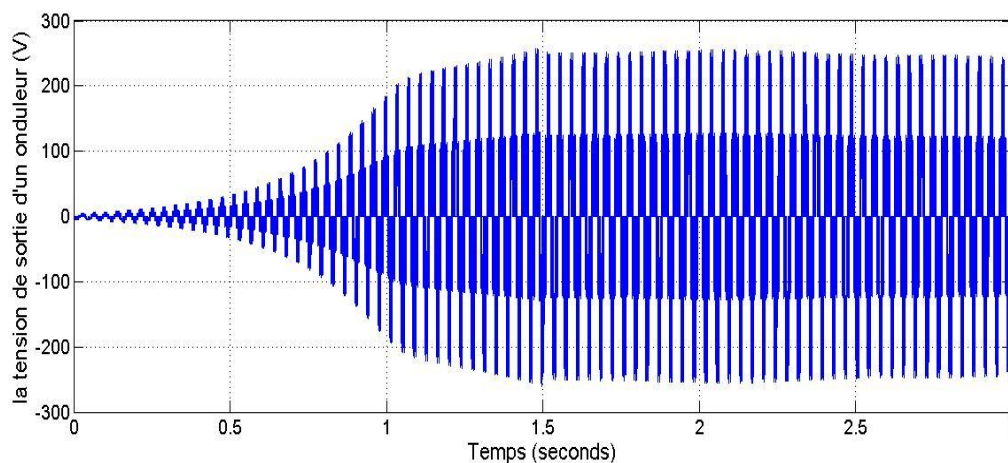
**IV.5.4. Allure de tension redressée (Vdc) :**



**Figure IV.9 :** tension redresser Vdc

La figures (VI.9) : montre la variation de la tension redressé au court du temps, à l'instant 1.5s on insert une charge, cette dernière provoque un pic de tension avant qu'elle atteint son régime permanent.

**IV.5.5. Allure de tension de sortie d'un onduleur :**



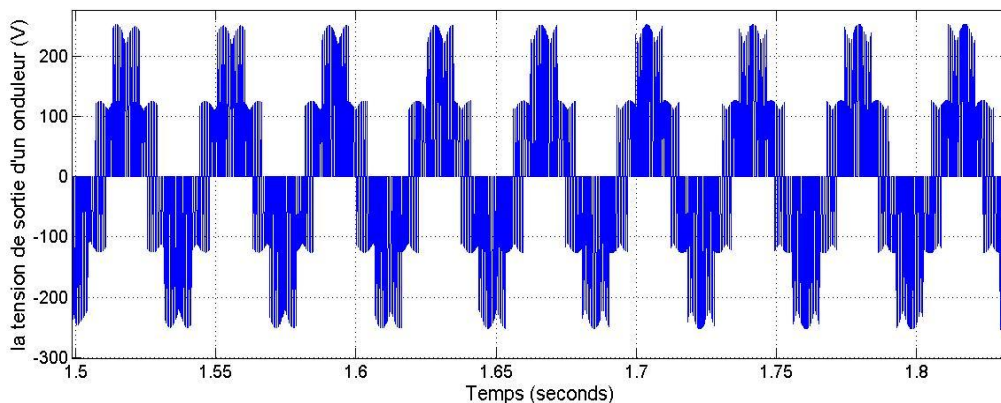


Figure IV.10 : allure de tension de sortie d'un onduleur

La figures (VI.8) :montre la tension de sortie du l'onduleur à deux niveau tension.

IV.5.6. Allure de courant de sortie d'un onduleur :

