



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhder d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Electromécanique
Spécialité : Electromécanique

Thème

**Modélisation et simulation d'un système hybride
(turbine éolienne – générateur synchrone) pour une
compagnie isolée**

Réalisé par:

- BAADI Fatiha
- BEN HAOUA Chouaib

Encadré par:

- Dr. GEURFI Youcef

Année Universitaire: 2022/2023



Remerciements

*Avant tout , nous remercions notre dieu unique le tout puissant de pour nous donner la force
d'atteindre nous but et d'accomplir nous travail.*

*Avec mes remerciements les plus sincères s'adressent à mon encadreur **GUERFI Youcef**
enseignant à l'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued pour son présence et son
pragmatisme exemplaire qui a donné un véritable sens à notre travail.*

*Nous tenons à remercier le comité d'évaluation d'avoir accepté de discuter de notre mémoire de fin
d'études*

*Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ne mentionnent pas qui prés ou ont
participé à ce jour dans la réalisation de ce travail.*

Résumé:

Titre du mémoire: modélisation et simulation d'un système hybride (turbine éolienne - générateur synchrone) pour une compagnie isolée.

Mots clés: générateur diesel, turbine éolienne, générateur synchrone, générateur asynchrone, *MATLAB /SIMULINK*, Automate Programmable Industriel (*API*) .

Résumé : Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude d'un système hybride composé de deux types de source, celle d'un groupe électrogène et l'autre d'une turbine éolienne, ces sources alimente deux types des charges une principale et d'autre secondaire. le générateur diesel est à vitesse variable, il fonctionne comme un complément de la turbine éolienne. Nous avons simulé ce système premièrement par *Matlab /Simulink* puis par l'Automate Programmable Industriel (*Zelio de schneider electric*) en langage *Ladder*. Tous les grandeurs fondamentaux sont simulé et interprété.

Abstract:

Rapport title: modeling and simulation of a hybrid system (wind turbine –synchronous generator)for an isolated company.

Keywords: diesel generator, wind turbine, synchronous generator, asynchronous generator, *MATLAB /SIMULINK*, Programmable Logic Controller (*PLC*).

Abstract: In this work, we were interested in the study of a hybrid system composed of two types of source, that of a generator and the other of a wind turbine, the two types of sources feed two loads a main and other secondary. the diesel generator is variable speed, it works as a complement to the wind turbine. We simulated this system first by *Matlab / Simulink* then by the Industrial Programmable Logic Controller (*Zelio from schneider electric*) in *Ladder* language. All fundamental sizes are simulated and interpreted.

ملخص:

عنوان المذكرة: نمذجة ومحاكاة لنظام هجين (توربينات الرياح - مولد مترامن) لشركة معزولة.

الكلمات المفتاحية: مولد ديزل، توربينات الرياح، مولد مترامن، مولد غير مترامن، *MATLAB / SIMULINK*، وحدة تحكم منطقية قابلة للبرمجة (*API*).

الملخص: في هذا العمل، يتعلق بدراسة نظام هجين مكون من نوعين من المصادر، أحدهما مولد ديزل والآخر توربينات الرياح، هذان النوعان من المصادر يغذيان حملتين أحدهما رئيسية والآخر ثانوية. مولد الديزل متغير السرعة، ويعمل كمكمل لتوربينات الرياح. قمنا بمحاكاة هذا النظام أولاً بواسطة *Matlab/Simulink* ثم بواسطة وحدة التحكم المنطقي الصناعي القابل للبرمجة (*زيليو من شneider إلكترونيك*) بلغة *لادار*. تمت محاكاة جميع المتغيرات الأساسية وتفسيرها.

Sommaire

Sommaire	
Remerciements	II
Résumé	III
Sommaire	IV
Liste des tableaux	VII
Liste des figures	VIII
Liste des notations et des symboles	XI
Introduction Générale	1
Chapitre I: État de l'art du Système	
I.1. Introduction	5
I.2. Définition de l'énergie éolienne	5
I.3. Classement des turbines éoliennes	6
I.3.1 .Eoliennes à axe horizontal	7
I.3.2 . Eoliennes à axe vertical	8
I.4. Les principaux composantes des éoliennes(à axe horizontal)	9
I.5. Principe de fonctionnement des éoliennes	11
I.6. La Génératrice asynchrone	12
I.6.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil	13
I.6.2.Machine asynchrone à double alimentation	15
a. Structure des machines asynchrones a doble alimentation	15
I.7.Moteurs à combustion interne	16
I.7.1. Le moteur diesel	17
I.7.2.Cycle du moteur a quatre temps	18
I.7.3. Groupe électrogène diesel	20
I.8. Généralités sur la machine synchrone	21
I. 8.1 Générateur Synchrone	22
I.8.2.Générateur Synchrone à Rotor Bobiné	23
I.8.3. Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)	23
I.9.Conclusion	24

Chapitre II : Modélisation du Système	
II.1 Introduction	26
II.2. Modélisation du chaîne éolienne	26
II.2.1. Modélisation du vent	27
II.2.2. Modélisation de la turbine	28
II.2.3. Modèle de la Turbine	28
II.2.4. Modèle du multiplicateur	30
II.2.5. Modèle de l'arbre	31
II.3. Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation	32
II.3.1. Equations électriques	33
II.3.2. Équations magnétiques	34
II.3.3. Equation mécanique	36
II.3.4. Modèle de Park	36
II.3.5. Choix du référentiel	36
II.3.6. Expression de la puissance et du couple électromagnétique	40
II.3.7. Couple électromagnétique	40
II.4. Modélisation du groupe électrogène diesel	41
II.4.1. Modèle du moteur diesel	41
II.4.2. Production du couple mécanique	42
II.4.3. Le régulateur de vitesse	44
II.5. La Génératrice synchrone	46
II.5.1. Equations magnétiques	47
II.5.2. Équations électriques	47
II.5.3. Equations électriques dans le repère de Park (d q)	48
II.5.4. La matrice sous forme d'équation d'état	50
II.6. Conclusion	51
Chapitre III : Programmation, Simulation et interprétation des résultats	
III.1. Introduction	53
III.2. Avantage de la Simulation sous l'environnement <i>matlab/Simulink</i>	53
III.3. Avantage de la Simulation par <i>zelio/schneider</i>	54

III.4. Simulation sous l'environnement <i>Matlab/Simulink</i>	54
III.4.1. Description de système	54
III.4.2. Description de la régulation	55
III.4.3. Les résultats de simulation	59
III.4.4 Interprétation des résultats de simulation	61
III.5. Simulation sous l'environnement Zelio Soft 2 (langage Ladder)	62
III.5.1. Description de système	62
III.5.2. Grafcet de fonctionnement	63
III.5.2.1. Définition	63
III.5.2.2. Schématiquement de Grafcet du système	64
III.5.2.3. Grafcet du système du point de vue opérative	65
III.5.2.4. Mise en équations du programme	66
III.5.2.5. Schéma du programme : (voir l'annexe)	67
III.6. Conclusion	67
Conclusion Générale	68
Références bibliographies	71
Annexes	76

Liste des Tableaux

Titre	Page
Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes	6

Liste des Figures

Titre	Page
Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Figure I.2 : Turbine éoliennes à axe horizontal	6
Figure I.3 : Turbine éoliennes à axe vertical	6
Figure I.4 : Types d'éoliennes à axe horizontal	8
Figure I.5 : Schéma du rotor de Savonius	9
Figure I.6: Schéma de principe du rotor de Savonius	9
Figure I.7: Schéma du rotor de Darrieus	9
Figure I.8: Photographie d'une éolienne de Darrieus	9
Figure I.9: Principaux composants d'une éolienne	11
Figure I.10: Caractéristique <i>couple/vitesse</i> d'une machine asynchrone à 2paires de pôles	13
Figure I.11: Connexion directe d'un machine asynchrone sur le réseau	14
Figure I.12: Structure du stator et des contacts rotoriques de la <i>MADA</i>	15
Figure I.13: Cascade hypo synchrone	16
Figure I.14: Les éléments du moteur diesel	18
Figure I.15: Composants principaux d'un moteur alternatif à pistons	18
Figure I.16: Cycle de fonctionnement d'un moteur diesel à 4 temps	19
Figure I.17: Configuration du générateur diesel	21
Figure I.18: Différents types des machines synchrones	22

Figure II.1: Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie	26
Figure II.2: Différent partie de la turbine	28
Figure II.3: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ	30
Figure II.4: Modèle de la turbine éolienne	32
Figure II.5: Machine asynchrone modélisée - définition des repères stator et rotor	33
Figure II.6: Les repères (d, q) lié au stator	38
Figure II.7: Les repères (d, q) lié au rotor	39
Figure II.8: Les repères (d, q) lié au rotor	39
Figure II.9: Modèle de la partie mécanique du groupe diesel	44
Figure II.10: Régulateur de vitesse construit autour d'un régulateur PI	45
Figure III.1: Image représente le module schneider 4 entrée / 4sortie (Réf : SR2 B121BD)	54
Figure III. 2: Schéma bloc de système (Turbine éolienne – Générateur diesel)	56
Figure III. 3: Schéma bloc de la turbine éolienne	56
Figure III.4: Schéma bloc du Générateur Synchrone (<i>Modèle Mécanique</i>)	57
Figure III.5: Schéma bloc du Générateur Synchrone (<i>Modèle Electrique</i>)	57
Figure III.6: Schéma bloc du Générateur Asynchrone (<i>Modèle Mécanique</i>)	58
Figure III.7: Schéma bloc du Générateur Asynchrone (<i>Modèle Electrique</i>)	58
Figure III.8: Schéma bloc du système de régulation	58
Figure III.9: La Tension de générateur synchrone	59
Figure III.10: Le Courant de la charge secondaire	59
Figure III.11: La Fréquence à la sortie de la régulation	59
Figure III.12: La Vitesse de rotation de générateur asynchrone	59

Figure III.13: La puissance électrique de la turbine éolienne	60
Figure III.14: La puissance électrique de générateur synchrone	60
Figure III.15: La puissance électrique de la charge principale	60
Figure III.16: La puissance électrique de la charge secondaire	60
Figure III.17: Les Caractéristiques <i>Puissance/Vitesse</i> de la turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent (1 Pu = 275 Kw)	61
Figure III.18: Représentation et description du système	62

Liste des notations et des symboles

CA	Courant Alternatif
GD	Groupes Diesel
MS	Machine Synchrone
GSAP	Générateur Synchrone à Aimants Permanents
GADA	Générateur Asynchrone à Double Alimentation
$V(t)$	Vitesse du vent
P_V	Puissance mécanique
S	la surface circulaire balayée par la turbine
ρ	Masse volumique de l'air
P_D	Puissance du vent
λ	Rapport de vitesse
β	l'angle de l'orientation de la pale
C_T	Le couple mécanique à la sortie de la turbine
C_{mec}	Couple mécanique adaptant la vitesse de la turbine à celle du générateur
G	Gain ou Rapport de multiplication
Ω_T	Vitesse linéaire des pales
Ω_g	Vitesse du générateur(rad/s mécanique)
J_T	l'inertie totale
J_{tur}	l'inertie de la turbine
C_g	Couple issu du multiplicateur
C_{vis}	Couple des frottements visqueux
f_T	Coefficient de frottements visqueux

abc	Les axes dans le repère naturel
V_S	Tension statorique
V_R	Tension rotorique
I_S	Courant statorique
I_R	Courant rotorique
R_S	Résistance statorique
R_R	Résistance rotorique
Φ_S	Flux statorique
Φ_R	Flux rotorique
L_s	L'inductance propre d'une phase statorique
L_r	L'inductance propre d'une phase rotorique
M_s	L'inductance mutuelle entre phases statoriques
M_r	L'inductance mutuelle entre phases rotoriques
C_{em}	Couple électromagnétique
d, q	les axes dans le repère de Park
θ_s	Position des grandeurs statoriques
θ_r	Position du rotor
ω_S	Pulsation statorique
ω_r	Vitesse électrique de rotation
p_{ci}	Désigne le pouvoir calorifique inférieur du carburant
η_i	Le rendement indiqué du moteur
m_f	Le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion
C_y	La cylindrée totale du moteur
C_r	Le couple résistant dû à la charge appliquée
p_{mf}	La pression moyenne des pertes par frottement

T_{Dm}	Couple mécanique écrit dans le plan de Laplace
T_{De}	La réaction électromagnétique
ω_{Dm}	La vitesse de rotation
ω^{ref}	La vitesse de référence
$K_{Di,p}, K_{Dr}$	paramètre de régulateur
U_S	Tension statorique de la machine synchrone
U_f	Tension rotorique de la machine synchrone
i_s	Courant statorique de la machine synchrone
i_f	Courant rotorique de la machine synchrone
Ψ_s	flux statorique de MS
Ψ_f	flux rotorique de MS
FMU	Functional Mockup Units
PLL	Phase Locke d Loop
PID	Proportionne l intégral dérivation
API	automate programmable industriel

Introduction générale

Introduction Générale

Aujourd'hui, plus de 85% d'énergie utilisée dans le monde provient de gisement de combustible fossile (*charbon, pétrole, gaz*) ou d'uranium, constitués au fil des âges et de l'évolution géologique. La limitation de la quantité de ces réserves et l'accroissement de la demande d'énergie dans tous les pays du monde ont conduit les pays industrialisés à chercher et à développer de nouvelles sources d'approvisionnement. La filière nucléaire était déjà lancée, mais son choix à grande échelle peut amener des conséquences graves, surtout à l'environnement, à cause de la pollution et aussi les accidents nucléaires. Les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite «*énergie renouvelable*». Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes puisqu'elles n'émettent pas de gaz favorisant l'effet de serre, *CO2*.

C'est pour ces raisons, que nous allons ici nous intéresser à un des outils permettant de produire une énergie renouvelable: les éoliennes. En effet, elles sont aujourd'hui de plus en plus répandues dans le monde.

L'intérêt de ce travail est d'effectuer une modélisation et simulation d'un système hybride (turbine éolienne - générateur diesel); donc nous choisisrent une éolienne à vitesse variable associée par un générateur asynchrone.

Donc principalement ce travail est basé sur l'étude d'un système hybride composé de deux sources, et deux types de sources: une du groupe électrogène et l'autre d'une turbine éolienne, ces sources alimentent deux charges (principale et secondaire). Pour obtenir les objectifs fixés notre travail est structuré comme suit :

La première partie de ce travail est consacrée à l'état de l'art du système, Nous présentons tout d'abord les différents éléments d'une éolienne. Puis dans la tâche qui suit, nous montrons comment elle fonctionne, autrement dit comment à partir d'un élément naturel, le vent, nous arrivons à générer de l'électricité. En effet, c'est une conversion énergétique (*cinétique – électrique*).

Puis quelque généralité sur les générateurs asynchrones, ainsi que des notions sur les moteurs diesels, les groupes électrogènes et les générateurs synchrones.

La deuxième partie est consacré purement à la modélisation du notre système, c'est-à-dire la chaîne éolienne, le générateur asynchrone, le moteur à combustion interne diesel et finalement le générateur synchrone .

Le dernier chapitre, illustre la simulation du système par deux outils numérique, premièrement sous l'environnement *Matlab/Simulink*, et puis par l'automate *Zelio* avec la programmation en langage *Ladder*. Tous les résultats sont simulés et interprétés.

Finalement, une conclusion générale propose une perspective après les discussions des résultats obtenus.

Chapitre I:

État de l'Art du Système

I.1 Introduction :

Aujourd'hui, l'énergie renouvelable est très utilisée pour la production de l'énergie électrique, grâce aux avantages qu'elle nous donne (énergie propre, gratuite, représentent une bonne alternative aux ressources fossiles,.....).

Parmi les sources renouvelables, on compte l'énergie éolienne, le rôle de cette dernière est la conversion énergétique du vent (*cinétique - électrique*). les éléments des éolienne sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et, d'une façon générale. Il y a Plusieurs technique pour convertir l'énergie du vent (à axe vertical ou axe horizontal).

Comme définition de la *MAS* on peut dire que c'est une machine à courant alternatif avec une séparation entre le stator et rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines et la fréquence des courants qui la traversent n'est pas forcément proportionnelle en parle ici du glissement.

Ce chapitre est consacré principalement à l'état de l'art de notre système.

I.2 Définition de l'énergie éolienne:

- L'éolienne, est un dispositif qui permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique à l'aide d'une génératrice (Figure 1-1) [1].

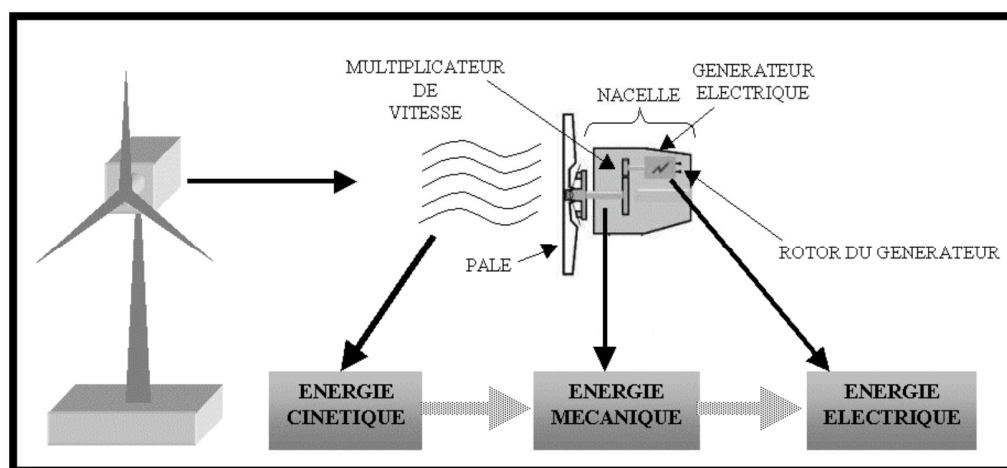


Figure. I.1 :Conversion de l'énergie cinétique du vent [1].

L'énergie éolienne est considérée comme une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée) [1]. Aussi l'énergie éolienne est définie comme une énergie qui ne produit ni émission ni déchet radio actif dans l'atmosphère, elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions [2].

Il existe différentes solutions techniques pour récolter l'énergie éolienne de manière significative. Le tableau (1-1) montre la classification des éoliennes.

ECHELLE	DIMETRE DE L'HELICE	PUISSANCE DELIVREE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m a 45 m	De 40KW a 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I-1: classification des turbines éoliennes [3].

I.3 Classement des Turbines Eoliennes:

Les éoliennes sont classées en deux types selon leur axe de rotation:

turbine Eoliennes à axe horizontal et turbine Eoliennes à axe vertical

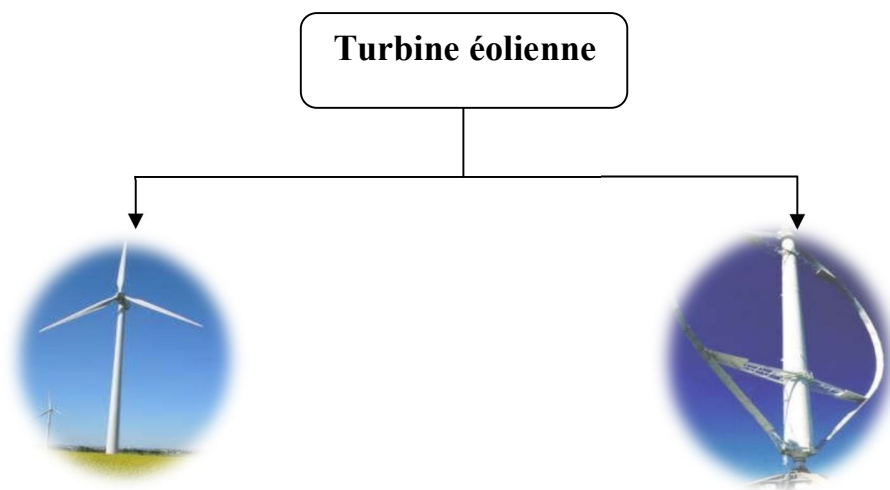


Figure I.2: Turbine éoliennes à axe horizontal [4]. **Figure I.3 :** Turbine éoliennes à axe vertical [4].

I.3.1 Éoliennes à axe horizontal:

Les aérogénérateurs à axe horizontal sont les plus largement utilisées aujourd'hui [5] et ces éoliennes sont basées sur la technologie éolienne ancienne [3]. Ces turbines dominent actuellement le marché (deux ou trois pales) [6] et sont constituées de plusieurs pales aux caractéristiques aérodynamiques, comme les ailes d'un avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir l'avion en vol, mais plutôt pour créer un couple moteur qui provoque la rotation. Le nombre de pales utilisées pour la production d'électricité est généralement compris entre 1 et 3, et le rotor tripale est le plus couramment utilisé car il s'agit d'un compromis entre le facteur de puissance, le coût et la vitesse du collecteur de vent. Ce type d'éolienne a dépassé celles à axe vertical, car il représente des coûts moindres, est moins soumis aux contraintes mécaniques et le récepteur est situé à des dizaines de mètres au-dessus du sol pour augmenter l'efficacité. A noter cependant que certains travaux défendent la viabilité des rotors verticaux en menant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude seront limités au cas des éoliennes à axe horizontal [3] (Figure I.2).

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (Figure I-4):

- **Amont** : L'avant de la pale où le vent souffle vers la nacelle. la lame est Rigide, le rotor est orienté par un dispositif en fonction de la direction du vent [7].
- **Aval** : Le vent souffle de la nacelle vers l'arrière de la pale. Le rotor est souple, Ajustable. La disposition de la turbine en amont est la plus couramment utilisée car elle est plus simple et donne Meilleurs résultats à haute puissance : pas de surfaces de contrôle, l'effort de manœuvre est Moins important, meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent Faires toujours face à la direction du vent. Il existe à cet effet des dispositifs directionnels La cabine suit cette orientation[7].