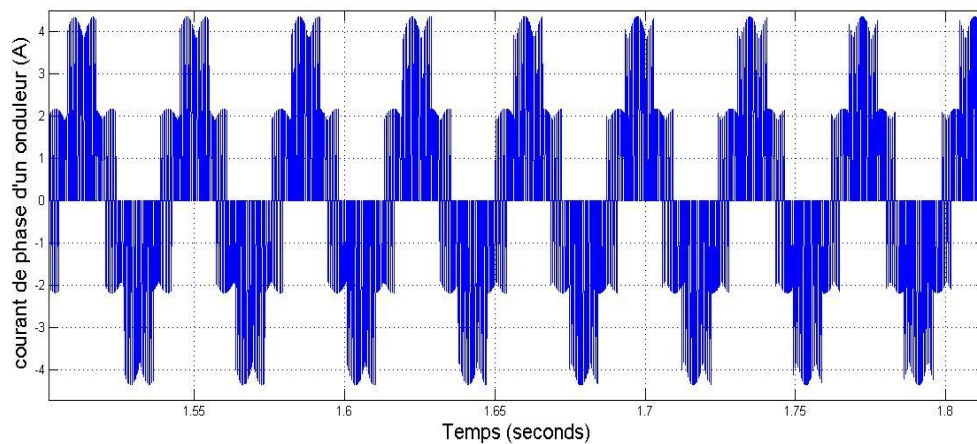
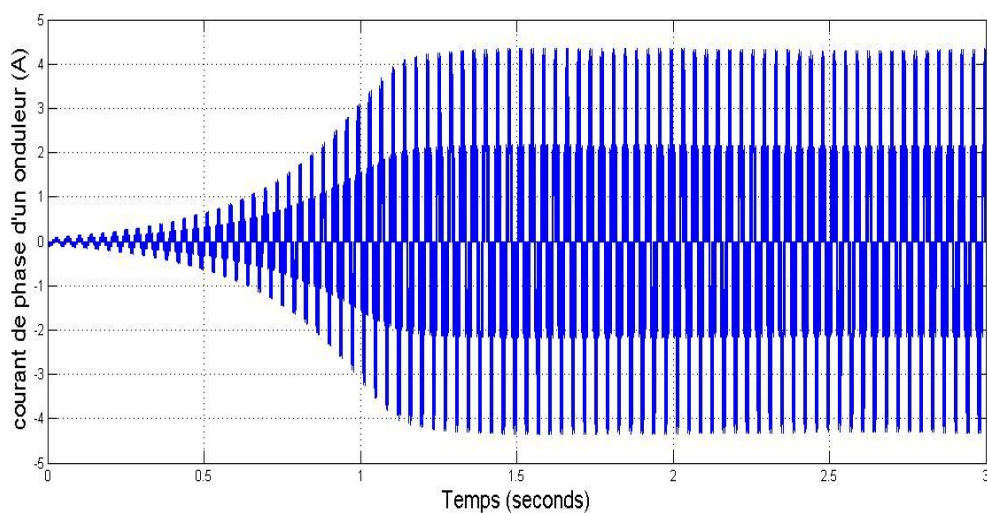
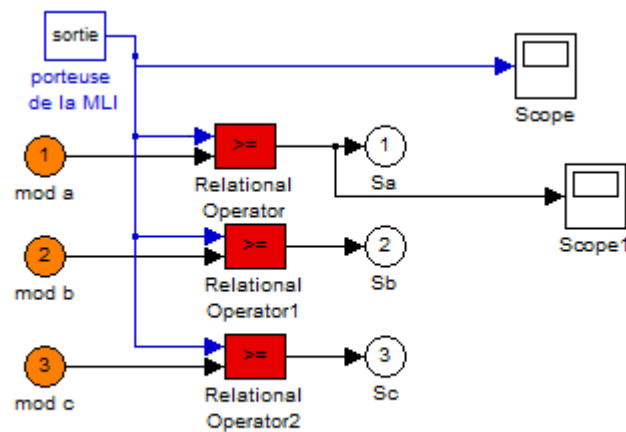
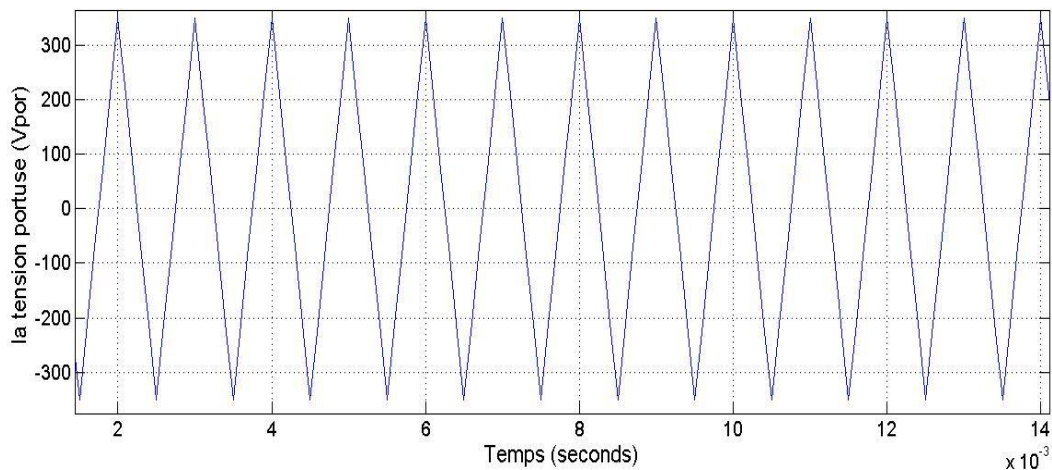


Figure IV.11 : courant de sortie d'un onduleur

**IV.5.7. block de simulation de la porteuse MLI**



**Figure IV.12 :** block de simulation de la porteuse MLI



**Figure IV.13 :** la tension de porteuse.

La figure (IV.9) montre le schéma bloc de la modulation sinus-triangulaire et la figure(IV.10) montre la tension de porteuse.