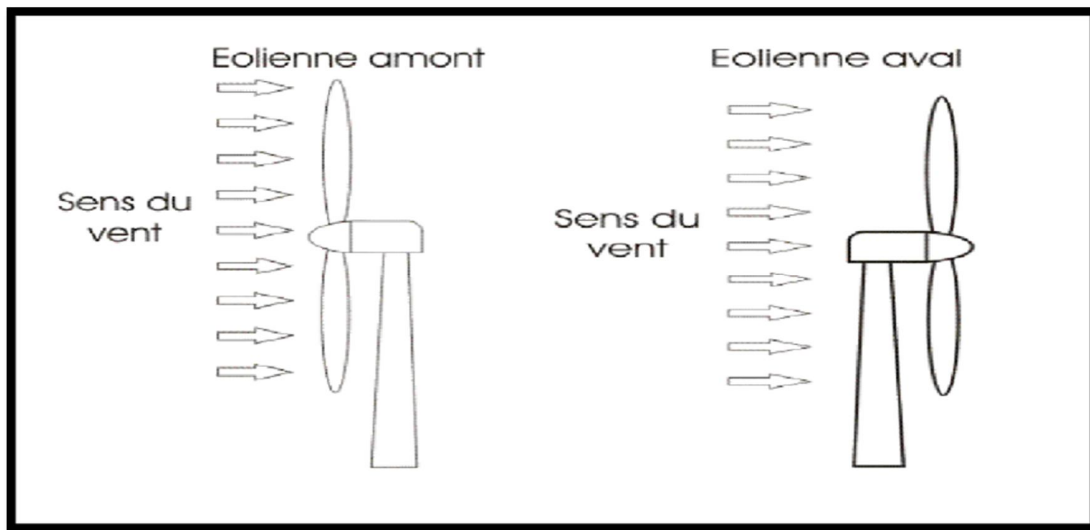


Figure I.4 : Types d'éoliennes à axe horizontal [7].

I.3.2 Eoliennes à axe vertical:

Ce type d'éolienne est l'une des premières structures développées pour produire de l'électricité [8] (Figure I.3), ce type d'éolienne a donc fait l'objet de nombreuses recherches [9]. L'axe de rotation de ce type d'éolienne est perpendiculaire à la direction du vent et perpendiculaire au sol. Ce type d'éolienne peut recevoir des vents de n'importe quelle direction, ce qui le caractérise par l'absence de besoin d'un système de guidage [10]. Les éoliennes à axe vertical ont des tours très courtes, dont la hauteur varie de 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor [11]. Le générateur et le multiplicateur sont disposés au niveau du sol et c'est plus simple et donc économique, et le système est facile à entretenir car il est fait au sol [10]. Cependant, les vents sont plus faibles près du sol, ce qui entraîne un mauvais rendement, car ces éoliennes souffrent de la turbulence du vent. De plus, ces éoliennes doivent être allumées au démarrage et le mât est soumis à de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, les fabricants d'éoliennes préfèrent aujourd'hui les éoliennes à axe horizontal [11].

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup ont échoué, mais deux structures ont franchi une étape de fabrication [1]. Les deux structures sont construites sur les principes de traînée différentielle ou de variation cyclique d'incidence [11]:

- **Rotor Savonius**, dont le fonctionnement est basé sur le principe de la résistance différentielle. La force exercée par le vent de part et d'autre du corps creux a des intensités différentes. Cela crée un couple qui entraîne l'ensemble en rotation [11].

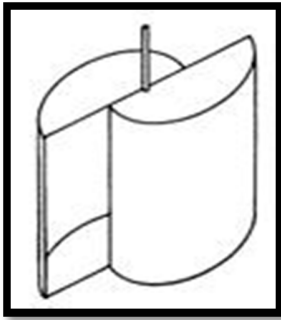


Figure I.5: Schéma du rotor de Savonius[11]

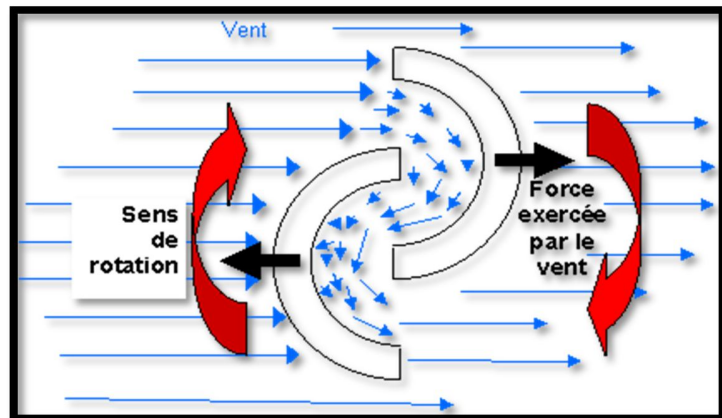


Figure I.6: Schéma de principe du rotor de Savonius[11].

- **Le rotor de Darrieus** est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Les profils placés dans le flux d'air à différents angles subissent des forces d'intensités et de directions variables. La somme de ces forces produit alors le couple moteur qui entraîne l'appareil en rotation[11].

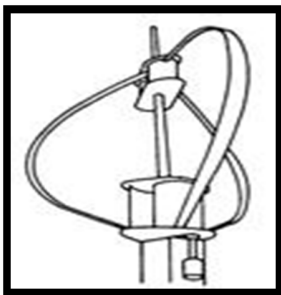


Figure I.7 : Schéma du rotor de Darrieus[11]



Figure I.8: Photographie d'une éolienne de Darrieus[11]

I.4 Les principaux composants des éoliennes (à axe horizontal)

Il existe de nombreuses variantes dans la configuration des éoliennes "classique", mais elles se composent généralement de 3 éléments principaux :

a. Mât

Les mâts sont généralement des tuyaux en acier ou des pylônes en treillis. Il supporte le rotor et la nacelle. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition aux vents recherchée. En effet, plus on augmente la hauteur du mât, plus la vitesse du vent et le coût de la structure augmentent également. Généralement, on choisit une taille de mât légèrement supérieure au diamètre des pales. La hauteur des éoliennes varie entre 40 et 80 mètres.

Le mât contient les câbles qui assurent la connexion au réseau de distribution[11].

b. La nacelle

En combinant tous les éléments mécaniques entre eux, il est possible de connecter une éolienne à Générateurs : arbres lents et rapides, roulements, multiplicateurs. Les freins à disque, contrairement aux freins aérodynamiques, permettent au système de s'arrêter en cas de surcharge. Un générateur, généralement une machine synchrone ou asynchrone, et des systèmes hydrauliques ou électriques de positionnement des pales (freins aérodynamiques) et de la nacelle (nécessaires pour maintenir la surface balayée par l'éolienne perpendiculairement à la direction du vent). [7].

c. Le rotor

Formé par des pales assemblées dans un moyeu. Pour les éoliennes destinées à production d'électricité, le nombre de pales varie généralement de 1 à 3, rotor tripale(concept danois) est de loin le plus courant car il représente un bon compromis entre les deux coût, comportement vibratoire, sonore et pollution visuelle [1].

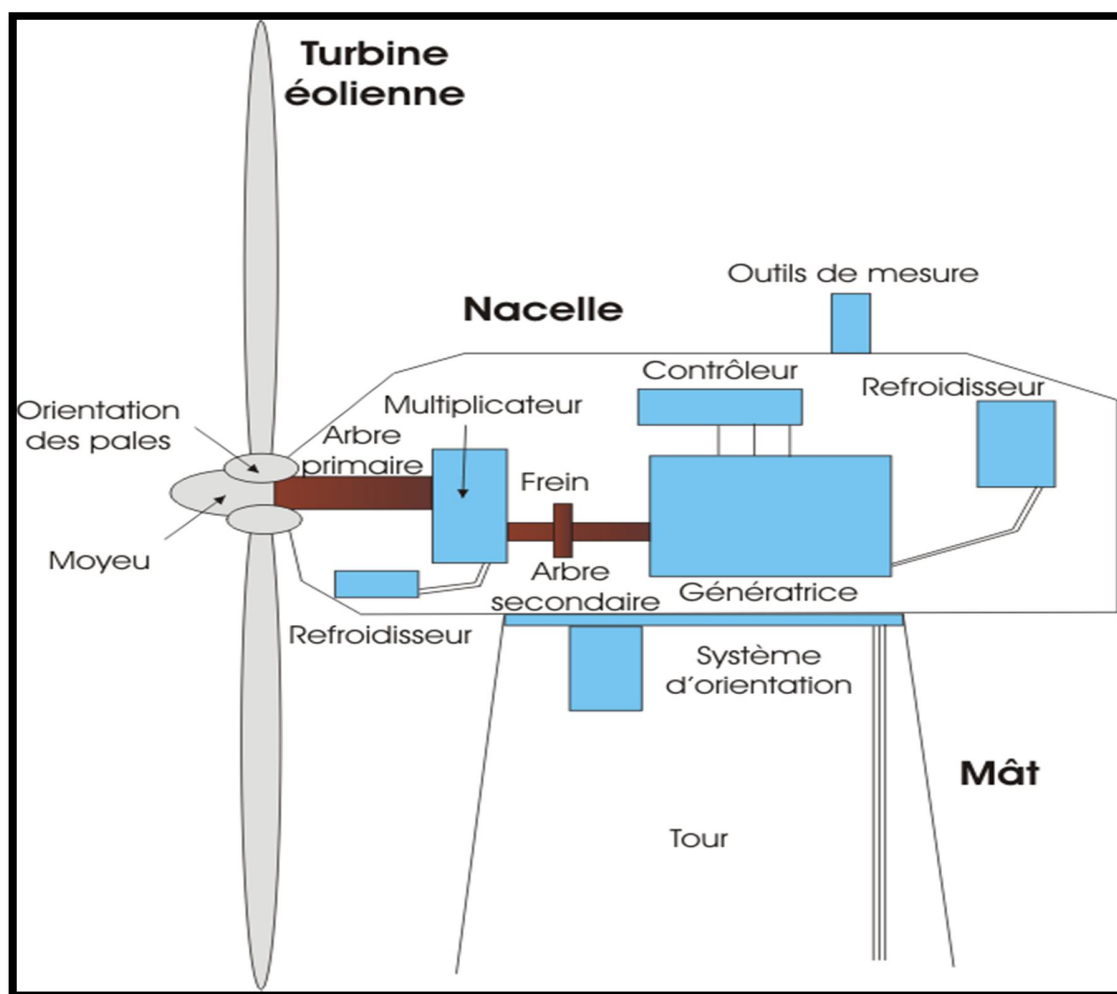


Figure. I.9 : Principaux composants d'une éolienne [7].

I.5 Principe de fonctionnement des éoliennes :

Les éoliennes d'aujourd'hui convertissent une énorme quantité d'énergie éolienne en électricité grâce à des lames développées avec une technologie d'analyse aérodynamique, le courant d'air passe des deux côtés de la lame et la forme de la lame contribue à rendre la pression d'air inégale et est élevée d'une part et basse de l'autre, ce qui la pousse à tourner. Cette pression variable provoque la circulation des aubes autour du centre de la turbine. Cependant, il n'est pas possible de relier directement ce mouvement de circulation au générateur parce que la vitesse de rotation des aubes des moulins à vent est très faible en raison du bruit produit et de la force mécanique avant que la turbine ne soit connectée au générateur, la vitesse est augmentée à l'aide d'un outil appelé le boîtier de vitesse composé d'engrenages planétaires pour obtenir la vitesse de rotation la plus élevée et contient également les freins dont le rôle est contrôlé par les conditions météorologiques.

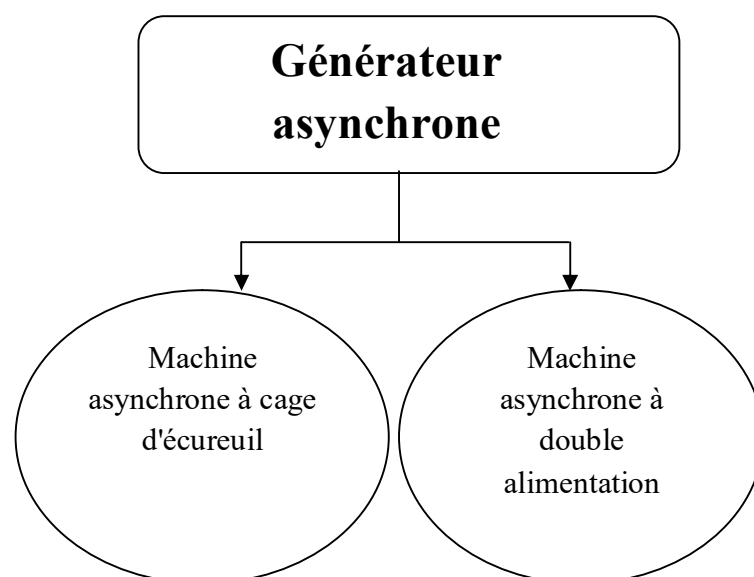
Puisque la direction du vent peut changer à tout moment ici le capteur de vitesse est placé sur la surface du gazon pour mesurer le mouvement du vent et sa direction pour autant d'énergie que possible.

Les éoliennes sont à haute altitude parce que plus elles s'élèvent dans le ciel, plus leur part du vent et des vents plus raisonnables signifie plus d'électricité.

I.6 La Génératrice asynchrone :

La Génératrice asynchrone représente aujourd'hui la configuration la plus répandue dans le monde. L'écoulement du vent dans la turbine étant en constante fluctuation, ce type de machine peut fonctionner à vitesse variable tout en respectant les contraintes de la fréquence et de la tension[12]. Faible coût et standardisation des moteurs asynchrones, pas besoin de la complexité de l'installation s'est traduite par une très grande prédominance de ce type de groupe électrogène Jusqu'à plus de mégawatts de puissance. c'est généralement lié à la batterie Condensateur et démarreur automatique progressif avec variateur ou résistance peut limiter l'état de courant d'appel momentané lors de la connexion Réseau, faibles besoins de maintenance, faible taux d'échec très lent. Dans une éolienne dans la dimension résultante, la vitesse de rotation est faible Haut. Il faut donc insérer un Multiplicateur de vitesse mécanique. Dans la littérature, certains travaux de recherche ont été appliqués pour étudier Conversion de l'énergie éolienne en utilisant des moteurs asynchrones comme générateurs[2].

Deux types des machines asynchrones sont existé: le machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones double alimentation (*MADA*).



I.6.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil:

Différent des autres méthodes traditionnelles de production d'énergie Les alternateurs synchrones sont largement utilisés, à savoir les générateurs asynchrones à cage d'écureuil Il équipe actuellement un grand nombre d'éoliennes installées dans le monde.

La plupart Les applications utilisant des moteurs asynchrones sont destinées à fonctionner moteurs électriques (qui représentent également un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais La machine est entièrement réversible, ses qualités de robustesse et de faible coût et Il n'y a pas de balais de collecteur ni de contacts glissants sur l'anneau, ce qui le rend complètement Convient aux conditions extrêmes où l'énergie est parfois présente éolienne[13]. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure(I.10) [14] .

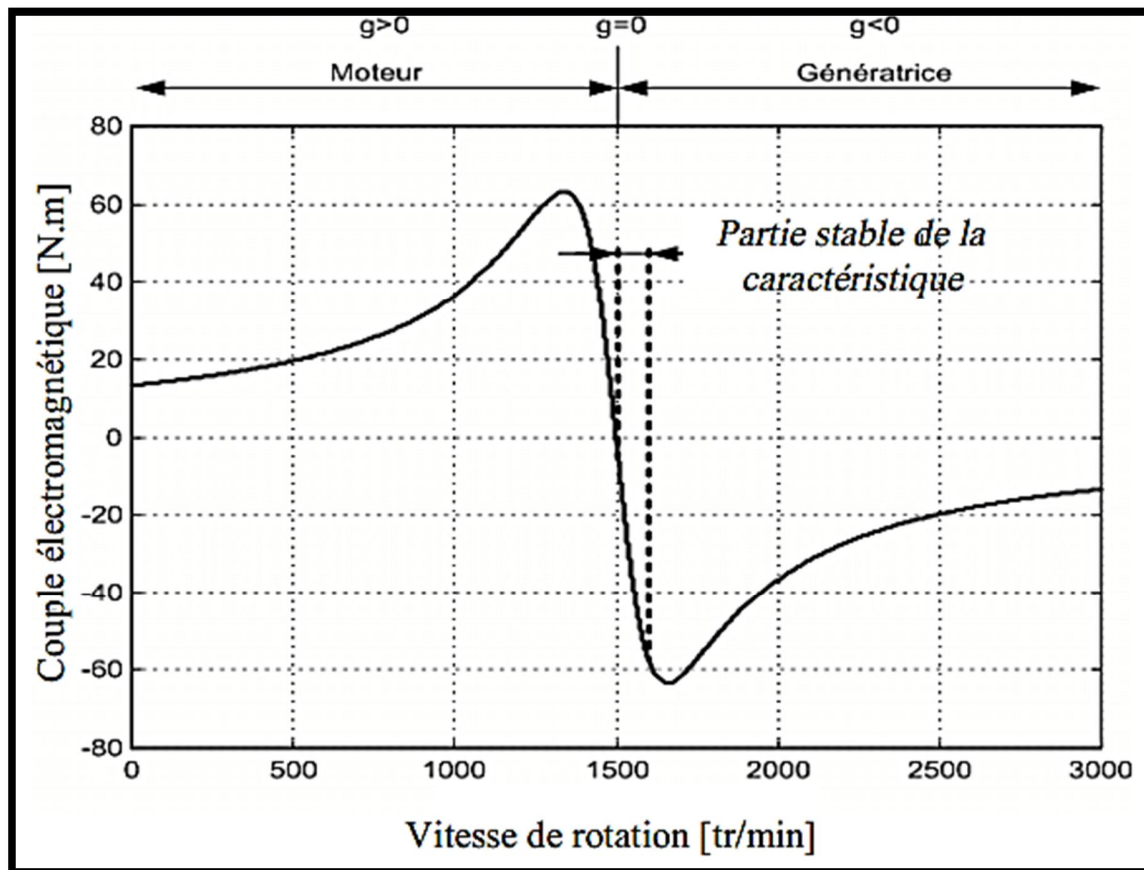


Figure I.10: Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles[14]

Afin d'assurer le fonctionnement stable de l'équipement, le générateur doit maintenir une certaine vitesse La rotation est proche du synchronisme ($g=0$ point), dans le cas des caractéristiques suivantes (Figure I.10), la vitesse du générateur doit être maintenue entre 1500 et 1600 tr/min .

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé est le couplage mécanique le rotor du moteur asynchrone traverse l'arbre d'entraînement de l'éolienne Connexion directe au stator de la machine via un multiplicateur de vitesse au réseau (Figure I.11).

La machine a un nombre fixe de paires de pôles, elle doit donc fonctionner dans une certaine plage vitesse très limitée (moins de 2% de glissement). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, le courant stator de la machine augmente et peut devenir destructeur.

La configuration du système est simple (pas d'interface entre le stator et le réseau et Aucun contact glissant) peut réduire l'entretien de la machine.

Cependant, ce type de convertisseur électromécanique est consommateur d'énergie réactive nécessaire pour la magnétisation du rotor du moteur, ce qui réduit le facteur de puissance réseau global, mais peut être amélioré en ajoutant de la capacité Comme le montre la figure (I.11), il devient la seule source de puissance réactive Le cas du fonctionnement autonome des éoliennes[15].

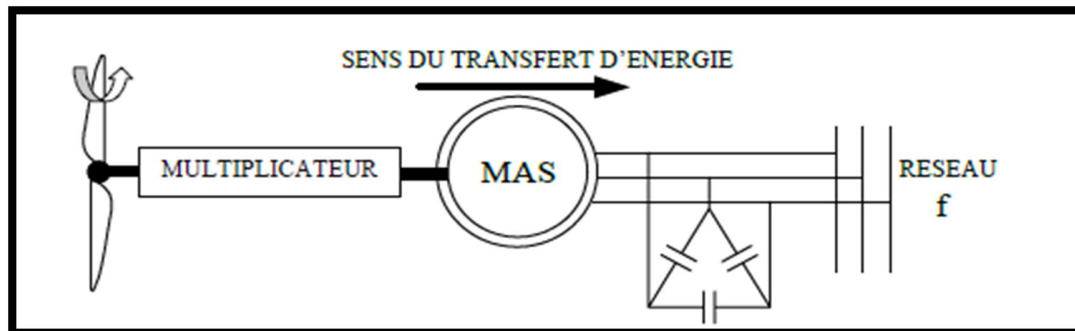


Figure I.11: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau[15]

Malgré sa simplicité, un système d'exploitation à vitesse fixe peut être bruyant Étant donné que l'orientation des pales modifie les propriétés aérodynamiques, et il n'utilise pas toute la puissance théoriquement disponible à la vitesse du vent Haut. La machine est alors naturellement protégée des surcharges, mais l'efficacité Les éoliennes sont fortement réduites. De plus, le couple mécanique change fréquemment Étant donné que le système d'orientation des lames est généralement actif pour compenser vitesse du vent. Ces variations de couple provoquent des variations brutales du courant délivré Sur Internet, provoquant une agitation[16].

I.6.2 Machine asynchrone à double alimentation:

Par les générateurs synchrones, c'est aujourd'hui l'une des deux solutions concurrentes éolienne à vitesse variable [17].

Stator de générateur couplé directement au réseau généralement constitué par un transformateur. à la place du rotor a cage d'écureuil, ces moteurs asynchrones possèdent un rotor bobiné dont la régulation électronique assurez-vous que le glissement change[18].

Actuellement, la plupart des projets éoliens supérieurs à 1 MW sont basés sur l'utilisation Un moteur asynchrone commandé par un rotor. Son circuit de stator est directement relié au réseau électrique. Un deuxième circuit placé sur le rotor est également connecté au réseau, mais via un convertisseur de puissance. Compte tenu de la faible puissance rotorique transmise, le coût du convertisseur Par rapport aux éoliennes à vitesse variable alimentées au stator, la réduction convertisseur de puissance.

C'est la principale raison pour laquelle nous trouvons ce générateur en production Une force formidable. La deuxième raison est la possibilité d'ajuster la tension au point La connexion à injecter dans ce boulder[19].

a Structure des machines asynchrones à double alimentation:

Le stator d'un moteur asynchrone à double alimentation est similaire à Machines triphasés traditionnels (à cage asynchrone ou synchrone), généralement constitués de Feuilles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles enroulement [1].

L'idée de cette machine est que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans des fentes d'un empilement de plaques minces, mais est constitué de trois enroulements connectés en étoile dont les extrémités sont accessibles de l'extérieur aux balais par des anneaux conducteurs au frottement dessus (Figure I.12) [20].

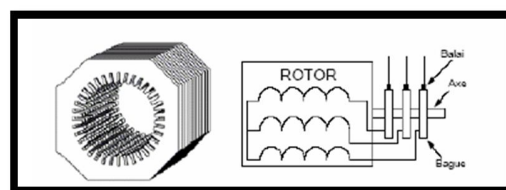


Figure I.12: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA [21].

En fonctionnement moteur, les moteurs asynchrones à rotor bobiné présentent un premier intérêt pour Possibilité de modifier les caractéristiques du bobinage du rotor du moteur, notamment par Connectez un rhéostat pour limiter le courant et augmenter le couple démarrage et la possibilité d'augmenter la plage de changements de vitesse. Au lieu de dissiper l'énergie du rotor dans une résistance, ajoutez un convertisseur entre les enroulements du rotor et le réseau permet de renvoyer cette énergie vers le réseau (énergie Si la machine est en cage, elle est généralement dissipée par effet Joule dans la tige), Les performances de la machine sont ainsi améliorées, ce qui est le principe de la cascade sous-synchrone [15].

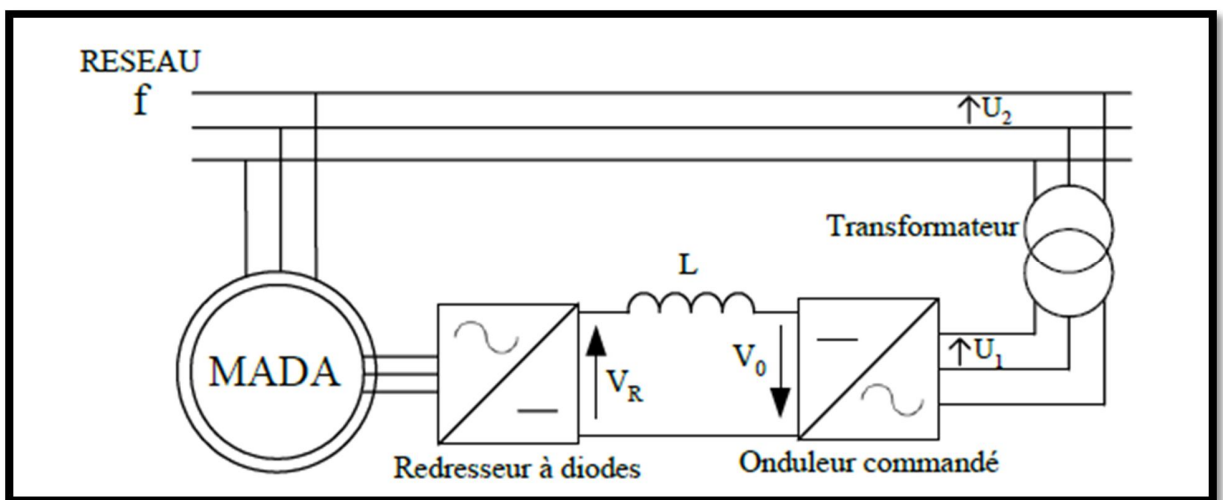


Figure I.13: Cascade hypo synchrone[15].

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages (Double alimentation par le stator , Double alimentation par le stator et le rotor).

I.7 Moteurs à combustion interne

Le type d'entraînement le plus courant dans les véhicules est le moteur à combustion interne [22]. Et généralement identifié comme facteur important influant l'efficacité, les émissions d'échappement et les performances des moteurs[23]. Ils développent de la puissance en convertissant l'énergie chimique contenue dans le combustible en chaleur puis en convertissant cette chaleur en travail mécanique. La conversion de l'énergie chimique en énergie thermique est réalisée par la combustion, et la conversion de l'énergie thermique en travail mécanique est réalisée par

l'action de ce dernier sur le fluide de travail. La pression du fluide de travail augmente d'abord, et l'expansion ultérieure produit du travail.

Les fluides moteurs possibles sont des liquides qui augmentent la pression de fonctionnement par vaporisation ou des gaz qui peuvent augmenter la pression de fonctionnement par compression. La combustion du carburant, généralement composé d'hydrocarbures, nécessite de l'oxygène, qui est généralement introduit avec l'air d'admission. Si la combustion se produit dans la chambre de travail, il s'agit d'une combustion interne. Dans ce cas, les gaz de combustion agissent directement comme fluide moteur et un travail mécanique continu ne peut être obtenu que par un processus cyclique (moteur à pistons) ou par un processus continu d'absorption de chaleur, de détente (travail de production) et de retour du fluide à son état initial. état d'origine (cycle de travail).

Si le fluide moteur est altéré lors de l'absorption de chaleur, par exemple en utilisant une partie de ses constituants comme oxydant, il ne peut être restauré dans son état initial que par remplacement. Ce processus est appelé «cycle ouvert» et se caractérise par un remplacement cyclique des gaz (élimination des gaz de combustion et introduction d'une charge fraîche). C'est pourquoi la combustion interne nécessite toujours un cycle ouvert[22].

I. 7.1 Le moteur diesel

Le moteur Diesel qui équipe les automobiles que nous connaissons à ce jour est le fruit d'une évolution constante .

Cette évolution a subi des accélérations en fonction de circonstances telles que le premier choc pétrolier et l'apparition des normes antipollution 1897[24].

C'était le premier moteur conçu par l'ingénieur thermicien, Rudolf Diesel, le moteur diesel .Il s'agit d'un moteur à allumage par compression ayant un rendement très élevé par rapport à les machines à vapeur et les moteurs à essence. Les premiers moteurs diesel rejoignent le monde de l'industrie sont reliés plus précisément avec le marché d'automobile dans les années 1920.

La combustion dans les moteurs diesel s'effectue avec un mélange hétérogène composé d'air et de carburant diesel. Ce mélange est favorable à l'auto-inflammation et n'a donc pas besoin d'étincelle pour s'enflammer. Au début, le diesel est injecté dans le cylindre par une pompe à air mais avec les évolutions de la technologie, le carburant est injecté au moyen d'un système de pression plus élevé qui pulvérise le carburant. La Figure I.14 présente les différents éléments d'un moteur diesel [2].

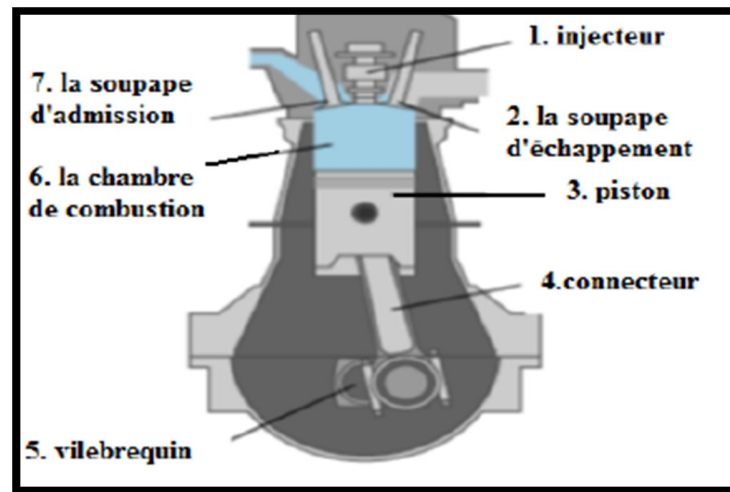


Figure I.14: Les éléments du moteur diesel [2].

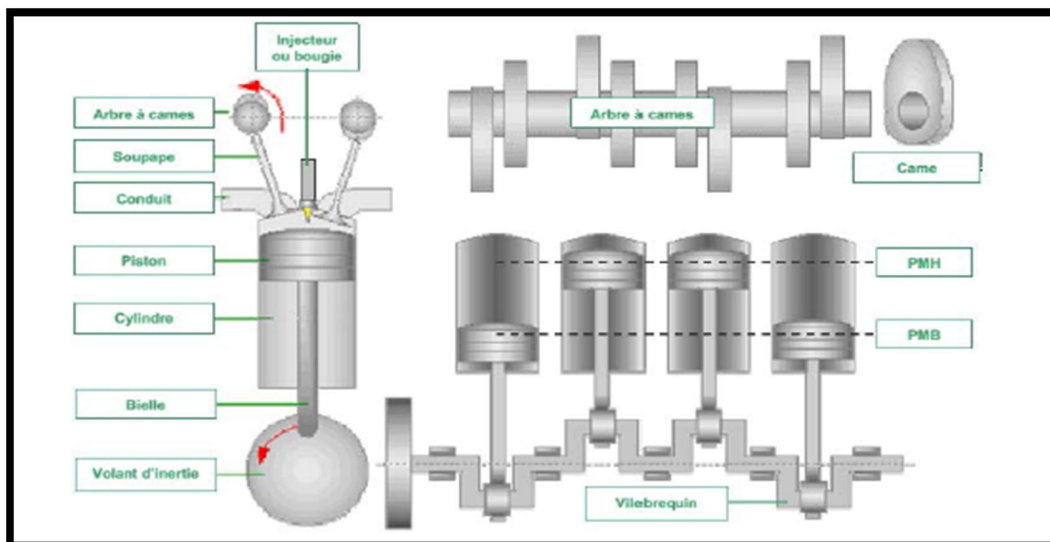


Figure I.15: Composants principaux d'un moteur alternatif à pistons [22].

I. 7.2 Cycle du moteur a quatre temps

Le moteur a quatre temps est le plus utilise dans les voitures modernes [25]. Dans le cadre de notre étude nous utilisons un moteur diesel à quatre temps, à savoir qu'un cycle moteur (correspondant à une rotation de $2 \times 360^\circ$) comporte les quatre phases suivantes :admission, compression ,détente ,échappement[22].

- **ADMISSION**

-Le piston descend et la soupape d'admission s'ouvre.

-L'air frais s'engouffre dans le cylindre.

Pour le moment il n'y a pas de carburant. Le vilebrequin fait un demi-tour.

- **COMPRESSION :**

- La soupape d'admission se ferme et le piston remonte.

- L'air est comprimé et s'échauffe fortement.

- Lorsque le piston atteint les 9/10ème de sa course environ, une quantité définie de carburant est injectée.

- **DETENTE :**

- Les soupapes sont fermées.

- Le mélange d'air et de carburant contenu dans le cylindre est sous pression.

- La température est suffisamment élevée pour que ce mélange brûle en créant une surpression qui pousse le piston vers le bas(et fait tourner le vilebrequin d'un demi-tour).

- **ECHAPPEMENT :**

- La soupape d'échappement s'ouvre.

- Le piston remonte chassant les gaz brûlés vers la sortie d'échappement.

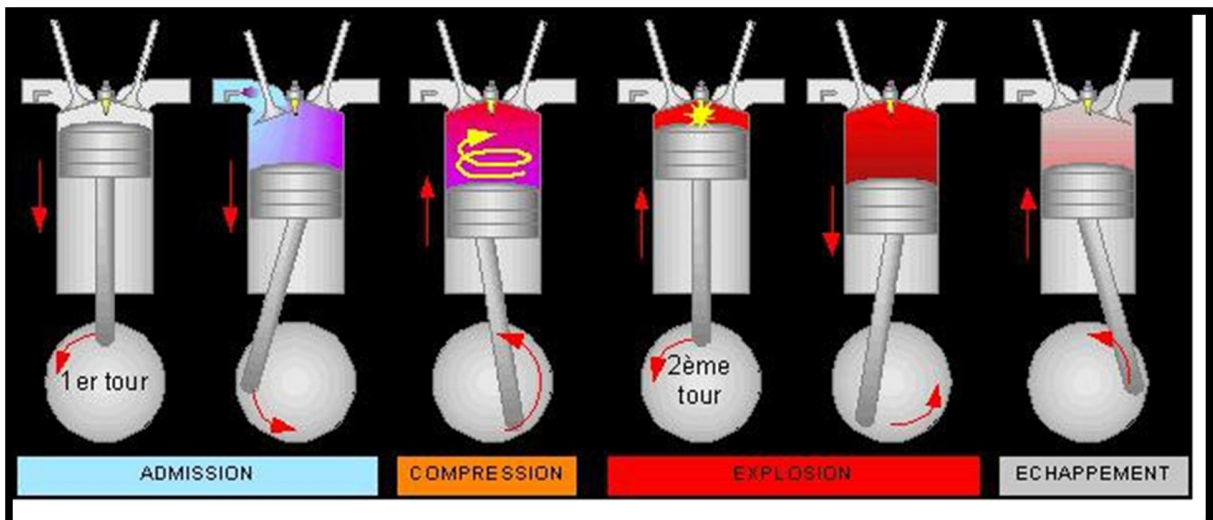


Figure I.16: Cycle de fonctionnement d'un moteur diesel à 4 temps [26].

Pour un moteur quatre cylindres (soit 4 pistons), chaque piston effectue 4 Phases au-dessus et décalé de 180° (angle vilebrequin) par rapport au piston adjacent. Par exemple (voir Figure I.15),

lorsque le premier piston est en fin de phase admission, la seconde est en fin de phase de compression (début de détente), la troisième A la fin de la phase d'échappement, le quatrième à la fin de la phase d'explosion (début échappement)[22].

I. 7.3 Groupe électrogène diesel

Aujourd'hui les groupes électrogènes sont utilisés pour satisfaire les besoins en énergie électrique dans les communautés vivant dans les régions isolées, sont des moteurs fonctionnant au diesel et associés directement par des générateurs synchrones.

En tout temps pour pouvoir assurer la qualité de l'énergie fournie (tension et fréquence stables), un régulateur de tension triphasé agit sur l'excitation des alternateurs synchrones pour s'opposer aux variations de tension. De même, la fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel. Le gouverneur fonctionne en ajustant la quantité de carburant injectée dans les moteurs diesel, pour s'opposer aux variations de la vitesse du moteur et du générateur afin de les garder constantes. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré (Figure I.17). Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive. La puissance réactive dans un système en CA avec groupe diesel est produite par la génératrice synchrone.

Cela est fait conjointement avec le réglage de tension, en ajustant le courant d'excitation du générateur synchrone. Par conséquent, dans un système d'énergie en CA avec plusieurs groupes diesel (GD), il doit y avoir au moins un GD connecté au réseau, pour fixer la fréquence du réseau et fournir la puissance réactive [27].

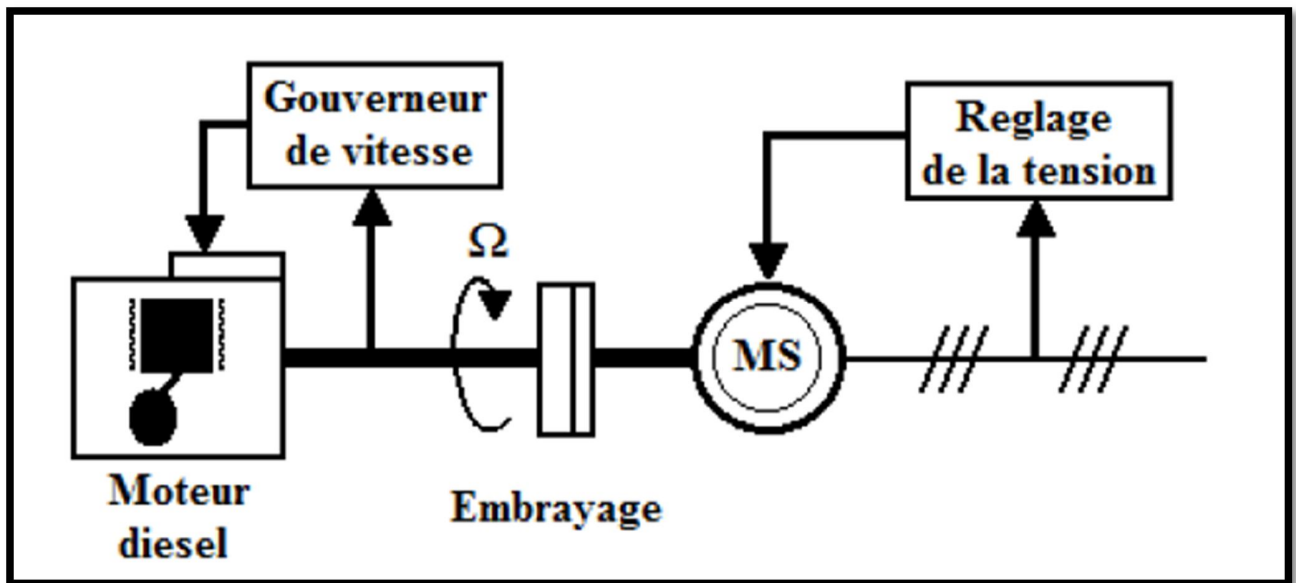
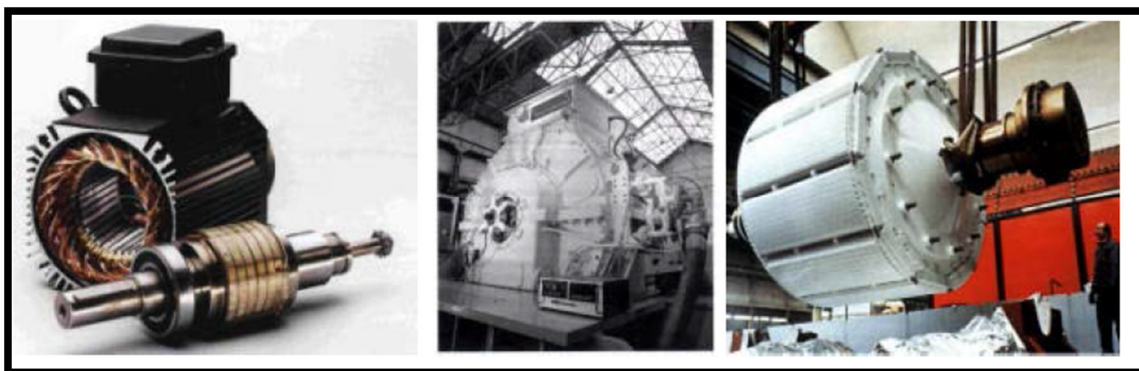


Figure I.17: Configuration du générateur diesel[27].

Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus en CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels. Ce système de commande peut prendre une variété de formes, le plus répandu étant le système de commande numérique. Une approche est d'utiliser un seul générateur pour fixer la fréquence (générateur maître) du réseau et laisser les autres à tourner à vitesse fixe (générateurs esclaves), donc fonctionner à un débit de carburant constant. Dans les systèmes traditionnels, le débit de carburant est fixé manuellement par un opérateur. Avec les commandes modernes, le débit peut être ajusté pour optimiser l'usage du carburant [27].

I.8 Généralités sur la machine synchrone

Aujourd'hui, les machines synchrones occupent une part importante du marché des convertisseurs d'énergie électromécaniques, couvrant une très large gamme de puissance allant de quelques μW à environ 1 GW. Traditionnellement, la forte puissance est restée le domaine réservé de la production d'électricité. En revanche, en fonctionnement moteur, la puissance installée dépasse rarement quelques dizaines de mégawatts. Le moteur synchrone à vitesse variable le plus puissant jamais connu, d'une puissance de 100 MW, conçu pour la soufflerie de la NASA (Figure I.18.c).



a : moteur industriel à aimants synchrones permanents qq kW (doc. aimants Philips).

b : démonstrateur de propulsion navale à aimants permanents, 1.8 MW.

c : rotor de moteur 100 MW (à 600 tr/mn)

Figure I.18: Différent types des machines synchrones[28].

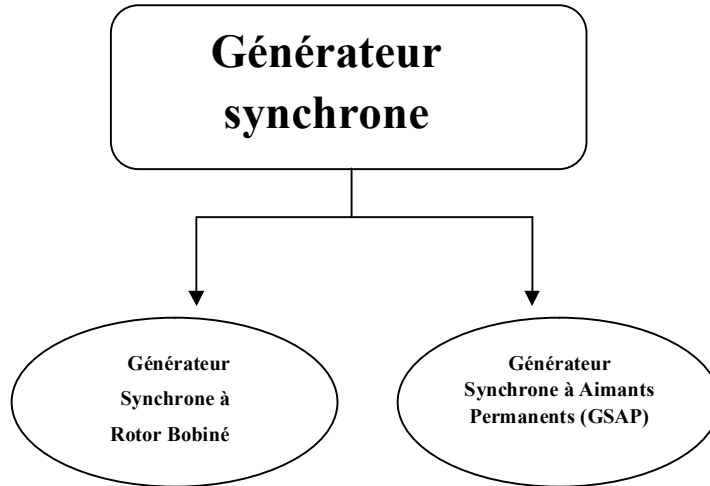
Historiquement, les premiers aimants permanents ont été utilisés au début du 19e siècle. D'un fonctionnement très banal au départ, les progrès réalisés depuis un siècle ont contribué au développement de la magnéto. L'utilisation d'aimants permanents est désormais quasi systématique pour les puissances inférieures à 10 kW et s'étend désormais aux fortes puissances (supérieures au MW). De plus, le coût d'utilisation des aimants devient souvent prohibitif (Nd/FB environ 150 EUR/kg). Seules quelques applications très spécifiques, comme la propulsion navale de grande envergure sous contraintes spatiales, envisagent l'utilisation d'aimants de forte puissance (4,5 MW à 120 tr/min) [28].

I. 8.1 Générateur Synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des modes classiques de production d'électricité, notamment ceux de très forte puissance (centrales thermiques, groupes électrogènes, centrales hydroélectriques ou nucléaires). Pour générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW Les parcs éoliens sont beaucoup plus chers que les générateurs à induction de même taille [19].

De plus, lorsque de telles machines sont directement connectées au réseau, leur vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. Du fait de cette grande rigidité de la liaison générateur-réseau, les fluctuations de couple captées par une turbine ou un moteur diesel d'avion se propagent dans tout le groupe motopropulseur jusqu'à l'énergie électrique générée[15].

Il existe deux catégories de machine asynchrone: Générateur Synchrone à Rotor Bobine et Générateur Synchrone à Aimants Permanents.



I. 8.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

Le champ magnétique créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ magnétique du stator. Ainsi, si le générateur est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être strictement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines souffrent également de forts multiplicateurs de vitesse. En effet, ils sont bien adaptés à des régimes relativement élevés et où le couple n'est pas suffisant pour un accouplement mécanique direct à un moteur diesel. D'autre part, les moteurs synchrones sont connus pour fournir des couples très élevés et des géométries adaptées. Par conséquent, ils peuvent être utilisés avec un moteur diesel à entraînement direct.

Les moteurs synchrones à rotor bobiné nécessitent un entretien régulier du système de contact glissant du rotor. Le circuit d'excitation est sécurisé par un redresseur connecté au réseau[29].

I. 8.3 Générateur Synchrone à Aimants Permanents(GSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a rendu le coût de fabrication des moteurs synchrones à aimants permanents plus compétitif. Ce type de machine possède un grand nombre de pôles et peut développer un couple mécanique important. Il existe plusieurs concepts de moteurs synchrones à aimants permanents dédiés aux applications éoliennes, soit des machines de construction standard (aimantation radiale) soit des générateurs à disque (champs axial), même avec des rotors externes [30].

Le principal inconvénient de l'utilisation du GSAP est le coût des aimants utilisés. Cependant, certains d'entre eux sont fabriqués à partir de terres rares et sont donc très coûteux, même si leur utilisation croissante tend à faire baisser leur prix[29].

I.9 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les concepts de base de notre système tels que le principe de fonctionnement, la classification des éoliennes et aussi leur éléments de base ainsi que la représentation des caractéristiques des machines électriques synchrone et asynchrone, et enfin nous avons présenté le principe de fonctionnement du moteur diesel comme un groupe électrogène.