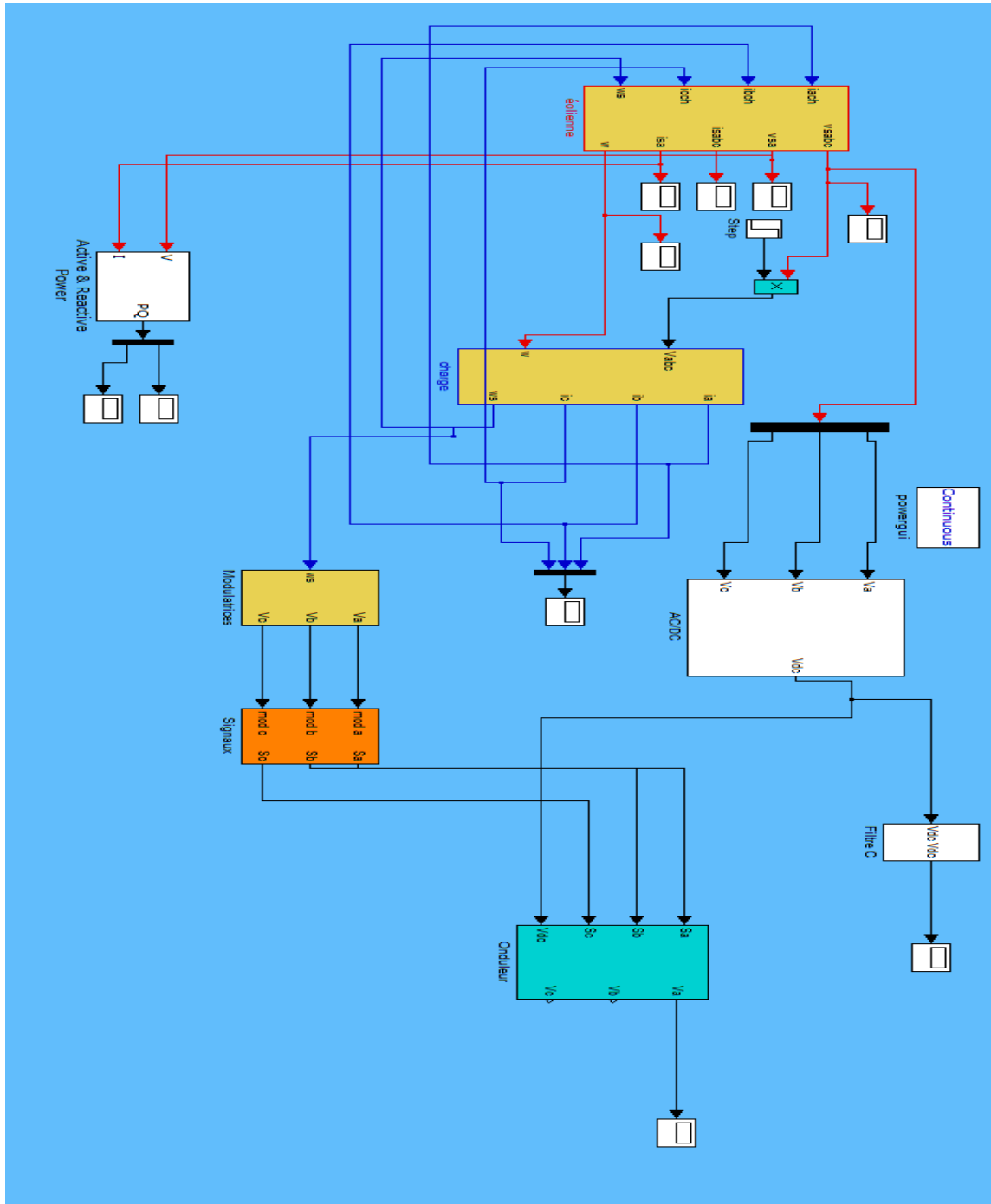
**IV.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons utilisé logiciel MATLAB/SIMULINK pour la simulation global d'un système éolien ainsi que tous les composants, ensuite on a fait un test pratique d'un émulateur éolien est on a obtenu les résultats de test.

Une première étape a consisté à démarrer la machine en régime moteur puis en régime génératrice, les résultats obtenus globalement montrent un bon fonctionnement du système, des courants et des tensions statorique sinusoïdaux, la génératrice fournie de la puissance active au réseau qui est le but de la simulation, les deux convertisseurs fonctionnent normalement, une tension parfaitement redressé et la tension du l'onduleur est sinusoïdale à deux niveau de tension. En générale le système conversion éolien fonctionne parfaitement.