Chapitre II

Modélisation du Système

II.1. Introduction

Le rôle des éoliennes est de convertir l'énergie cinétique éolienne en énergie mécanique au moyen d'une série de conversion. Le couple mécanique sur l'arbre moteur dépend de la structure complexe de la vitesse La possibilité de routeurs et de pales.

La probabilité de routeurs de vent et les pales, que la vitesse du vent est considéré comme une vitesse instable et constamment variable et la génération de vent est imprévisible.

Avec la prolifération des éoliennes, les chercheurs en génie électrique ont mené des recherches pour améliorer l'efficacité de conversion électromécanique et la qualité de l'énergie électrique.

Dans ce chapitre, nous présentons brièvement la modélisation de chacun des éléments : le modèle d'éolienne et le moteur asynchrone.

II.2. Modélisation du chaîne éolienne

La figure (II.1) présente une description du plan directeur d'immobilisations pour la chaîne de conversion de l'énergie éolienne reliée au réseau électrique.

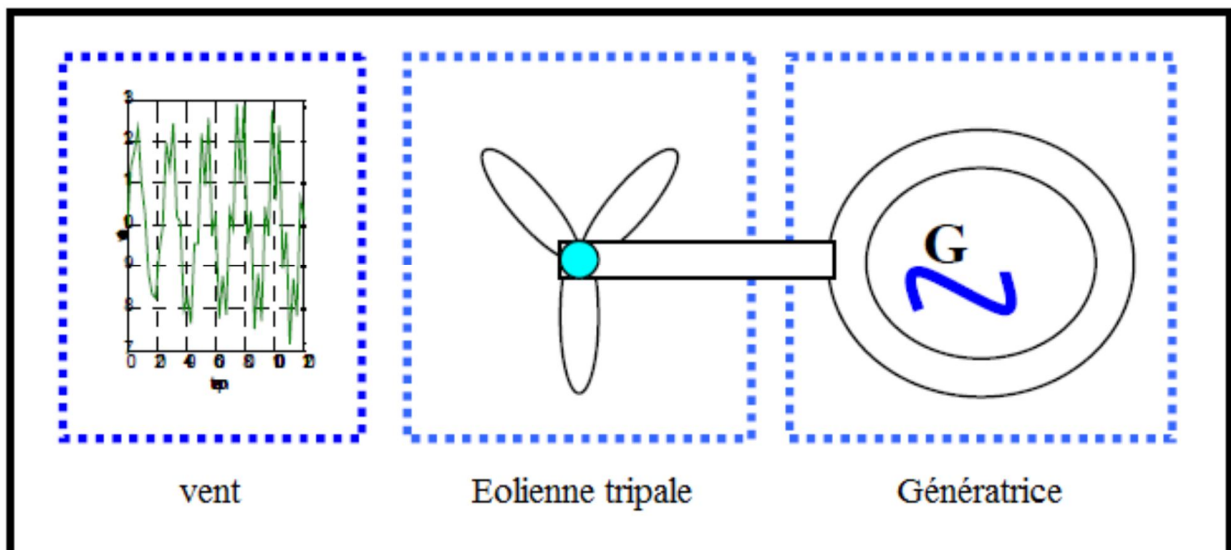


Figure II.1: Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie [31].

Les éléments du système sont (figure II. 1)

- Le vent
- La turbine éolienne « Type tripale »
- La génératrice « GADA »

II.2.1. Modélisation du vent

Le vent est considéré comme une source d'énergie principale pour faire fonctionner les éoliennes, de sorte que le vent résulte du réchauffement de l'atmosphère par l'énergie thermique émise par le soleil de manière inégale, L'air au-dessus des zones chaudes se dilate et monte et est remplacé par l'air des zones plus froides, ce mouvement est appelé vent[32]. et Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour[33].

La turbine est l'un des moyens les plus importants de convertir le vent en énergie, de sorte qu'elle l'énergie cinétique du vent est transformée en partie en énergie mécanique à l'aide de la turbine, puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur. C'est donc un variable important pour la modélisation, puisque la précision Les simulations dépendront de la qualité de leurs modèles[31]. L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc [33] Pour ce faire, la vitesse du vent va être décomposée en deux composantes[31].

- Une composante turbulente du vent (t) qui est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- Une composante lente V_0 ; c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné.

$$V(t) = V_0 + V_T(t) \quad (\text{II.1})$$

L'aéro-turbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue à cet effet un filtre passe bas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité dont la fonction de transfert est donnée par :

$$G_f = \frac{1}{1+\tau.s} \quad (\text{II.2})$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de turbulence du vent et de la vitesse du vent moyenne ($\tau = 2s$) [34].

II.2.2. Modélisation de la turbine

Pour cette tâche, on a la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et le rotor de la génératrice:

- La turbine éolienne est composée de trois pales orientables;
- Le rôle du multiplicateur c'est l'adaptation de la vitesse de la turbine éolienne a celle du générateur électrique.
- Le rôle de l'arbre c'est de relie la partie mécanique à la partie électrique ou bien relie la turbine avec le générateur.

la figure ci-dessous représente différent partie de la turbine:

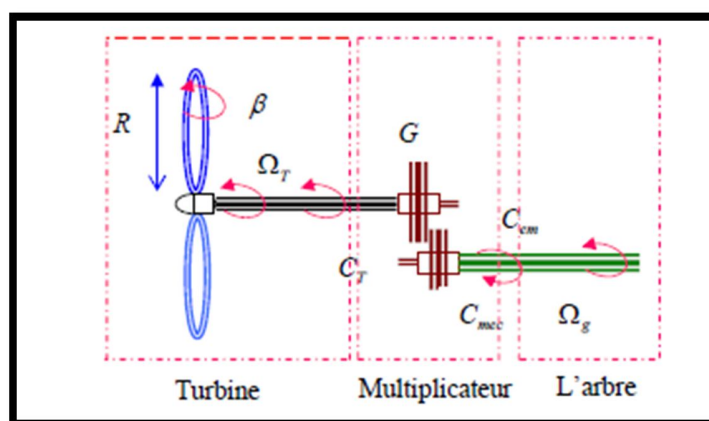


Figure II.2: Différent partie de la turbine [31].

II.2.3. Modèle de la Turbine

La vitesse du vent ou puissance éolienne est définie de la manière suivante [35]:

$$P_V = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$$S = R^2 \pi \quad (\text{II.4})$$

$$P_V = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.5})$$

Où:

$\rho = 1.25 \text{ Kg/m}^3$: Masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression.

V : La vitesse du vent.

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent (coefficient de puissance C_p) la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_D = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.6})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure II.3 représente la variation de ce coefficient en fonction du rapport de vitesse λ et de l'angle de l'orientation de la pale β , Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [31]:

$$\lambda = \frac{\Omega_T R}{V} \quad (\text{II.7})$$

Le couple mécanique à la sortie de la turbine est donné par :

$$C_T = \frac{P_D}{\Omega_T} \quad (\text{II.8})$$

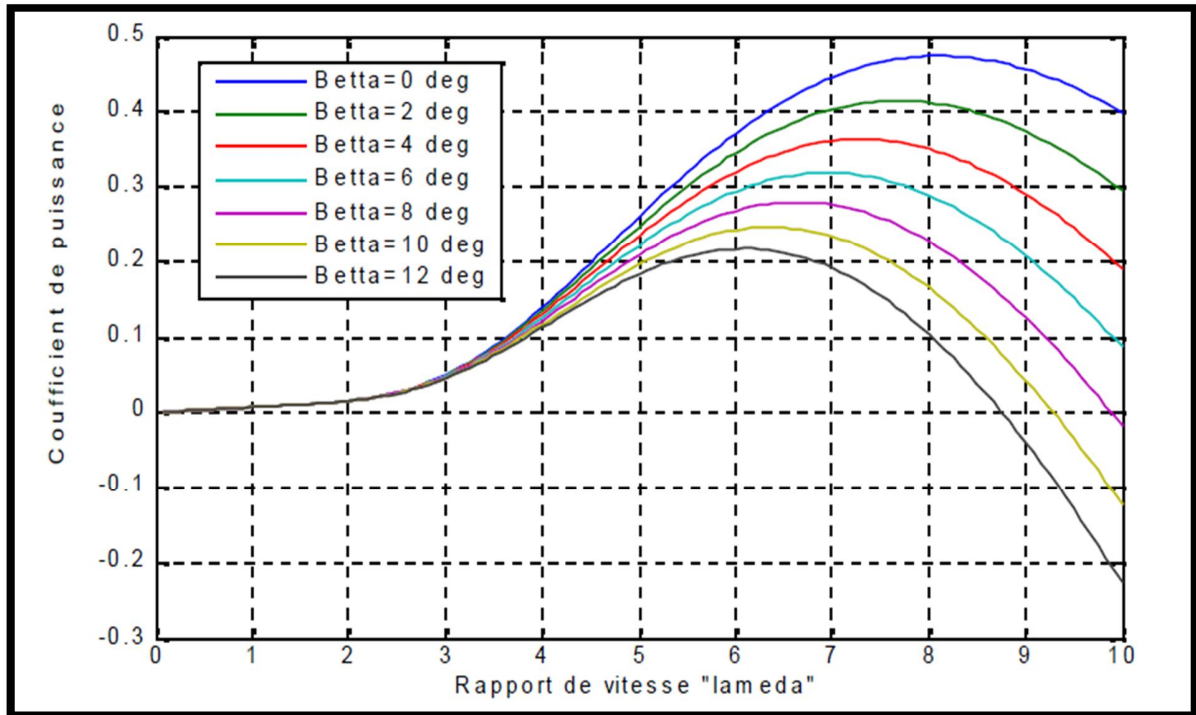


Figure II.3: Caractéristique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative λ [31].

II.2.4. Modèle du multiplicateur

La turbine éolienne, en général, tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 (tr/mn) [36]. Le multiplicateur de vitesse est la liaison entre la turbine et le générateur [37]. Les multiplicateurs utilisés actuellement comportent généralement deux à trois trains d'engrenages épicycloïdaux permettant d'obtenir des rapports de multiplication de l'ordre de 100. Ces engrenages génèrent du bruit et des pertes mécaniques. Le rôle du multiplicateur est d'adapter la petite vitesse de la turbine à la vitesse du générateur, pour pouvoir modéliser cela nous allons utiliser un gain de vitesse G correspondant au rapport de multiplication [5].

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_T \quad (\text{II.9})$$

Avec:

C_{mec} : Le couple mécanique pour adaptation de la vitesse de la turbine à celle du générateur;

C_T : Le couple mécanique à la sortie de la turbine.

G : Gain ou Rapport de multiplication.

Pour la vitesse, on aura:

$$\Omega_g = G \Omega_T \quad (\text{II.10})$$

Où :

Ω_g : Vitesse du générateur (rad/s mécanique).

II.2.5. Modèle de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_{tur} , y compris la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère que l'inertie totale J_T constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice[38].

$$J_T = \frac{J_{tur}}{G^2} \quad (\text{II.11})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe[38]. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total (C_{mec}) appliqué au rotor[39]:

$$J_T \times \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II.12})$$

Où J_T est l'inertie générale qui apparaît sur le rotor du générateur. C_e couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} généré par le générateur, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (\text{II.13})$$

Le couple résistant due aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f_T [40]:

$$C_{vis} = f_T \cdot \Omega_{mec} \quad (\text{II.14})$$

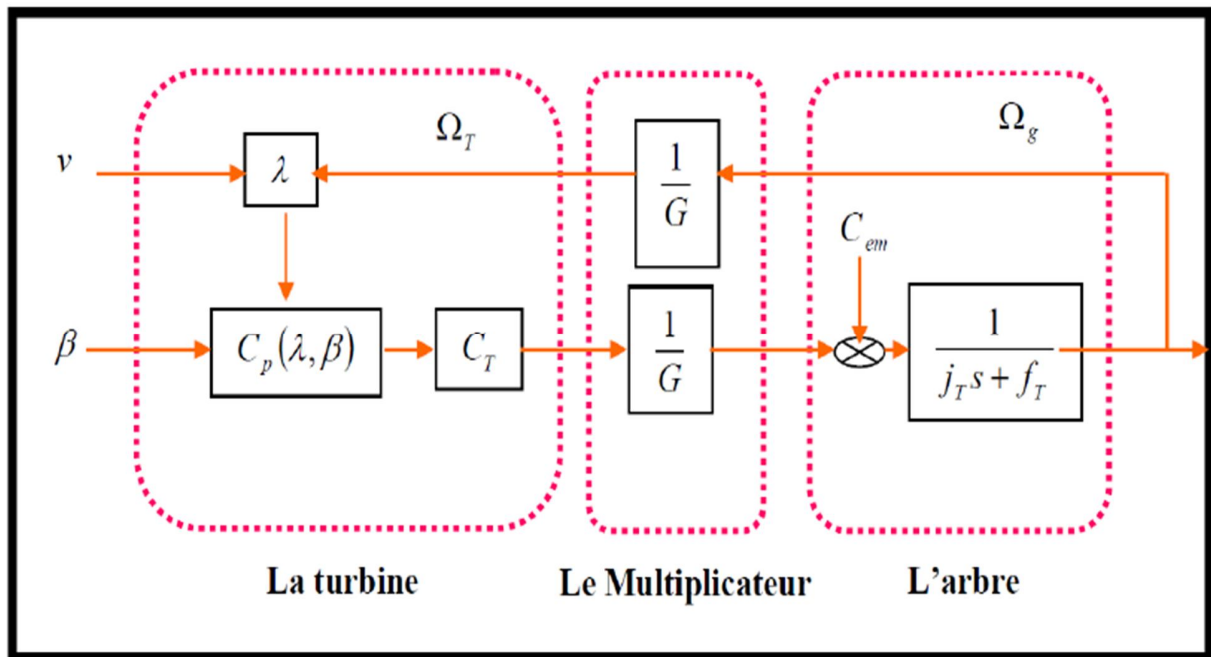


Figure II.4: Modèle de la turbine éolienne [31].

II.3. Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation

Ici, nous la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation , la modélisation Park et diverses équations du modèle GADA.

Compte tenu de la répartition des enroulements du stator et de la géométrie spécifique de la machine est sont très complexes, nécessitant souvent l'examen d'hypothèses simplificatrices pour obtenir Un modèle simple de la machine[41].

- la machine est de constitution symétrique.
- l'absence de saturation et de pertes dans le circuit magnétique (l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables) .
- les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.
- l'alimentation est réalisée par un système des tensions triphasées équilibrées.
- la répartition spatiale sinusoïdale des différents champs magnétique le long de l'entrefer. (Son entrefer est constant).

La Figure II.5 représente la disposition de la machine asynchrone dans l'espace électrique:

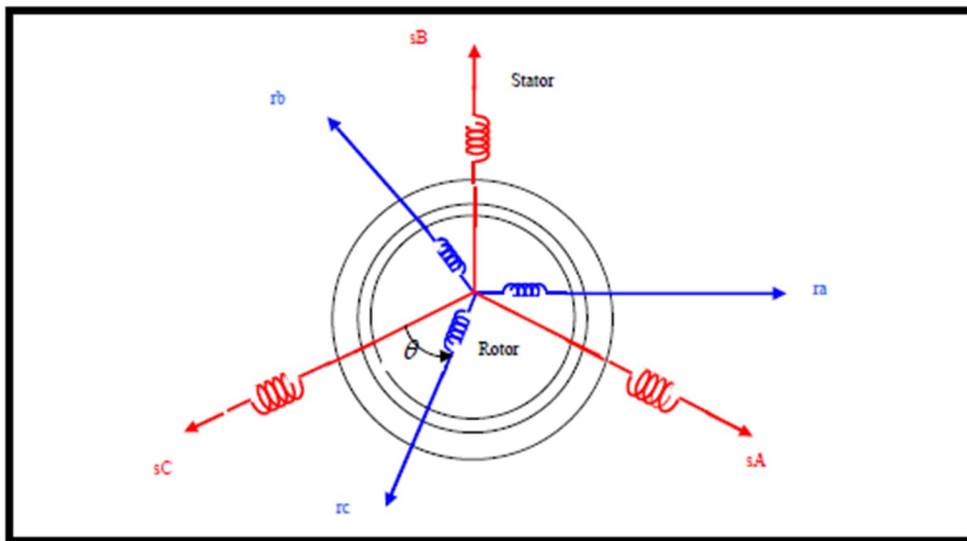


Figure II.5: Machine asynchrone modélisée - définition des repères stator et rotor[31].

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices et pour une machine équilibrée les équations de la machine s'écrivent comme suit :

II.3.1 Equations électriques

- pour le stator:

$$\begin{aligned}
 V_{sa} &= R_s I_{sa} + \frac{d}{dt} \phi_{sa} \\
 V_{sb} &= R_s I_{sb} + \frac{d}{dt} \phi_{sb} \\
 V_{sc} &= R_s I_{sc} + \frac{d}{dt} \phi_{sc}
 \end{aligned}
 \tag{II.15}$$

- **pour le rotor:**

$$\begin{aligned}
 V_{ra} &= R_r I_{ra} + \frac{d}{dt} \phi_{ra} \\
 V_{rb} &= R_r I_{rb} + \frac{d}{dt} \phi_{rb} \\
 V_{rc} &= R_r I_{rc} + \frac{d}{dt} \phi_{rc}
 \end{aligned}
 \tag{II.16}$$

En désignant par:

- $V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}, V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$: Les tensions statoriques et rotoriques.
- $I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, I_{ra}, I_{rb}, I_{rc}$: Les courants statoriques et rotoriques.
- $\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}, \phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$: Les flux statoriques et rotoriques.
- R_s, R_r : Résistances statoriques et rotoriques.

Sous forme matricielle:

- **pour le stator:**

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \tag{II.17}$$

- **pour le rotor:**

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \tag{II.18}$$

II.3.2. Équations magnétiques

Les relations entre flux et courants s'écrivent comme suit:

- **pour le stator:**

$$\begin{aligned}
 \phi_{sa} &= L_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\
 \phi_{sb} &= L_s I_{sb} + M_s I_{sa} + M_s I_{sc} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc} \\
 \phi_{sc} &= L_s I_{sc} + M_s I_{sa} + M_s I_{sb} + M_{sr} I_{ra} + M_{sr} I_{rb} + M_{sr} I_{rc}
 \end{aligned}
 \tag{II.19}$$

- pour le rotor:

$$\begin{aligned}\phi_{ra} &= L_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_r I_{rc} + M_{sr} I_{sa} + M_{sr} I_{sb} + M_{sr} I_{sc} \\ \phi_{rb} &= L_r I_{rb} + M_r I_{ra} + M_r I_{rc} + M_{sr} I_{sa} + M_{sr} I_{sb} + M_{sr} I_{sc} \\ \phi_{rc} &= L_r I_{rc} + M_r I_{ra} + M_r I_{rb} + M_{sr} I_{sa} + M_{sr} I_{sb} + M_{sr} I_{sc}\end{aligned}\quad (\text{II.20})$$

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes:

- pour le stator:

$$[\phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{II.21})$$

- pour le rotor:

$$[\phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{sr}][I_s] \quad (\text{II.22})$$

Tel que:

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M & M \\ M & L_s & M \\ M & M & L_s \end{bmatrix}, [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M & M \\ M & L_r & M \\ M & M & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

$$[L_{sr}] = [M_{sr}] \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}, [L_{rs}] = [L_{sr}]^T \quad (\text{II.24})$$

Telle que:

- L_s : L'inductance propre d'une phase statorique.
- L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique.
- M_s : L'inductance mutuelle entre phases statoriques.
- M_r : L'inductance mutuelle entre phases rotoriques.

-En désignant par L_{sr} la mutuelle inductance entre phases statoriques et rotoriques et par M_{sr} sa valeur lorsque leur axes coïncident.

II.3.3. Equation mécanique

Par rapport à l'angle mécanique entre le rotor et le stator, certains dérivés de l'énergie C donnent un couple électromagnétique. Afin de simuler la machine, en plus de l'équation électrique, les équations du mouvement du système doivent également être ajoutées:

$$C_{em} - C_r = Jg \frac{d\Omega}{dt} + fg\Omega \quad (\text{II.25})$$

II.3.4. Modèle de Park

Les équations précédentes permettent l'usinage dans le plan (a, b, c), qui peut être effectué dans une calculatrice. Cependant, il y a une complexité dans le nombre de termes d'énergie magnétique attachés à 36 termes[34]. C'est pourquoi nous utilisons la conversion Park comme outil mathématique utilisé en génie électrique pour convertir des quantités tournantes de trois phases en quantités équivalentes représentées par une référence générique (conversion triple torsion). Il vise à faciliter l'étude.

La matrice $P[\theta]$ de (Park) est donnée sous la forme suivante :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

Son inverse $[P(\theta)]^{-1}$ est donnée par:

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

L'angle θ dans la matrice $[P]$ prend la valeur (θ_s) pour les grandeurs statoriques et la valeur $(\theta_s - \theta_r)$ pour les grandeurs rotoriques.

II.3.5. Choix du référentiel

Afin d'étudier la théorie du processus de transition de la machine, trois systèmes de Park sont utilisés, qui sont des circonstances particulières (d, q) du système d'axe.

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$$\begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine asynchrone (d, q) par le système d'équation :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.30})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - (\omega_r) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_r) \phi_{rd} \end{cases}$$

Avec:

$$\omega_r = \omega_s - \omega \quad (\text{II.31})$$

On remplace (II.31) dans (II.30) on trouve :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - ((\omega_s - \omega)) \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \phi_{rd} \end{cases}$$

a) Repère lié au stator

Dans ce cas les repères (d, q) sur le stator.

$$\theta_s = 0 \quad (\text{II.33})$$

Et

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \theta_r = -\theta \quad (\text{II.34})$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \quad , \quad \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega_r \quad (\text{II.35})$$

Et la figure suivant montre les repères (d, q) lié au stator.

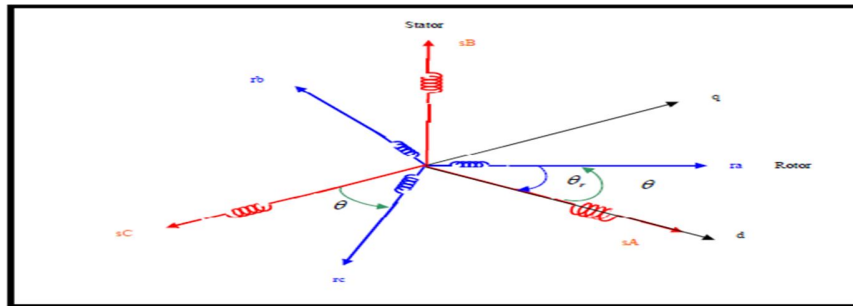


Figure II.6: Les repères (d, q) lié au stator[31].

b) Repère lié au rotor

Dans ce cas les repères (d, q) sur le rotor.

$$\theta_r = 0 \quad (\text{II.36})$$

Et

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \theta_s = \theta \quad (\text{II.37})$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \quad , \quad \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega_s \quad (\text{II.38})$$

Et la figure suivant montre les repères (d, q) lié au rotor

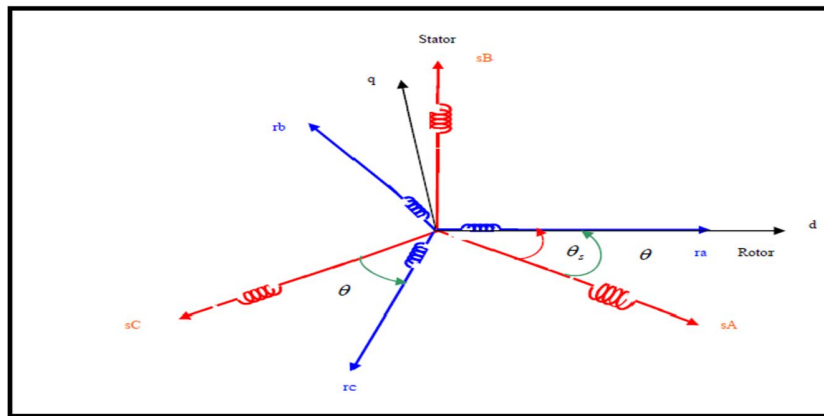


Figure II.7: Les repères (d, q) lié au rotor[31].

c) Repère lié au champ tournant

Dans ce cas les repères (d, q) sur le champ tournant

$$\frac{d(\theta_s)}{dt} = \omega_s \tag{II.39}$$

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \theta_r = \theta_s - \theta \tag{II.40}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s \tag{II.41}$$

Et la figure suivant montre les repères (d, q) lié au champ tournant.

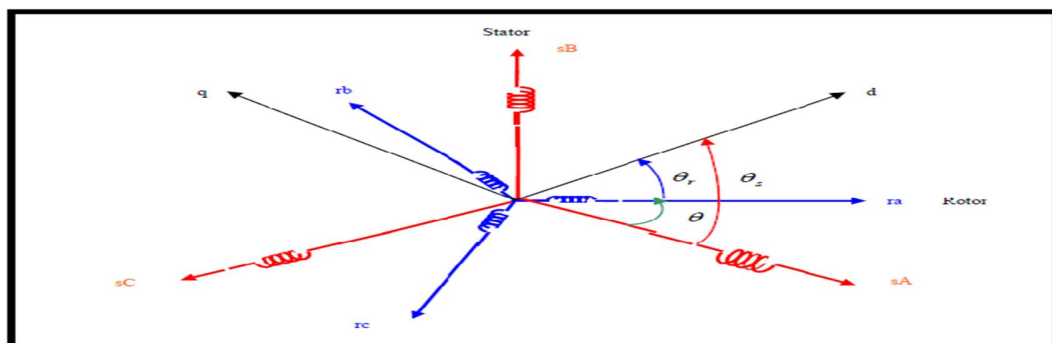


Figure II.8: Les repères (d, q) lié au rotor[31].

II.3.6. Expression de la puissance et du couple électromagnétique

Le calcul de couple mécanique de la machine asynchrone se base sur la connaissance de la puissance instantanée $P(t)$, soit:

$$P_{em} = V_{sa}I_{sa} + V_{sb}I_{sb} + V_{sc}I_{sc} = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \quad (\text{II.42})$$

$$P_{em} = \left[R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - w_s \phi_{sq} \right] I_{sd} + \left[R_s I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + w_s \phi_{sd} \right] I_{sq} \quad (\text{II.43})$$

$$P_{em} = \underbrace{\{R_s I_{sd}^2 + R_s I_{sq}^2\}}_{(1)} + \underbrace{\left\{ \frac{d\phi_{sd}}{dt} I_{sd} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} I_{sq} \right\}}_{(2)} + \underbrace{\{w_s (\phi_{sd} I_{sq} - \phi_{sq} I_{sd})\}}_{(3)} \quad (\text{II.44})$$

(1): Représente les pertes par effet joules.

(2): Représente la puissance électromagnétique.

(3): Représente la puissance électrique transformé en puissance mécanique.

II.3.7. Couple électromagnétique

On a :

$$P_{em} = C_{em} \Omega + w_s (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II.45})$$

Avec:

$$w = P \Omega \quad (\text{II.46})$$

$$P_{em} = \frac{P \Omega}{\Omega} (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd}) = P (\Phi_{sd} I_{sq} - \Phi_{sq} I_{sd}) \quad (\text{II.47})$$

En faisant appel au flux rotorique :

On a

$$\Phi_{rd} = L_r I_{rd} + M_{sr} I_{sd} \quad (\text{II.48})$$

Soit :

$$I_{rd} = \frac{d\Phi_{rd}}{L_r} - \frac{M_{sr}}{L_r} I_{sd} \quad (\text{II.49})$$

Et:

$$\Phi_{rd} = L_r I_{rq} + M_{sr} I_{sq} \quad (\text{II.50})$$

Soit:

$$I_{rq} = \frac{d\Phi_{rq}}{L_r} - \frac{M_{sr}}{L_r} I_{sq} \quad (\text{II.51})$$

On aura:

$$C_{em} = P \frac{M_{sr}}{L_r} (\Phi_{rd} I_{sq} - \Phi_{rq} I_{sd}) \quad (\text{II.52})$$

On peut écrit aussi:

$$C_{em} = \frac{3PM}{2} (I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) \quad (\text{II.53})$$

II. 4 Modélisation du groupe électrogène diesel :

II. 4.1 Modèle du moteur diesel

La modélisation du moteur diesel doit prendre en considération les pièces du moteur en mouvement, la puissance fournie P_i et les puissances résistantes P_{diss} , le moteur fonctionne à régime constant (pour une charge donnée) afin de maintenir constantes la tension et la fréquence du courant fourni par l'alternateur. Le principe de la conservation d'énergie s'écrit alors comme suit [2]:

$$P_i - P_{diss} = 0 \quad (\text{II. 54})$$

La puissance fournie peut être représentée par l'expression suivante :

$$P_i = P_{ci} \cdot n_i \cdot m_f \quad (\text{II. 55})$$

Avec:

P_{ci} : Désigne le pouvoir calorifique inférieur du carburant.

n_i : Le rendement indiqué du moteur.

m_f : Le débit de carburant injecté dans la chambre de combustion.

La puissance dissipée totale, inclut d'une part l'effet de frottement des pièces mécaniques en mouvement comme (bielles, pistons, vilebrequin) et d'autre part celui de la charge appliquée sur le moteur, celle de la génératrice. Elle peut être exprimée par la formule suivante :

$$P_{diss} = P_{mf} \cdot \frac{C_y}{4\pi} \cdot \omega + C_r \cdot \omega \quad (\text{II. 56})$$

P_{mf} : La pression moyenne des pertes par frottement.

C_y : La cylindrée totale du moteur.

C_r : Le couple résistant dû à la charge appliqué.

La modélisation des frottements au niveau des différents éléments du moteur a fait l'objet de nombreux travaux qui aboutissent à des formes très variées. Vu la complexité pour traiter chaque élément à part, il a été préféré d'utiliser les formules d'évaluations globales de ces pertes. La formule la plus précise qui représente la variation de la puissance de frottement en fonction du régime et de la pression d'air à l'admission du moteur s'écrit comme suit[2] :

$$P_{mf} = \left(1 + \omega \cdot S_{eng} \cdot \left(K_{f1} + K_{f2} \frac{P_{in}}{P_a} \right) + K_{f3} \omega^2 \right) P_a \cdot \frac{C_y}{4\pi} \omega \quad (\text{II. 57})$$

II. 4.2 Production du couple mécanique

Le moteur diesel est un ensemble technique très hétérogène. En se focalisant sur la dynamique du couple mécanique en rapport avec l'index du système de pompe de carburant, la turbine diesel peut être réduite à un système du premier ordre caractérisé par un gain statique et une constante de temps. Les mesures pratiques montrent la présence d'un retard du fait de l'intervalle existant entre deux explosions. On en déduit l'expression (II.58) qui représente la dynamique du couple mécanique T_{Dm} écrit dans le plan de Laplace. La variable $z(s) = L'[z(t)]$ est l'équivalent dans le plan de Laplace de l'index d'alimentation, T_{D1} est une constante de temps exprimant la limite en vitesse de réaction de la turbine, et la constante de temps T_{D2} exprime le délai de changement de couple [42].

$$T_{Dm}(s) = \frac{K_{Dm}}{1 + sT_{D1}} Z(s) e^{-sT_{D2}} \quad (\text{II. 58})$$

En normalisant l'équation (II.58), on a $z(t) \in [0,1]$. $z(t) = 1$ correspond au fonctionnement en pleine puissance. Pour ce régime, on a une couple mécanique $T_{Dm} = 1$ pu et on en déduit que $K_{Dm} = 1$ pour une équation normalisée. L'index d'alimentation permet d'évaluer la dynamique du débit de carburant dans la turbine moyennant une fonction caractéristique $P(t) = f(z(t))$ [g/kWh]. La fonction de débit de carburant est non linéaire, convexe, avec un minimum absolu en $z(t) = 1$.

En appliquant la transformation de Padé du premier au retard temporel e^{-sTD2} de l'expression (II.58), on a l'expression (II.59). En exploitant la transformation en forme canonique observable. Une telle transformation est particulièrement appréciée pour l'analyse des valeurs propres et l'élaboration des stratégies de commande à partir de l'observation des valeurs propres [42].

$$e^{-sTD2} \sim \frac{2 - sTD2}{2 + sTD2} \Rightarrow T_{Dm}(s) = \frac{1}{1 + sTD2} \frac{2 - sTD2}{2 + sTD2} Z(s) \quad (\text{II.59})$$

$$G_{D1}(s) = \frac{T_{Dm}(s)}{Z(s)} = \frac{-s \frac{1}{TD1} + \frac{2}{TD2TD1}}{s^2 + s \frac{TD2+2TD1}{TD2TD1} + \frac{2}{TD2TD1}} = \frac{b_{D1}s + b_{D0}}{s^2 + a_{D1}s + a_{D0}} \quad (\text{II.60})$$

$$\Rightarrow \frac{dx(t)}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -a_{D0} \\ 1 & -a_{D1} \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} b_{D0} \\ b_{D1} \end{bmatrix} u_1(t) \quad (\text{II.61})$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = -a_{D0}x_2(t) + b_{D0}Z(t) \\ \frac{dx_2(t)}{dt} = x_1(t) - a_{D1}x_2(t) + b_{D1}Z(t) \\ y(t) = x_2(t) = T_{Dm}(t) \end{cases} \begin{cases} a_{D0} = b_{D0} = \frac{2}{TD1TD2}; b_{D1} = -\frac{1}{TD1} \\ a_{D1} = \frac{TD2 + 2TD1}{TD1TD2} \end{cases} \quad (\text{II.62})$$

Avec

$x_1(t)$ c'est une variable interne créer pour les besoins du modèle, tandis que $x_2(t) = T_{Dm}(t)$ est le couple moteur accessible par la mesure. Ce dernier, obtenu à partir de la combustion du mélange carburé dans les cylindres de la turbine, est utilisé pour entrainer en rotation la partie tournante du générateur diesel principalement constitué du vilebrequin, du volant d'inertie et du rotor de la génératrice synchrone. Le modèle du système tournant est schématisé à la Figure II. 9. Le couple électromagnétique T_{De} résulte de la connexion d'une charge électrique à la génitrice synchrone et s'oppose au mouvement de la masse tournante.

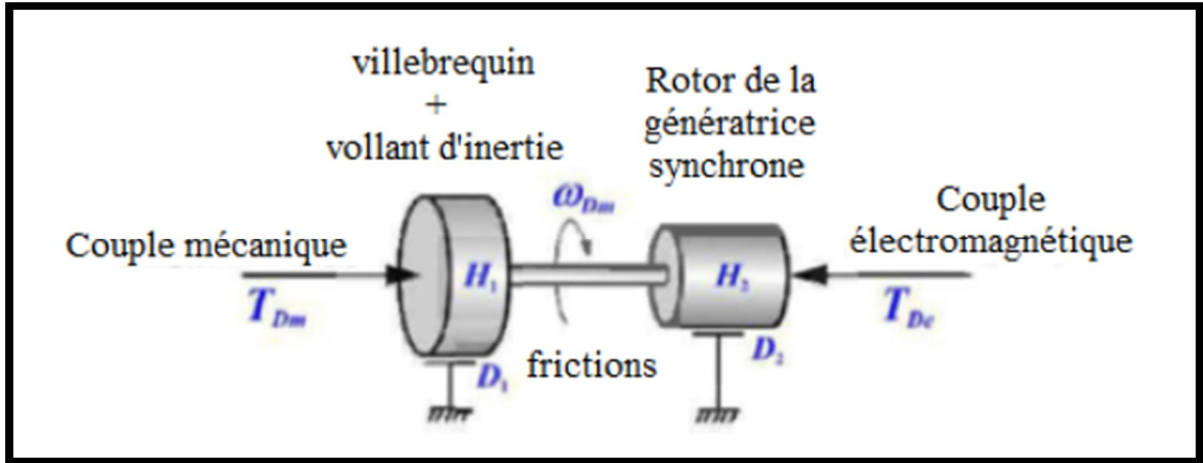


Figure II.9: Modèle de la partie mécanique du groupe diesel[42].

Chaque masse tournante à une certaine inertie, liée à sa masse, et est soumis à des forces de friction. En ce qui concerne la turbine, les forces de friction sont principalement dues aux frictions des pistons à l'intérieur des cylindres. Les frictions côté génératrice sont généralement négligées par rapport à celles de la turbine. Les moments de torsion des organes de transmission mécanique étant négligés, on définit l'inertie totale $H_D = H_1 + H_2$ et le coefficient de friction total $D_D = D_1 + D_2$. Ces grandeurs sont exprimées en unité normalisée (pu). L'équation caractérisant la dynamique des parties en rotation es donné par (II.63). Dans (II.64), J_D est l'inertie de la partie tournante en kg/m^2 . ω_{mref} et S_{ref} sont respectivement la vitesse de rotation et la puissance apparente de base[42].

$$\frac{d\omega_{Dm}}{dt} = \frac{1}{2H_D} (T_{Dm} - T_{De} - D_D \omega_{Dm}) \quad (II.63)$$

Avec

$$H_D = \frac{1}{2} \frac{J_D \omega_{mref}^2}{S_{ref}} \quad (II.64)$$

II.4.3 Le régulateur de vitesse

La vitesse de rotation de la turbine ω_{Dm} est mesurée et comparée à une référence permettant de fixer la fréquence des grandeurs électriques produites par la génératrice. L'organe responsable de la régulation de vitesse est construit autour d'un régulateur PID. Pour les turbines de moyenne et grande puissance, l'un des contrôleurs les plus répandus est de type UG-25 construit par WoodwardTM [42].

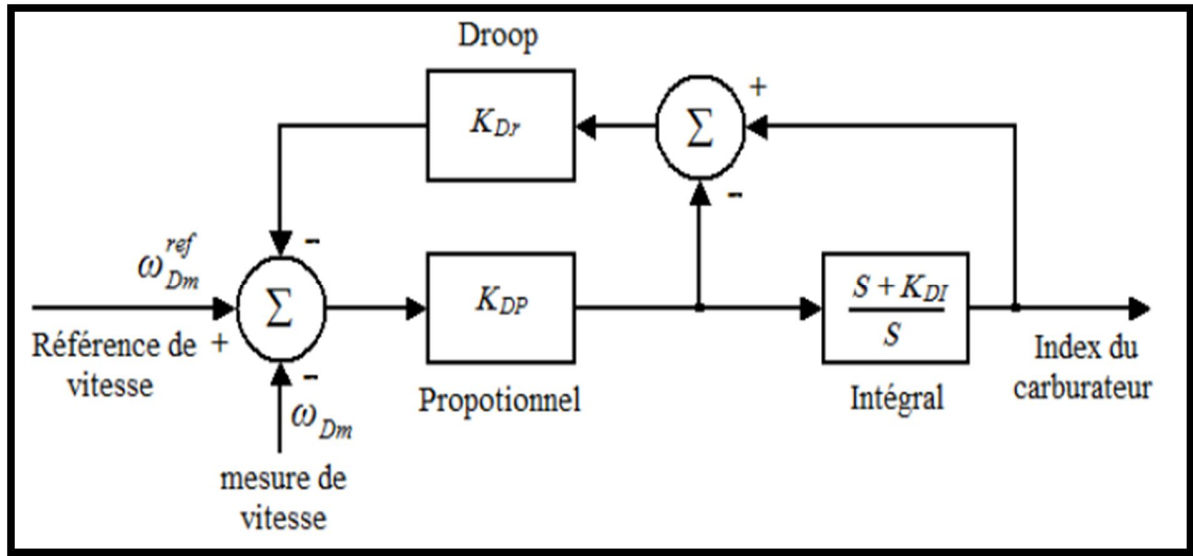


Figure II.10: Régulateur de vitesse construit autour d'un régulateur PI [42].

Nous retenons ici un modèle simplifié dans lequel, tous les délais dues à la mesure et à l'actionneur ont été négligées par rapport aux constantes de temps T_{D1} et T_{D2} . On obtient ainsi la structure construite autour d'un régulateur PI représenté à la Figure II.55; L'action de la partie "Proportionnel" est réglée par le paramètre K_{DP} tandis que K_{DI} permet de régler l'action de la partie "Intégral". Le paramètre de chute de fréquence, réglé par K_{Dr} , permet d'ajuster la chute de fréquence en fonction de la puissance produite. Ceci permet une répartition automatique des puissances dans un système à plusieurs générateurs diesel, On a:

$$K_{Dr} = \frac{\omega_{Dm}^{ref} - \omega_N}{P_N} = \frac{\Delta\omega_{Dm}}{P_N} \quad (\text{II. 65})$$

$$\Rightarrow K_{Dr} = \omega_{Dm}^{ref} - 1 \text{ [Pu]} \quad (\text{II. 66})$$

Où P_N est la puissance nominale et ω_N la vitesse nominale correspondante. En pratique, on a $0 \leq K_{Dr} \leq 10\%$. $K_{Dr} = 0$, le générateur fonctionne en mode isochrone et fixe la fréquence sur le bus de distribution. Lorsque plusieurs générateurs sont connectés en parallèle, un seul d'eux peut être isochrone. Le modèle de la Figure II.10 nous permet d'écrire :

$$G_{D2}(s) = \frac{z(s)}{\omega_{Dm}^{ref}(s) - \omega_{Dm}(s)} = K_{DP} \frac{s + K_{DI}}{s + K_{DP}K_{DI}K_{Dr}} \quad (\text{II. 67})$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \frac{dx_3(t)}{dt} = -a_{D01}x_3(t) + b_{D01}(\omega_{Dm}^{ref}(t) - \omega_{Dm}(t)) \\ y_2(t) = z(t) = x_3(t) + K_{DP}(\omega_{Dm}^{ref}(t) - \omega_{Dm}(t)) \end{cases} \quad (\text{II.68})$$

$$\text{Avec } \begin{cases} a_{D01} = K_{DP}K_{DI}K_{Dr} \\ b_{D01} = K_{DP}K_{DI}(1 - K_{DP}K_{Dr}) \end{cases}$$

La variable d'état $x_3(t)$ est une variable symbolique créée pour les besoins du modèle et permet d'accéder à la valeur dynamique de l'index $z(t)$ contrôlant le débit de carburant, donc le couple moteur T_{Dm} .

En réarrangeant les équations dynamiques (II.62),(II.63),(II.68) sous forme d'état standard, on obtient un modèle d'état linéaire de la turbine diesel. La vitesse de référence ω_{Dm}^{ref} ; et la réaction électromagnétique T_{De} de la génératrice sont les variables d'entrée du modèle, tandis que la vitesse de rotation ω_{Dm} , l'index d'alimentation Z et le couple mécanique T_{Dm} sont les variables de sortie. On a[42]:

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \\ \frac{dx_3}{dt} \\ \frac{d\omega_{Dm}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -a_{D0} & b_{D0} & -b_{D0}K_{DP} \\ 1 & -a_{D1} & b_{D1} & -b_{D1}K_{DP} \\ 0 & 0 & -a_{D01} & -b_{D01} \\ 0 & \frac{1}{2H_D} & 0 & -\frac{D_D}{2H_D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \omega_{Dm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{D0}K_{DP} & 0 \\ b_{D1}K_{DP} & 0 \\ -a_{D1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2H_D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Dm}^{ref} \\ T_{De} \end{bmatrix} \quad (\text{II.69})$$

$$\begin{bmatrix} \omega_{Dm}^{ref} \\ T_{De} \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -K_{DP} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \omega_{Dm} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -K_{DP} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{Dm}^{ref} \\ T_{De} \end{bmatrix} \quad (\text{II.70})$$

II.5 La Génératrice synchrone

La machine synchrone d'aujourd'hui est utilisée dans de nombreuses applications, et il y a une variété de machines synchrone. Ce dernier terme inclut toutes les machines dans lesquelles la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant.

Cette famille de machines regroupe plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas.

Il existe principalement 3 grandes familles pour un rotor, dont le rôle est de générer le champ magnétique rotorique : les rotors bobines a pôles lisses et les rotors bobines a pôles saillants, ainsi que des rotors a aimants[43].

Dans ce chapitre, nous allons démontrer le model de la machine synchronie a rotor bobine pôles saillants , regarder parce que c'est la machine synchrone la plus en général.

Le modèle que nous envisageons repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes:

- la répartition spatiale des conducteurs statoriques est sinusoïdale, la distribution spatiale de la force magnétomotrice (m.m.f.) l'est aussi ; les harmoniques spatiales de la distribution du flux sont négligées.
- les pertes par hystérésis et par courant de Foucault sont négligeable.
- les circuits magnétiques ne sature pas.
- la composante homopolaire est supposée comme nulle pour les grandeurs statoriques, i.e. le système polyphasé est équilibré.

II.5.1 Equations magnétiques

Les flux de la machine s'écrivent comme suit:

$$[\Psi_s] = [L_s][i_s] + [M_{sf}][i_f] \quad (\text{II. 71})$$

$$[\Psi_f] = [L_f][i_f] + [M_{fs}][i_s] \quad (\text{II. 72})$$

II. 5.2 Équations électriques

Les équations des tensions des trois phases statoriques et rotoriques sont:

- **pour le stator:**

$$\begin{aligned} U_{sa} &= R_s i_{sa} + \frac{d}{dt} \Psi_{sa} \\ U_{sb} &= R_s i_{sb} + \frac{d}{dt} \Psi_{sb} \\ U_{sc} &= R_s i_{sc} + \frac{d}{dt} \Psi_{sc} \end{aligned} \quad (\text{II. 73})$$

- **pour le rotor:**

$$U_f = R_f i_f + \frac{d}{dt} \Psi_f \quad (\text{II.74})$$

U_f, i_f, Ψ_f : Tensions, courants et flux du rotor de la machine.