# Annexe

## Bloc de simulation sur MATLAB/SIMULINK





**CONCLUSION**

**GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce thème était d'étudier un système de production d'énergie électrique à partir d'énergie éolienne, ainsi notre choix s'est porté sur une structure à vitesse fixe à base d'une génératrice asynchrone à cage.

Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine de moyenne puissance associée à une génératrice asynchrone à cage. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau. Cette étude est complétée par la mise en place des stratégies nécessaires au bon fonctionnement de chaque partie.

Le premier chapitre traite des généralités sur l'énergie éolienne, ainsi que on a citez la méthode de conversion d'énergie et les types d'éolienne existants .Nous avons également traité les lois fondamentales permettant la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Une petite comparaison entre les éoliennes à vitesse variable et les éoliennes à vitesse fixe nous a permis de choisir un système à vitesse fixe.

Le second chapitre a été dédié à établir la chaîne de conversion d'énergie éolienne, le modèle de la turbine, puis le modèle de la machine asynchrone dans le repère de PARK en tenant compte de la saturation (non linéaire), ainsi la modélisation des deux convertisseur, le redresseur et l'onduleur, et enfin le filtre capacitive.

Le troisième chapitre a été réservé à l'identification des paramètres de la machine asynchrone à cage. Les équations électriques et mécaniques caractérisant cette machine dans le domaine naturel (a,b,c) ont été établies, afin d'identifier les paramètres de la machine, on a utilisé trois essais classique, essai à vide, essai à rotor bloqué, essai en ralentissement.

Le quatrième chapitre a été dédié à l'exploitation et à la simulation et l'émulation de la chaîne de conversion éolienne à base de la génératrice asynchrone, les résultats obtenus sont satisfaisant.

En termes de prescriptive, il serait intéressant de tester les performances de la chaîne de conversion éolienne dans le cas d'un fonctionnement proche des contraintes réelles, à savoir une vitesse de rotation et des charges de valeurs aléatoires.

## Bibliographie

- [1] : LATRECHE Mohammed Tahar «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » mémoire soutenu le 24/06/2012, Université Ferhat Abbas de Sétif
- [2] : Nabila Chabbi et Kahina Merbouti «Etude et émulation d'une turbine éolienne de 3kW » Mémoire soutenu le 06/08/2017, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou
- [3] : Tria Fatma Zahra «Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA Par différentes techniques » mémoire de magister, 2013, Université d'El-oued
- [4] : site internet Wikipédia «Définition d'énergie éolienne»
- [5] : CHERFIA Naim «Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Energie Eolienne » thèse Doctorat, 2018, Université des Frères Mentouri de Constantine
- [6] : site internet «enerlice.fr»
- [7] : Mm Serir «cours énergie renouvelable 1<sup>er</sup> année master» Université de bejaia
- [8] : Kassa Idjeddaren «cours 1<sup>er</sup> année master en énergie renouvelable » Université de Bejaia
- [9] : Bachani Mohamed «Identification paramétrique de la machine asynchrone » mémoire de magister, 2013, Université des sciences et de technologie d'Oran
- [10] : Louar Fateh «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent » thèse Doctorat, 2016, Université Badji Mokhtar Annaba
- [11] : Benabdallah Kamal «Conception de la commande d'une machine asynchrone », mémoire de magister, 2015, Université d'Oran
- [12] : Laadjali Mohamed «Identification des paramètres de la machine asynchrone triphasée » Mémoire master, 2012, Université Saad Dahlab de Blida
- [13] : Rebaia Chergui «Identification des paramètres d'une machine asynchrone triphasée» Mémoire de magister, 2015, Université de Batna
- [14] : Ziraoui Salah Eddine «Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau » mémoire de master, 2017, Université Badji Mokhtar Annaba
- [15] : Metrouh Mohamed, Moussi Rafik « Identification d'une machine asynchrone à cage » Mémoire de Fin d'Etudes, 2017, Université Mouloud Mammeri de Tizi-ouzou
- [16] : Aimene Ferhat, Touahri Said « Etude et simulation d'un système redresseur MLI – onduleur Pour l'entraînement de la MAS» Mémoire de Fin d'Etudes, 2015, Université Kasdi Merbah Ouargla

[17] : Samira Chekkal «Intégration des Génératrice Asynchrone a Double Etoile dans un système éolienne » thèse doctorat, 2015, Université A.Mira Bejaia

[18] : Rabia Lakhdar «modélisation, identification expérimentale et commande vectorielle d'un moteur asynchrone triphasé a cage » mémoire de fin d'étude, 2015, Université Kasdi Merbah Ouargla

# **CHAPITRE I**

## **GENERALITE SUR LES SYSTEMES EOLENS**