Sous forme matricielle:

- **pour le stator:**

$$[U_{sabc}] = [R_s i_{sabc}] [i_s] + \frac{d}{dt} [\Psi_{sabc}] \quad (\text{II.75})$$

- **pour le rotor:**

$$[U_f] = [R_f i_f] + \frac{d}{dt} [\Psi_f] \quad (\text{II.76})$$

II. 5.3 Equations électriques dans le repère de Park (d q)

Les deux bobines sur les axes (d, q) tournent avec la même vitesse que le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer du repère naturel au repère de *Park*, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine[44].

En réalité, la transformation de *Park* n'est qu'une rotation de la transformation de Clark (conservation des amplitudes) ou bien de Concordia (conservation des puissances ou *Park Modifiée*) définie par la matrice « $[P(\theta)]$ » reliant les grandeurs des deux domaines « abc » et « dq » par l'équation[34]:

$$x_{dq} = [P(\theta)] \cdot x_{abc} \Rightarrow [P(\theta)]^{-1} \cdot x_{dq0} \quad (\text{II.77})$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.78})$$

$$[U_{abc}] = [R_s] [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Psi_{sabc}] = [P(\theta)]^{-1} \cdot [U_{dq}] \quad (\text{II.79})$$

A partir du modèle de la machine électrique généralisée dans le plan <<d q>>, on peut écrire[45]:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Psi_{sd}}{dt} - \omega_r \Psi_{sq} \\ U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Psi_{sq}}{dt} + \omega_r \Psi_{sd} \\ U_f = R_f i_f + \frac{d\Psi_f}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.80})$$

Pour les flux:

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_d i_{sd} + M_{fd} i_f \\ \Psi_{sq} = L_q i_{sq} \\ \Psi_f = L_f i_f + M_{fd} i_{sd} \end{cases} \quad (\text{II.81})$$

En tenant compte du système(II.81),le système des tensions devient:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} (L_d i_{sd} + M_{fd} i_f) - \omega_r L_q i_{sq} \\ U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} (L_q i_{sq}) + \omega_r (L_d i_{sd} + M_{fd} i_f) \\ U_f = R_f i_f + \frac{d}{dt} (L_f i_f + M_{fd} i_{sd}) \end{cases} \quad (\text{II.82})$$

Mais sous forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_r L_q & 0 \\ \omega_r L_d & R_s & \omega_r M_{fd} \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & L_q & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (\text{II.83})$$

A vide, les courants des phases statoriques sont nuls($i_{sd} = i_{sq} = 0$),alors le système(II.82) devient:

$$\begin{cases} U_{sd} = M_{fd} \frac{di_f}{dt} \\ U_{sq} = \omega_r \cdot M_{fd} i_f \\ U_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.84})$$

L'équation différentielle représentant l'état de la génératrice synchrone fonctionnant à vide.

$$\frac{di_f}{dt} = -\frac{R_f}{L_f} i_f + \frac{U_f}{L_f} \quad (\text{II.85})$$

Si la génératrice est associée par une charge R-L avec une tension d'excitation $U_f=220V$, Le système prend la forme(II. 83), avec:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_{ch}i_{sd} + L_{ch} \frac{di_{sd}}{dt} \\ U_{sq} = R_{ch}i_{sq} + L_{ch} \frac{di_{sq}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II. 86})$$

Si on remplace les expressions de U_{sd} , U_{sq} dans le système(II. 84), on obtient le système suivant:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_s + R_{ch}) & -\omega_r L_q & 0 \\ \omega_r L_d & (R_s + R_{ch}) & \omega_r M_{fd} \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_d + L_{ch}) & 0 & M_{fd} \\ 0 & (L_d + L_{ch}) & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} \quad (\text{II. 87})$$

le système (II. 87) peut s'écrire sous la forme:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} = [L]^{-1} \begin{bmatrix} (R_s + R_{ch}) & 0 & 0 \\ 0 & (R_s + R_{ch}) & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} - \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (L_d + L_{ch}) & 0 & M_{fd} \\ 0 & (L_q + L_{ch}) & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ U_f \end{bmatrix} \quad (\text{II. 88})$$

II. 5.4 La matrice sous forme d'équation d'état

le système(II. 88) est de la forme:

$$\frac{d}{dt} [X] = [A][X] + [B][U] \quad (\text{II. 89})$$

Avec:

$$[A] = -[L]^{-1}[Z] \text{ et } [B][U]$$

$$[X] = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_f \end{bmatrix} \text{ et } [U] = \begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \\ U_f \end{bmatrix}$$

$$[Z] = \begin{bmatrix} (R_s + R_{ch}) & 0 & 0 \\ 0 & (R_s + R_{ch}) & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 & -L_q & 0 \\ L_d & 0 & M_{fd} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[L]^{-1} = \begin{bmatrix} (L_d + L_{ch}) & 0 & M_{fd} \\ 0 & (L_q + L_{ch}) & 0 \\ M_{fd} & 0 & L_f \end{bmatrix}$$

Dans le cas de l'absence des enroulements amortisseurs, l'expression du couple électromagnétique est:

$$C_e = \frac{3}{2}P[\Psi_{sd}i_{sq} - \Psi_{sq}i_{sd}] \text{ ou } C_e = \frac{3}{2}p((L_d - L_q)i_{sd}i_{sq} + M_{fd}i_fi_{sq}) \quad (\text{II.90})$$

II.6 conclusion

Ce chapitre est consacré purement à la modélisation du système à étudier. Nous avons commencé par la modélisation de la chaîne éolienne (vent, turbine, arbre,...), par la suite nous avons présenté la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation à l'aide de la transformation de *park* qui permet le passage de la représentation triphasée à celle biphasée pour la simplification de la modélisation.

Finalement, une modélisation du groupe électrogène diesel, c'est-à-dire la démonstration mathématique du moteur à combustion interne associé par un générateur synchrone.

Il est utile de mentionner que la modélisation de notre système nous l'avons fait pour la simulation numérique sous l'environnement *Mathlab/Simulink*.

Chapitre III:
Programmation, Simulation et
interprétation des résultats

III.1 Introduction:

L'intégration de systèmes virtuels permet de réduire la dépendance au hardware de prototypage, et donne la possibilité aux ingénieurs d'accéder virtuellement au système à n'importe quelle phase du cycle de développement produit. Vous pouvez utiliser *Simulink*[®] pour modéliser, simuler et analyser des systèmes virtuels complexes qui comportent du hardware physique, du software embarqué, des algorithmes, ainsi que l'environnement dans lequel le système opère.

Ainsi que l'automate *Zelio* est une solution assez simple pour automatisé un équipement de part sa facilité de câblage et de mise en œuvre. Le module *ZelioLogic* propose des entrées et sorties directement intégrées dont le nombre et le type dépendra de la référence de l'appareil. Découvrez dans cet article les bases sur l'automate *Zelio* et une initiation à la programmation en langage *Ladder* ou blocs fonctionnels (*FBD*) à l'aide du logiciel *Zelio Soft*.

La simulation de cette partie de travail est basé sur deux moyens numérique, premièrement par le *MATLAB/SIMULINK* et finalement par l'automate *Zelio* avec la programmation en langage *Ladder*.

III.2 Avantage de la Simulation sous l'environnement *matlab/Simulink*:

Grâce à Simulink, vous pouvez :

- Décrire l'architecture système avec des modèles d'architecture intuitifs
- Modéliser des systèmes couvrant plusieurs domaines avec des outils spécifiques à un domaine et des blocs prédéfinis.
- Développer des modèles à grande échelle faciles à maintenir avec des composants réutilisables et prêts à être exécutés.
- Intégrer de façon simple et efficace des composants provenant de différentes équipes et d'outils variés dans une simulation unique au niveau système.
- Simuler et analyser pour comprendre et valider les comportements du système
- Exécuter des tâches de simulation massives en parallèle sur votre ordinateur multi-cœurs, un cluster de calcul, ou dans le cloud.
- Déployer des simulations sous forme d'exécutables autonomes, d'applications web ou de FMU (*FunctionalMockupUnits*).

III.3 Avantage de la Simulation par *zelio/schneider*:

Le mode simulation dans *zelio soft* de *schneider* permet de tester un programme sans qu'il soit nécessaire pour le relais intelligent *ZELIO Logic* de:

- Activation des entrées numériques.
- Affichage de l'état des sorties.
- Variation de la tension des entrées analogiques.
- Activation des boutons de programmation.
- Simulation des programmes d'applications en temps réel ou en temps accéléré.
- Affichage des différents éléments actifs du programme en rouge.



Figure III.1: Image représente le module *schneider4* entrée / 4sortie (Réf : SR2 B121BD)

III.4 Simulation sous l'environnement *matlab/Simulink*:

III.4.1. Description du système:

La figure ci-dessous représente le modèle générique de notre système de simulation. En peut dire que le rôle principale de cette technique c'est la minimisation du coût de consommation de l'énergie électrique dans une compagne isolé.

Le système à étudié est composé de :

- Un générateur synchrone de 480 V, 300 kVA associé à un moteur diesel de 50 Kw.

- Un générateur asynchrone 480 V, 275 kVA associé à une turbine éolienne.
- Une charge principale de 50 Kw.
- Une charge secondaire variable (0 à 446,25 kW).

Le fonctionnements de notre système est basé sur le scénario suivant :

- Lorsque la production de l'énergie éolienne est plus grande que la puissance de la charges principale et secondaire, le générateur synchrone qui est associé à le moteur diesel s'arrête. Ce mode est appelé *mode tout-vent*.
- Si la demande en énergie de la charge principale et secondaire dépasse l'énergie fournie par la turbine éolienne, le générateur diesel prend le rôle d'un complément. son système d'excitation contrôle la tension du réseau à sa valeur nominale.
- Dans cas critique quand la vitesse du vent est nul, le système de réglage coupe e courant électrique de la charge secondaire pour garder l'alimentation de la charge principale.

III.4.2 Description de la régulation :

Pour assurer l'intervention a n'importe quel scénario, il est nécessaire de calculer à chaque instant le couple de la turbine (T_m) en fonction de la vitesse du vent (W_{Wind}) et de la vitesse de la turbine (W_{Turb}).

La charge secondaire est composé de huit résistances triphasées connectés en série avec des commutateurs à thyristor *GTO*. La puissance nominale de chaque résistance suit une progression binaire de sorte que la charge peut varier de 0 à 446,25 kW par pas de 1,75 kW.

La fréquence est contrôlée à l'aide de bloc du régulateur de fréquence. Ce contrôleur utilise un système *PLL (Phase Locked Loop)* triphasé standard pour mesurer la fréquence du système. La fréquence mesurée est comparée à la fréquence de référence (60 Hz) pour obtenir l'erreur de fréquence. Cette erreur est intégrée pour obtenir l'erreur de phase. L'erreur de phase est ensuite utilisée par un contrôleur proportionnel-dérivateur (*PD*) pour produire un signal de sortie représentant la puissance de charge secondaire requise. Ce signal est converti en un signal numérique de 8 bits commandant la commutation des huit charges secondaires triphasées. Afin de minimiser les perturbations de tension, la commutation est effectuée au passage à zéro de la tension.

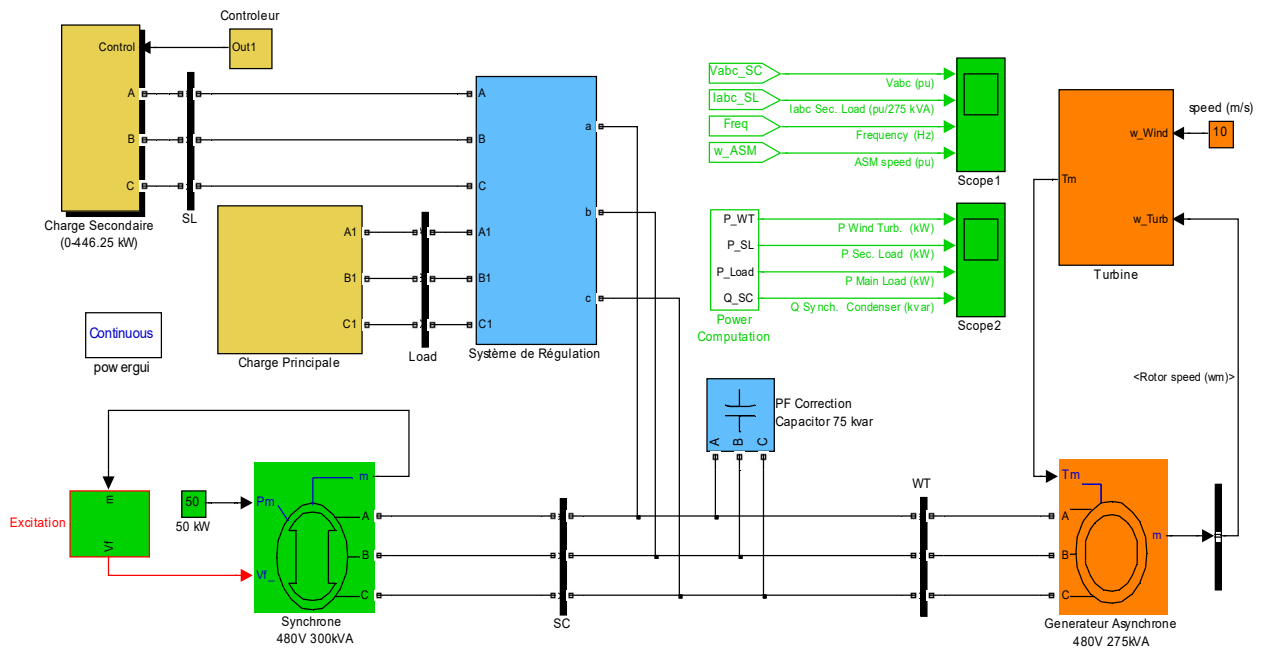


Figure III.2: Schéma bloc de système (*Turbine éolienne – Générateur diesel*)

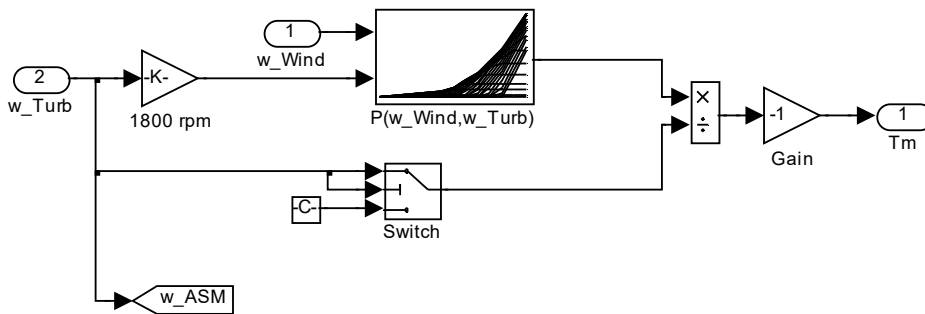


Figure III.3: Schéma bloc de la turbine éolienne

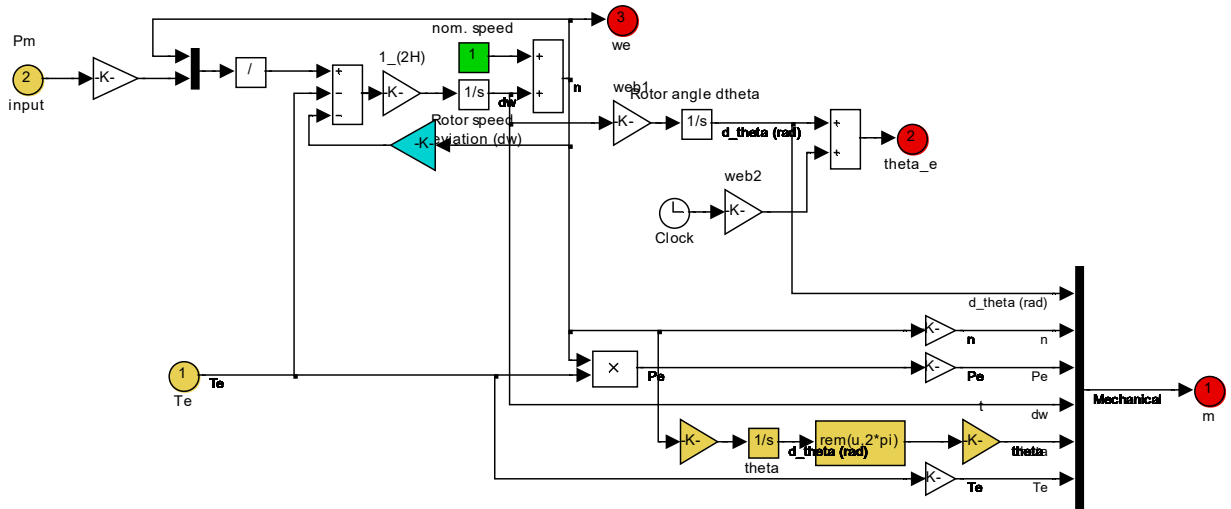


Figure III.4: Schéma bloc du Générateur Synchron (Modèle Mécanique)

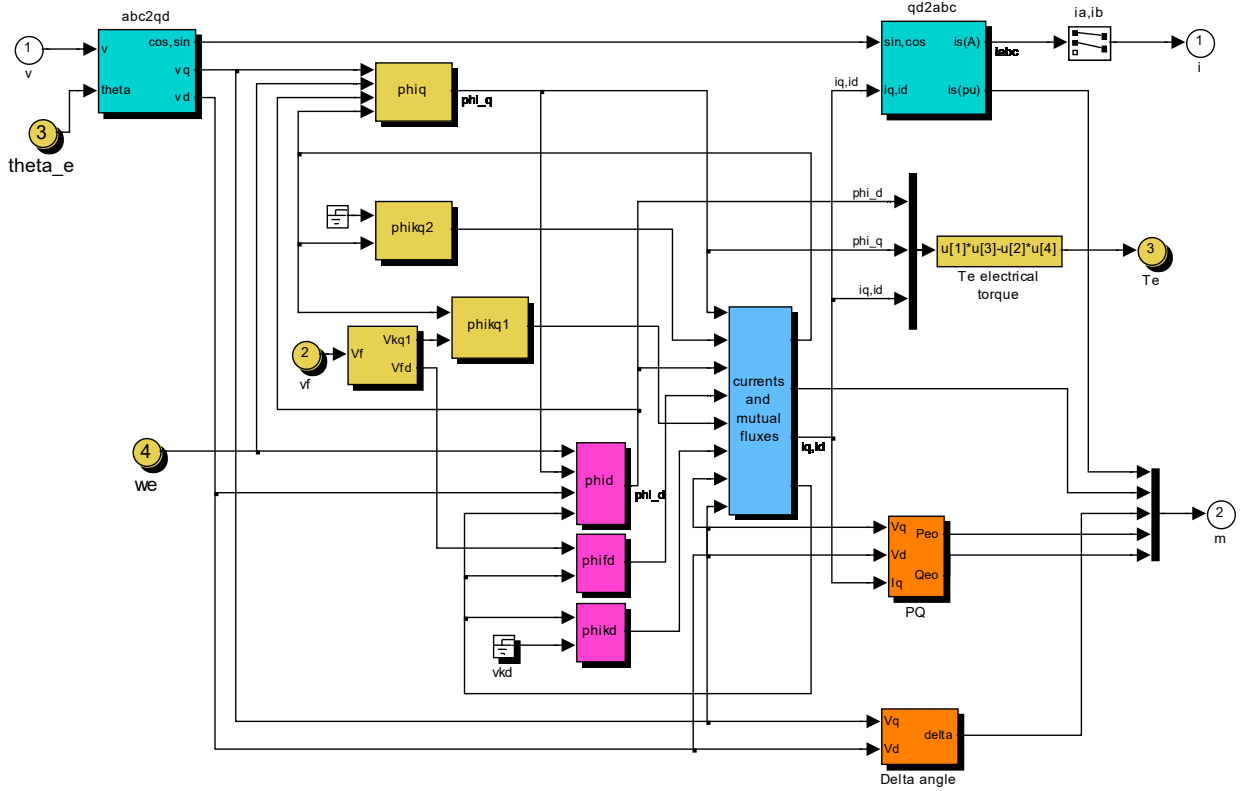


Figure III.5: Schéma bloc du Générateur Synchron (Modèle Electrique)

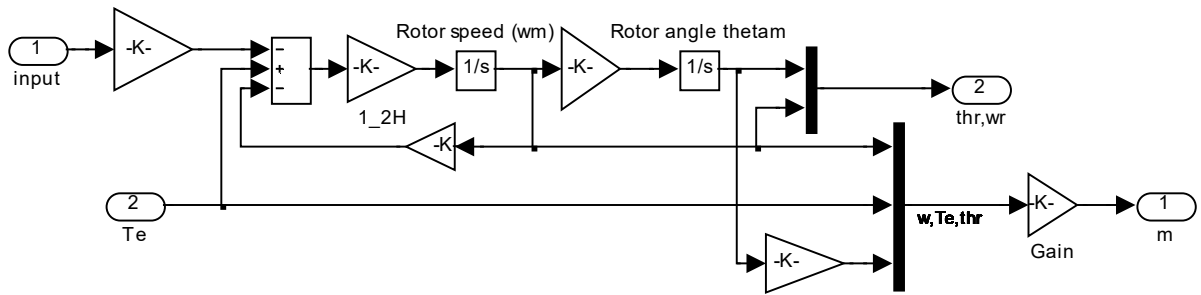


Figure III.6: Schéma bloc du Générateur Asynchrone (Modèle Mécanique)

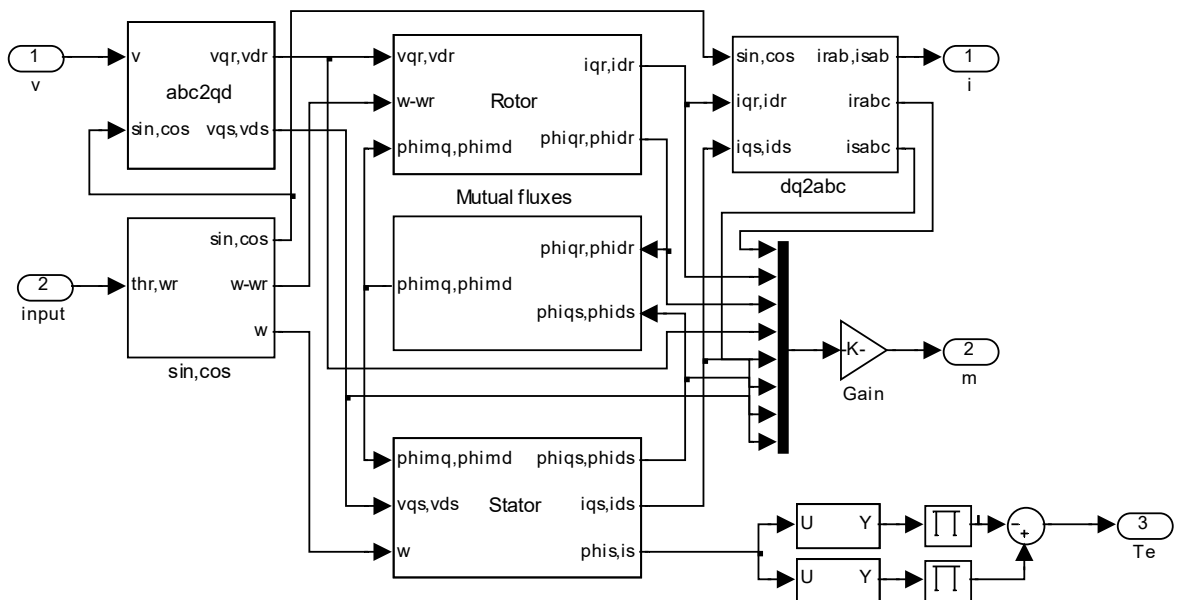


Figure III.7: Schéma bloc du Générateur Asynchrone (Modèle Electrique)

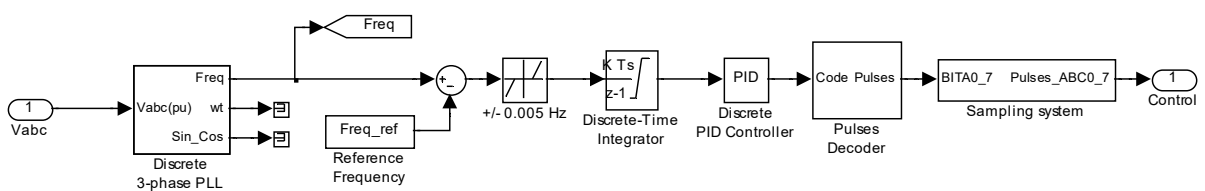


Figure III.8: Schéma bloc du système de régulation

III.4.3. Les résultats de simulation :

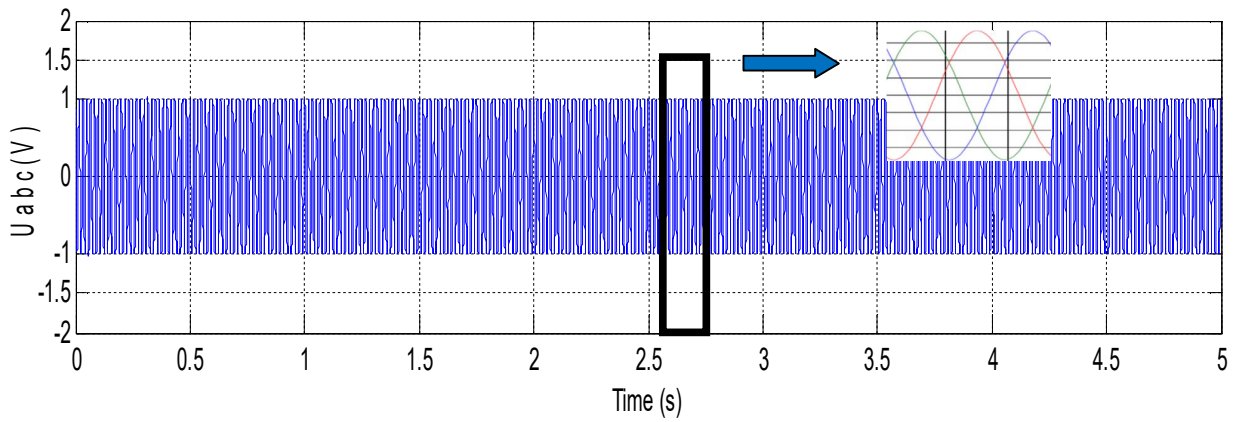


Figure III.9: La Tension de générateur synchrone

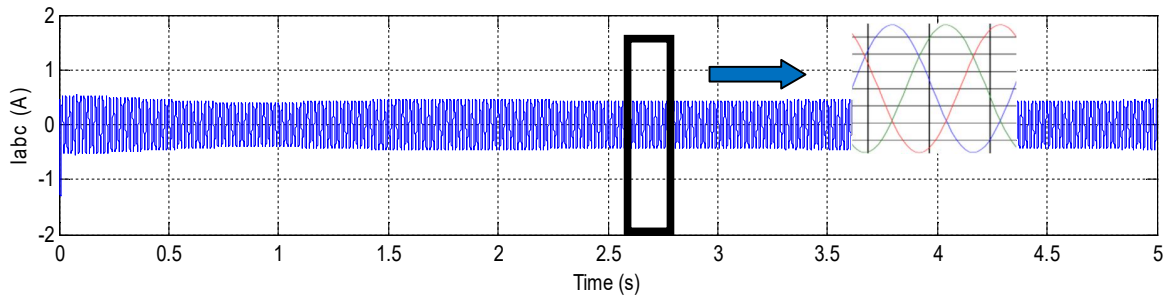


Figure III.10: Le Courant de la charge secondaire

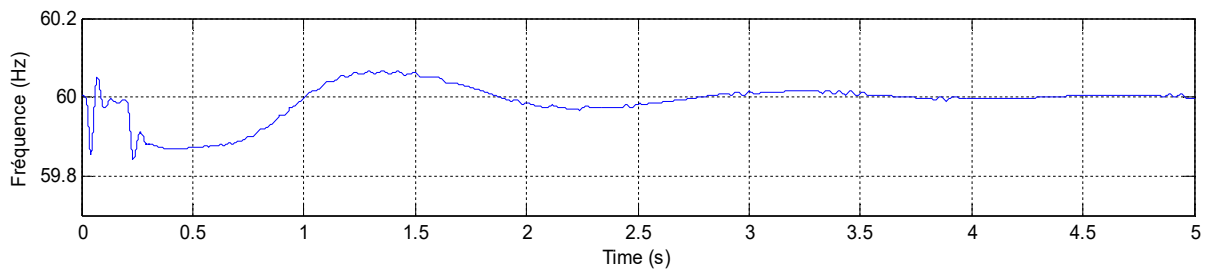


Figure III.11: La Fréquence à la sortie de la régulation

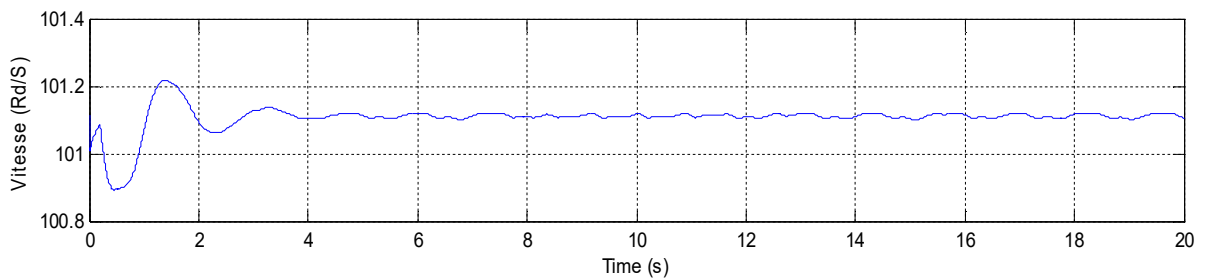


Figure III.12: La Vitesse de rotation de générateur asynchrone

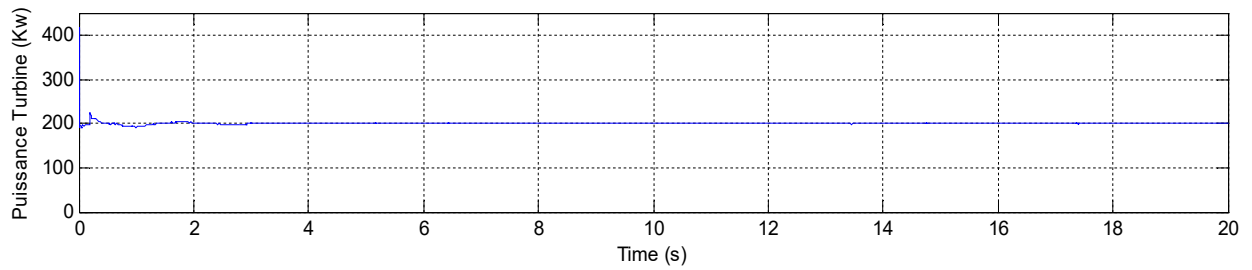


Figure III.13: La puissance électrique de la turbine éolienne

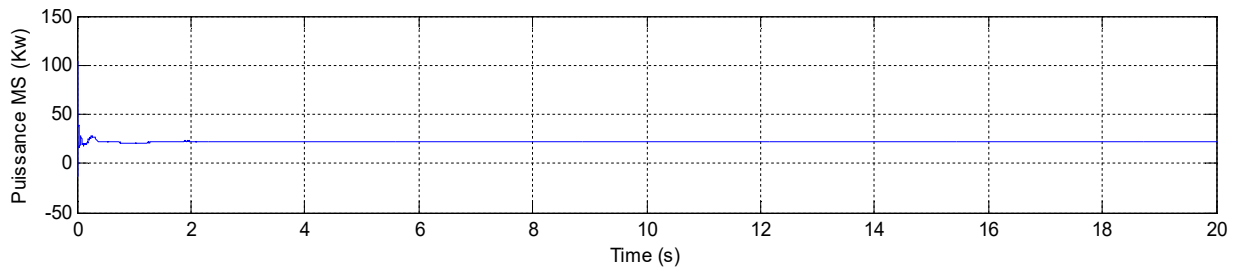


Figure III.14: La puissance électrique de générateur synchrone

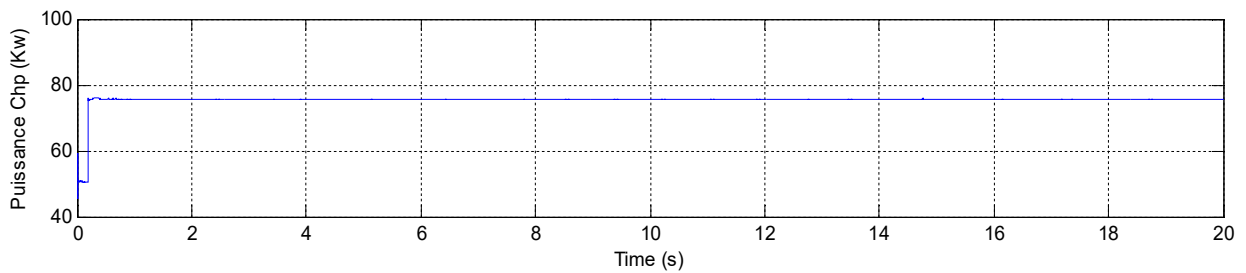


Figure III.15: La puissance électrique de la charge principale

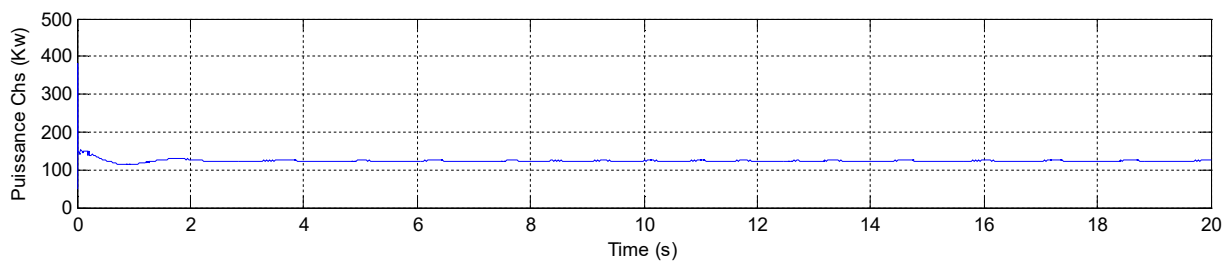


Figure III.16: La puissance électrique de la charge secondaire

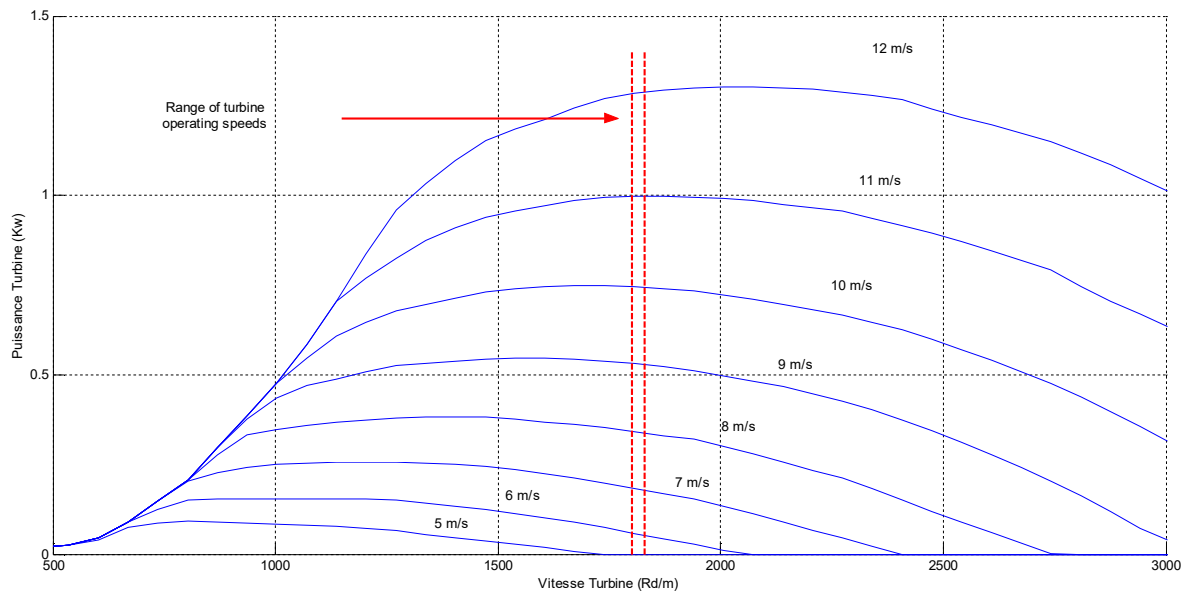


Figure III.17: Les Caractéristiques *Puissance/Vitesse* de la turbine éolienne en fonction de la vitesse du vent

(1 Pu = 275 Kw)

III.4.4. Interprétation des résultats de simulation :

Dans cette partie nous avons simulé quelques paramètres fondamentaux pour illustrer la performance de notre système. Les résultats des simulations numériques montrent que :

- Pour une vitesse du vent supérieure ou égale à (10 m/s), la turbine éolienne produit une énergie électrique largement suffisante pour alimenter les deux charges (principale et secondaire). Donc notre générateur synchrone est arrêté et fonctionne comme un condensateur avec une puissance mécanique nulle.
- Le système de régulation de la fréquence montre des performances dynamiques très intéressantes.
- Selon les caractéristiques de la turbine, pour une vitesse de vent de 10 m/s la puissance de sortie de la turbine est de 0,75 pu (206 kW), 200 kW après les calculs des pertes de la machine asynchrone. Et comme la charge principale est de 50 kW et la charge secondaire absorbe 150 kW donc la turbine produit suffisamment de puissance pour alimenter les charges.

- Les signaux électriques courant et tension montre une bonne qualité c'est-à-dire moins riche des harmoniques et aucun scintillement n'est observé, grâce à la robustesse du système de régulation.

III.5.Simulation sous l'environnement *Zelio Soft 2 (langage Ladder)*:

Cette partie de notre travail est basé sur les mêmes notions que celle de la simulation par *mathlab/simulink*, la différence est de changé le système de régulation classique (*P, PI, PID*) par un autre système utilise l'automate programmable industriel (*API*). Pour notre cas c'est le *Zelio Soft 2* (de *schneider*) en langage *Ladder*.

III.5.1. Description de système:

La figure suivante illustre la description de notre système, il est composé de deux sources d'énergie électrique la première c'est une turbine éolienne associe par un générateur asynchrone et la deuxième c'est un groupe électrogène associe par un générateur synchrone. Ce système alimente deux charge l'une principale et l'autre secondaire.

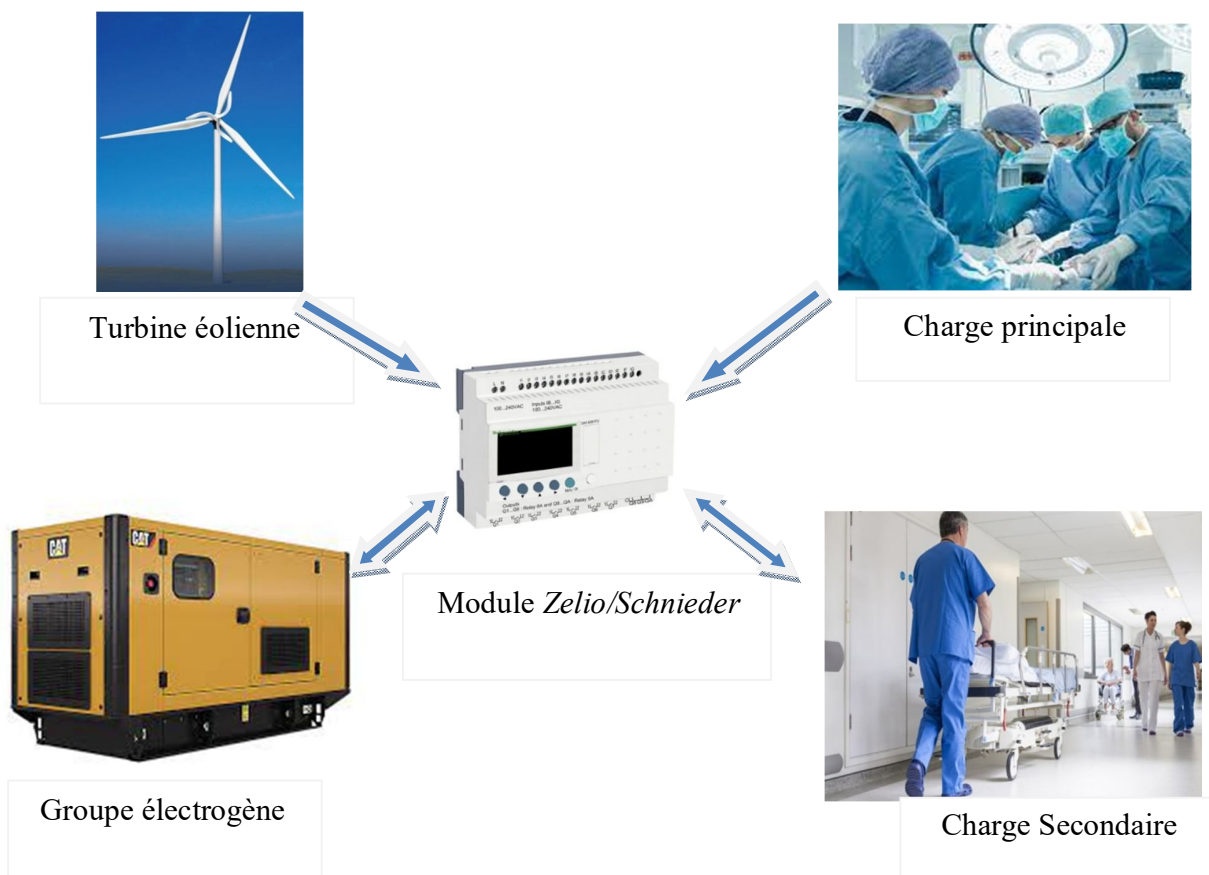


Figure III.18: Représentation et description du système

III.5.2. Grafcet de fonctionnement :

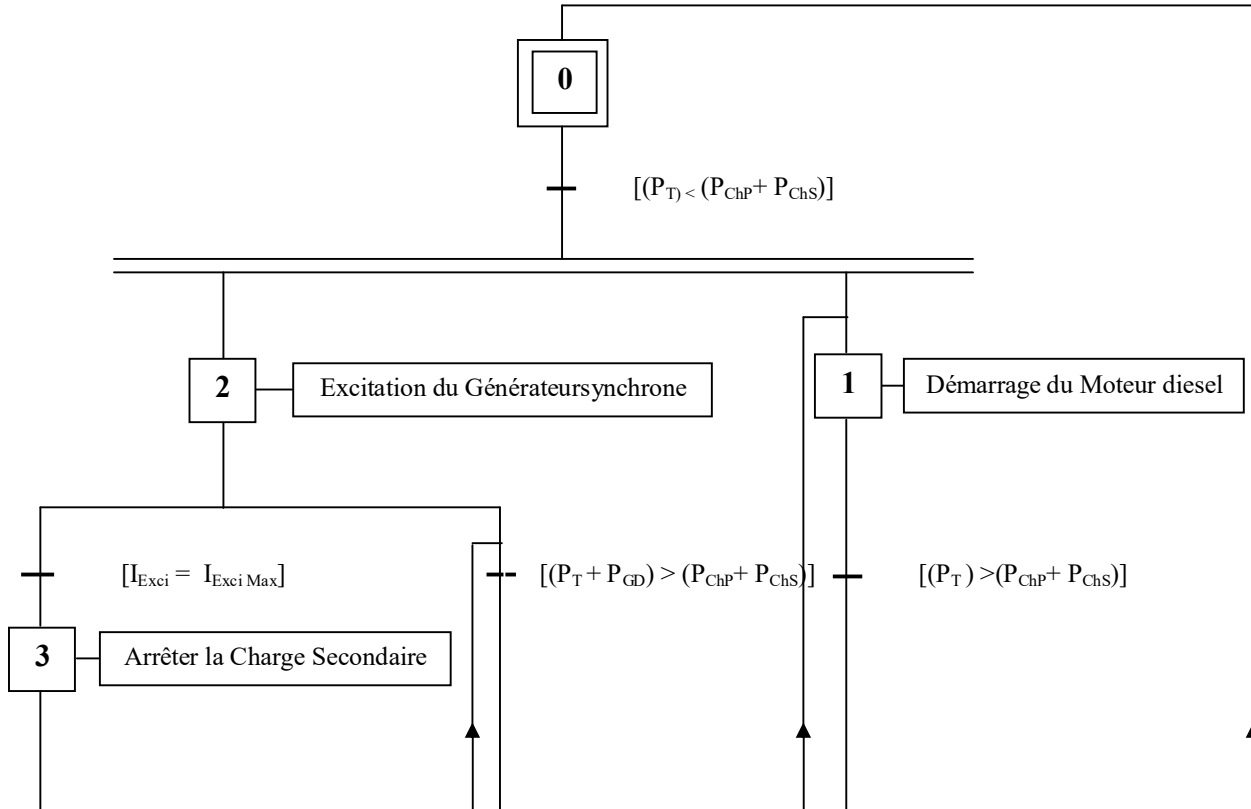
III.5.2.1. Définition :

Le Grafcet (**G**raphe **F**onctionnel de **C**ommande des **É**tapes et **T**ransitions) est un mode de représentation et d'analyse d'un automatisme, particulièrement bien adapté aux systèmes à évolution séquentielle, c'est-à-dire décomposable en étapes.

Le Grafcet est donc un langage graphique représentant le fonctionnement d'un automatisme par un ensemble :

- d'étapes auxquelles sont associées des actions ;
- de transitions entre étapes auxquelles sont associées des conditions de transition (réceptivités) ;
- des liaisons orientées entre les étapes et les transitions.

Son nom est l'acronyme à la fois de « graphe fonctionnel de commande *étapes / transitions* » et, non officiellement, de « graphe du groupe AFCET (*Association française pour la cybernétique économique et technique*) » [46] .

III.5.2.2 Schématiquement de *Grafset* du système:

Avec :

P_T : puissance de la turbine.

P_{GD} : puissance du générateur synchrone.

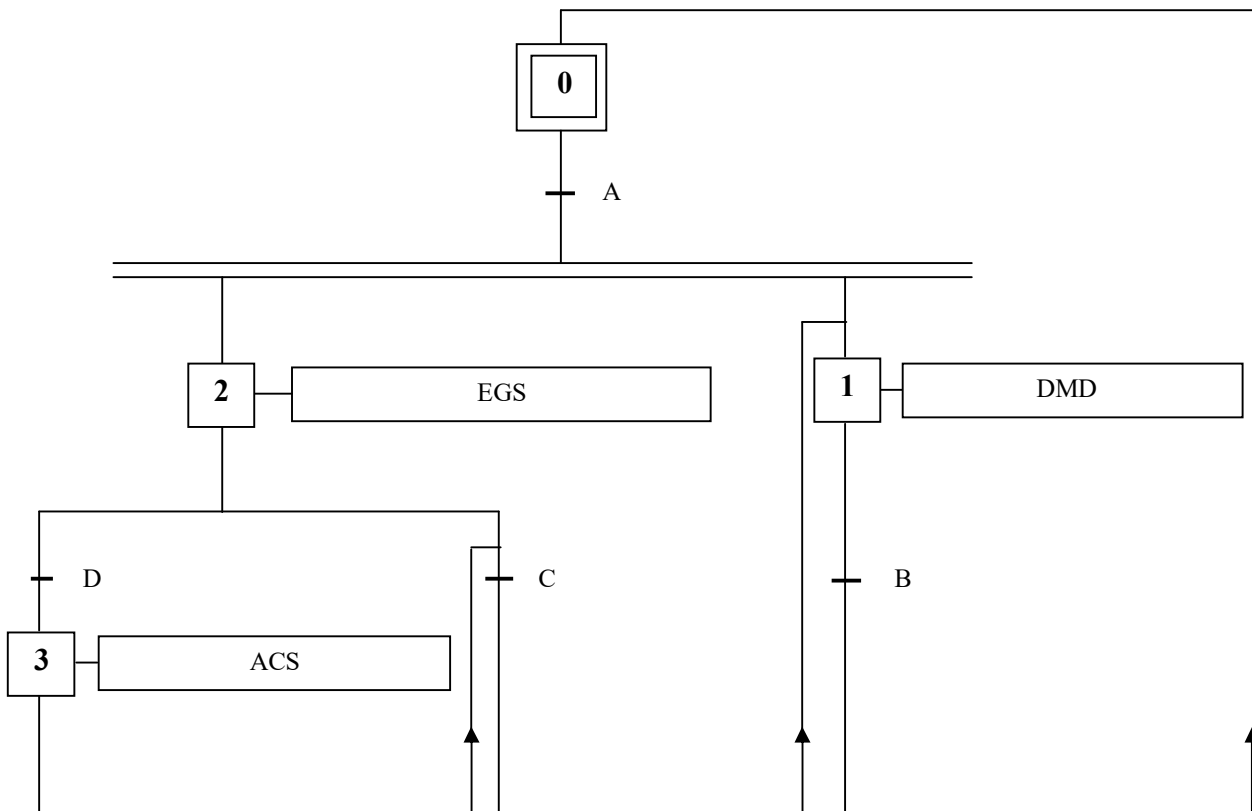
P_{ChP} : puissance de la charge principale.

P_{ChS} : puissance de la charge secondaire.

I_{Exc_i} : courant d'excitation du générateur synchrone.

$I_{Exc_i Max}$: courant d'excitation maximale du générateur synchrone.

III.5.2.3 Grafset du système du point de vue opérative



Avec :

$$A = [(P_T) < (P_{ChP} + P_{ChS})].$$

$$B = [(P_T) > (P_{ChP} + P_{ChS})].$$

$$C = [(P_T + P_{GD}) > (P_{ChP} + P_{ChS})].$$

$$D = [I_{Exci} = I_{Exci Max}].$$

EGS : Excitation du Générateur synchrone.

DMD : Démarrage du Moteur diesel.

ACS : Arrêter la Charge Secondaire.

III.5.2.4. Mise en équations du programme :Input :

A ; B ; C ; D.

Output :

EGS ; DMD ; ACS.

Equation SET :

$$SX_0 = X_1 \cdot B + (\overline{X_0} \cdot \overline{X_1} \cdot \overline{X_2} \cdot \overline{X_3})$$

$$SX_1 = X_0 \cdot A + X_2 \cdot C + X_3 \cdot C$$

$$SX_2 = X_0 \cdot A$$

$$SX_3 = X_2 \cdot D$$

Equation RESET :

$$RX_0 = X_0 \cdot A$$

$$RX_1 = X_1 \cdot B$$

$$RX_2 = X_2 \cdot D + X_2 \cdot C$$

$$RX_3 = X_3 \cdot C$$

Fonction de output :

$$DMD = X_1$$

$$EGS = X_2$$

$$ACS = X_3$$

III.5.2.5. Schéma du programme : (voir l'annexe)**III.6. Conclusion :**

Ce chapitre est consacré à la simulation numérique de notre système sous l'environnement deux moyens comme suite :

- 1) par le *MATLAB/SIMULINK* avec l'utilisation des régulateurs classiques .
- 2) par l'*automate Zelio* avec la programmation en langage *Ladder* .

D'abord nous avons mentionné les avantages de la simulation numérique sous l'environnement *matlab/Simulink* puis sous l'environnement *zelio/schneider*.

Ensuite on a présenté une description du système sous l'environnement *matlab/Simulink* ainsi que la description de la régulation classique (*P, PI, PID*), suivi par les résultats des simulations et l'interprétation des paramètres fondamentaux pour illustrer les performances de notre système.

Dans la dernière partie de ce chapitre qui concerne la simulation sous l'environnement *Zelio Soft 2* par le langage *Ladder*, nous avons gardé les mêmes notions que celle de la simulation par *matlab/simulink*, la différence est de changer le système de régulation classique (*P, PI, PID*) par un autre système utilisant l'automate programmable industriel (*API*). Le schéma du programme est placé en *annexe* de cet travail.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Une bonne partie des problèmes écologiques contemporains sont liés à des questions énergétiques. Le changement climatique et toutes ses conséquences sur la planète, par exemple, sont essentiellement liés à la façon dont nous produisons notre énergie, puisque ce sont les énergies que nous utilisons (notamment les énergies fossiles) qui créent le problème de l'effet de serre et des émissions de CO₂.

La pollution de l'air est également une question énergétique, puisque ce sont encore ces énergies qui produisent les particules fines et la plupart des gaz polluants. Notre consommation d'énergie utilise également de nombreuses ressources, minéraux, matériaux plus ou moins rares, qu'il faut produire.

Pour résoudre ces problèmes, une solution est régulièrement mise en avant : les énergies renouvelables. Ces dernières années, les énergies renouvelables (l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie marine, l'hydraulique, l'hydrogène « vert » ou renouvelable ou encore la biomasse) se sont développées partout dans le monde. Sur le papier l'idée paraît excellente : contrairement aux centrales à charbon, une éolienne ou un panneau solaire produisent de l'électricité sans émettre de CO₂. Il suffit que le vent fasse tourner l'hélice ou que le soleil atteigne le panneau. Ainsi, si l'on prend en compte l'ensemble du cycle de vie d'une source de production d'électricité d'origine éolienne (de sa fabrication à sa fin de vie), elle génèrera environ 11 g de CO₂ par kWh d'électricité produite, contre plus de 800 pour une centrale à charbon !

De même, du gaz produit à partir de déchets végétaux (des ressources renouvelables) permettrait en théorie de dégager moins de CO₂ et moins de pollutions.

Les promesses du renouvelable sont donc nombreuses : produire de l'énergie sans émettre de CO₂, sans déchets radioactifs dangereux, en n'utilisant que des ressources plus ou moins infinies (le vent ou le soleil, la biomasse). Selon les calculs de plusieurs études, on pourrait théoriquement alimenter la planète entière en électricité avec seulement 500 000 km carré de panneaux solaires par exemple (soit à peine la surface de l'Espagne). En théorie, il serait donc relativement simple d'investir massivement dans les énergies renouvelables, pour produire enfin une énergie propre et non polluante.

Mais les énergies renouvelables n'ont pas que des avantages. Toutes les sources de production d'énergie dites renouvelables ont des impacts environnementaux et leur production n'est pas toujours si simple qu'il n'y paraît.

Donc on peut dire que le problème major de énergie renouvelable c'est qu'il est dépendant des conditions climatiques, cette dernière est variable tout le temps. On à deux solutions pour cette problématique, soit de coupler les générateurs par un système de stockage pour assurer la continuité d'alimentation en énergie, ou bien d'installer un groupe électrogène fonctionne d'une façon complémentaire avec le générateur qui utilise les sources renouvelables, et c'est le cas de notre travail.

Nous avons présenté l'étude d'un système hybride composé d'une turbine éolienne associe par un générateur diesel à vitesse variable, la variation de vitesse est inversement proportionnelle à la vitesse de la turbine pour assurer la continuité d'alimentation d'énergie électrique en terme présence et valeur. Donc le système proposé dans ce travail est adaptatif aux variation de la vitesse du vent, d'après l'analyse des résultats obtenu on constate que on a atteint les objectifs fixés.

Nous résultats de simulation sont obtenues par de deux moyens numérique, premièrement par le *MATLAB/SIMULINK* puis par l'Automate Programmable Industriel (*Zelio de schneider electric*) en langage *Ladder*.

Comme perspective on peut dire que notre système qui à été proposé peut être exécuté au niveau des sites isolés ou dans les endroits sensibles comme par exemple les hôpitaux de campagne, mais il est insuffisant de satisfait le besoin d'alimentation en énergie électrique, c'est pour cette raison nous proposons de diversifier les sources d'énergie en ajoutant l'énergie solaire.

Bibliographie

- [1] POITIERS Frédéric, ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE- Machine asynchrone à cage autonome- Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat ,Université Nantes, 2003.
- [2] FEDDAOUI Omar, Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération : Application aux Energies Renouvelables, mémoire de Magister, Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014.
- [3] REDJEM Radia, Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, diplôme de magistère, UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE, 2009.
- [4] BENGHORZI Abderrahim. Benhadda Houcine, Etude et simulation d'une éolienne avec une machine asynchrone double alimentation, diplôme de Master, Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, 2019/2020.
- [5] BOUARAKI Mouloud, Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF, Mémoire de Magister, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, 2011/2012.
- [6] OTMANE Rachedi Meriem. Modélisation et Commande d'un Système de Conversion d'Energie Eolienne, diplôme de Doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA, 2020/2021.
- [7] FERKOUS Khaled, ETUDE D'UNE CHAINE DE CONVERSION D'ENERGIE EOLIENNE, DIPLOME DE MAGISTER, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, 2009.
- [8] KOUSSA Saheb, Production d'électricité par un générateur éolien, Recherche et Développement, N°13 Juin 2008.
- [9] TAMAARAT Azzouz, Modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire de magister, UNIVERSITE MOHAMMED KHIDER – BISKRA, 2009.

[10] CHEMIDI Abdelkrim, Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme, Diplôme De Doctorat, Université Abou Bekr Belkaid- Tlemcen, 2014-2015.

[11] BRIZON Diane, Nathalie Schild, Aymeric Anselm, Mehdi Nasser,

[https://sites.uclouvain.be/e-](https://sites.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/Generalites/GeneralitesEolien3.html)

[lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/Generalites/GeneralitesEolien3.html](https://sites.uclouvain.be/e-lee/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/FiliereEolienne/Generalites/Generalites/GeneralitesEolien3.html)vu 10-02-2023.

[12]BENCHERIF Yacine Abderrahmane, Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne, diplôme d'Ingénieur, Ecole Nationale Polytechnique E.N.P- 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, Alger, Juin 2008.

[13] J. Ancel, Machines Asynchrones, Fonctionnement et Calcul, Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie électrique, D 451-9, D3II.

[14] TIR Zoheir, Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade, Mémoire de Magister, Ingénieur d'Etat en Electrotechnique de l'Université de Batna, Université Ferhat Abbas de Setif, 06 /07 /2010.

[15] HAMDY Naouel, Modélisation et commande des génératrices éoliennes, diplôme de magister, Université MENTOURI de CONSTANTINE, 2008.

[16] LAKROUZ Madjid. SADI Tarik, ÉTUDE ET SIMULATION D'UNE CHAÎNE DE CONVERSION D'ÉNERGIE ÉOLIENNE, diplôme d'ingénieur, UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI OUZOU, 2011.

[17] MAACHA Rachid, Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation, diplôme D'Ingénieur d'Etat en Automatique, UNIVERSITE MOULOUDE MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2010/2011.

[18] MIRECKI Adam, étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance , thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse Unité Mixte de Recherche CNRS N° 5828,2005.

- [19] CHERFIA Naïm, Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens, MÉMOIRE Présenté pour obtenir LE GRADE DE MAGISTER EN ÉLECTROTECHNIQUE, Université Mentouri – Constantine,2010.
- [20]BENNANI Hakim, MACHINE ASYNCHRONE A DOUBLE ALIMENTATION, Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval dans le cadre du programme de maîtrise en génie électrique pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.), UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2011.
- [21] CHELLIG Samia, Impact des Fermes Eoliennes sur la Stabilité De Tension dans les Réseaux Electriques, Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS — SETIF,2012.
- [22] ZAHI Sabeh, Diagnostic à base de modèle : application `a un moteur diesel suralimenté à injection directe, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine- Centre de Recherche en Automatique de Nancy, 2006.
- [23] R. Zaâmouche, M. Kadja, A. Merabet& O. Kolai, MODELISATION DE LA CONDUCTION A TRAVERS LES PAROIS DE LA CHAMBRE DE COMBUSTION D'UN MOTEUR A COMBUSTION INTERNE, Laboratoire d'Energétique Appliquée et de Pollution, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri de Constantine, Route de Ain-El-Bey, Constantine, Synthèse N° 15 Juin 2006.
- [24] LABED Fayçal, Détection des défauts dans le système de combustion d'un moteur Diesel, diplôme de Magister, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA,2007.
- [25] Cycle d'un moteur a quatre temps-Media LAROUSSE, voir le lien https://www.larousse.fr/encyclopedie/images/Cycle_dun_moteur_%C3%A0_quatre_temps/1003658 vu 29-04-2023.
- [26] FONCTIONEMENT D'UN MOTEUR THERMIQUE,23 juillet 2001, l'esprit Golfy-les moteurs thermiques <http://golfy.free.fr/voitures/fonctionnement/moteur.html> vu 30-04-2023.
- [27]IBRAHIM Hussein, ETUDE ET CONCEPTION D'UN GENERATEUR HYBRIDE D'ELECTRICITE DE TYPE ÉOLIEN-DIESEL AVEC ÉLÉMENT DE STOCKAGE D'AIR COMPRIMÉ, Thèse DOCTORAT EN INGÉNIERIE, UNIVERSITÉ DU QUEBEC À CHICOUTIMI, juin2010.
- [28]BERNARD Nicolas, MACHINE SYNCHRONE: DE LA BOUCLE OUVERTE A L'AUTOPILOTAGE, 3EI.n° 30. 2002. pp. 24-39.

- [29] LATRECHE Mohammed Tahar, Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.
- [30]MAYOUF Messaoud, ETUDE COMPARATIVE DES ARCHITECTURES ET STRATEGIES DE CONTROLE D'UN AEROGENERTEUR SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTES, diplôme de DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE, l'Université Hadj Lakhdar Batna,2014.
- [31]MAGHSEL Saliha, CONTRIBUTION A LA MODELISATION ET LA COMMANDE D'UNE TURBINE EOLIENNE, diplôme de Magister, UNIVERSITE DU 20 AOÛT 1955 – SKIKDA, 2010-2012.
- [32] Mishkat energy-wind Energy- <https://youtu.be/fcSlhpA9QUw> vu 01-04-2023.
- [33]METATLA Samir, OPTIMISATION ET REGULATION DES PUISSANCES D'UNE EOLIENNE A BASE D'UNE MADA, Ingénieur en Électrotechnique ENP, ÉCOLE NATIONALE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE D'ALGER, 2009.
- [34]OUBBICHE Mahieddine, ABIKCHI Mohammed , Modélisation et simulation d'un générateur asynchrone à turbine éolienne, diplôme de MASTER ACADEMIQUE , Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued , 2017-2018.
- [35] BEN AMAR Asma, ETUDE DE LA COMMANDE D'UN SYSTEME ÉOLIEN BASE SUR UNE GADA, diplôme de MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE, Université Hadj Lakhdar – Batna, 2016.
- [36] MOUSSA Oussama, Contribution au contrôle d'un système éolien basé sur une MADA sans balais, Thèse Docteur en Sciences en Electrotechnique, Université Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd.
- [37] BOUMARAF Farid, Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle, Thèse Doctorat En Sciences En Electrotechnique, UNIVERSITE DE BATNA, 2014.
- [38] GUERGAT Hacene, Etude éolienne à base d'une machine asynchrone double stator type BDFM, diplôme de Magister, UNIVERSITE DU 20 AOÛT 1955 – SKIKDA, 2014.

- [39] F. Kendouli*, K. Nabti, K. Abed et H. Benalla, Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation, Université Mentouri, Route Ain El Bey, Constantine, Algérie, Revue des Energies Renouvelables Vol. 14 N°1 (2011) 109 – 120.
- [40] EL AIMANI Salma, MODELISATION DE DIFERENTES TECHNOLOGIES D'EOLIENNES INTEGREES DANS UN RESEAU DE MOYENNE TENSION,THESE de DOCTORAT,UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE,2004.
- [41] SOUFI Youcef, Modélisation et diagnostic d'une association convertisseur machine électrique, THESE du Doctorat en Sciences, Université Badji Mokhtar – ANNABA, 2012.
- [42]TOMMY ANDY THEUBOU TAMEGHE, MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME DE JUMELAGE ÉOLIEN-DIESEL ALIMENTANT UNE CHARGE LOCALE, Mémoire de LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC,2012.
- [43] Machine Synchrone Introduction , <http://www.elharzli.com/MS.php> ,vu le 3mai2023.
- [44] MADI Siham, Lamamra Wassim, Application d'une commande non linéaire dans une chaîne de conversion éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent, diplôme de master,UNIVERSITE A.MIRA Bejaia,2020-2021.
- [45] ABDESSEMED Rachid, Modélisation et simulation des machines électriques,ellipses, France,2011.
- [46]<https://fr.wikipedia.org/wiki/Grafcet> vu 10-05-2023

Annexe

BAADI.zm2 - v0.0



Titre

Informations de programme

Auteur : Auteur

Nom du Projet : Titre

Version : 0.0

Module : SR2B121BD

Période d'exécution de l'application dans le module : 8 x 2 ms

Action du WATCHDOG : Inactif

Type de Filtrage Matériel des Entrées : Lent (3ms)

Touches Zx inactives

Format de la date : dd/mm/yyyy

Changement d'horaire d'été / hiver actif

Zone : Europe

Passage en heure d'été : Mars, dernier dimanche

Passage en heure d'hiver : Octobre, dernier dimanche

BAADI.zm2 - v0.0



Titre

Schéma du programme

No	Contact 1	Contact 2	Contact 3	Contact 4	Contact 5	Bobine	Commentaire
001	M2	I2				SM1	()
002	X1 m1	B m2	m3	m4		X0	
003	X0 M1	X1 I1				SM2	()
004	X0 M3	A I3				X1	
005	X2 M4	C I3					
006	X3 M1	C I1				SM3	()
007	X0 M3	A I4				X2 SM4	()
008	X2 M1	D I1				X3 RM1	()
009	X0 M2	A I2				X0 RM2	()
010	X1 M3	B I4				X1 RM3	()
011	X2 M3	D I3				X2	
012	X2 M4	C I3				RM4	()
013	X3 M2	C				X3 [Q2	()
014	X1 M3					DMD [Q1	()
015	X2 M4					EGS [Q3	()
	X3					ACS	

BAADI.zm2 - v0.0



Titre

Entrées physiques

No	Symbole	Fonction	Verrou	Paramètres	Localisation (L/C)	Commentaire
I1		Entrées TOR	---	Pas de paramètres	(3/2) (6/2) (8/2)	A
I2		Entrées TOR	---	Pas de paramètres	(1/2) (9/2)	B
I3		Entrées TOR	---	Pas de paramètres	(4/2) (5/2) (11/2) (12/2)	C
I4		Entrées TOR	---	Pas de paramètres	(7/2) (10/2)	D

Sorties physiques

No	Symbole	Fonction	Rémanence	Localisation (L/C)	Commentaire
Q1		Sorties TOR	Non	(14/6)	EGS
Q2		Sorties TOR	Non	(13/6)	DMD
Q3		Sorties TOR	Non	(15/6)	ACS

Fonctions paramétrables

No	Symbole	Fonction	Verrou	Rémanence	Paramètres	Localisation (L/C)	Commentaire
M1		Relais auxiliaires	---	Non	Pas de paramètres	(1/6) (2/1) (3/1) (6/1) (8/1) (8/6)	X0
M2		Relais auxiliaires	---	Non	Pas de paramètres	(1/1) (2/2) (3/6) (9/1) (9/6) (13/1)	X1
M3		Relais auxiliaires	---	Non	Pas de paramètres	(2/3) (4/1) (6/6) (7/1) (10/1) (10/6) (11/1) (14/1)	X2
M4		Relais auxiliaires	---	Non	Pas de paramètres	(2/4) (5/1) (7/6) (12/1) (12/6) (15/1)	X3