

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : Amira Sefsaf

Ilhem Beldjerba

Thème

**Modélisation et contrôle d'un  
aérogénérateur connecté au réseau**

Soutenu publiquement, le 28 /09 /2020 , devant le jury composé de :

Dr. Mohammed MABROUKI	MCA	ESSA. Tlemcen	Président
Dr. Mama BOUCHAOUR	MCB	Univ-Tlemcen	Directrice de mémoire
Dr. Laarej MERAD	MCA	Univ-Tlemcen	Co-Directeur de mémoire
Dr. Imen BOUSMAHA	MCB	ESSA.Tlemcen	Examineur 1
Dr. Abd El Karim CHEMIDI	MCB	Univ-Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2019 /2020

## REMERCIEMENTS

Ce travail est l'aboutissement d'un dur labeur et de beaucoup de sacrifices. Nos remerciements vont d'abord au Créateur de l'univers qui nous a doté d'intelligence, et nous a maintenu en santé pour mener à bien cette année d'étude.

Nous tenons à remercier notre encadrante Dr.Mama BOUCHAOUR, maitre de conférences (B) à l'université de Tlemcen, pour ses conseils, sa disponibilité et son encadrement.

Nos remerciements vont aussi à notre Co-encadrant Dr.Laarej MERAD, maitre de conférences (A) à l'université de Tlemcen, pour son soutien et ces conseils.

Nos vifs remerciements vont également aux membres de jury d'avoir accepté d'évoluer ce modeste mémoire et de l'enrichir par leurs remarques :

- ❖ Monsieur Mohammed MABROUKI, Maitre de conférences (A) à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen (ESSAT). Il nous a fait l'honneur d'accepter de juger notre travail et de présider le jury.
- ❖ Madame Imen BOUSMAHA, Maitre de Conférences (B) à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen (ESSAT). Elle a bien accepté de juger notre travail.
- ❖ Monsieur Abd El Karim CHEMIDI, Maitre de Conférences (B) à l'université de Tlemcen. Il a bien voulu juger notre travail.

Nous remercierons profondément Mr. Mourad LOUCIF et Mr. Ismail BOUSSERHANE pour l'aide inestimable et pour leurs encouragements.

On n'oublie pas nos familles pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements. Nous remercions toute personne ayant apporté un plus, de près ou de loin à l'élaboration du présent travail.

## *Dédicace*

*Du profond de mon cœur, Je dédie ce travail à ceux qui me  
sont chers,*

*A ma très chère mère*

*Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te  
remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta  
bienveillance me guide et ta présence à mes cotés a toujours  
été ma source de force pour affronter les différents obstacles.*

*A ma grand-mère*

*Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me  
portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction  
m'accompagne toujours.*

*A mes sœurs Faïza et Khansaà, qui m'avaient toujours  
soutenu et encouragé durant ces années d'études.*

*A toute personne ayant contribué de près ou de loin à  
l'avancement de ce travail*

*A mon cher binôme "Ilhem" et toute sa famille, un  
remerciement spécial.*

*A tous ceux que j'aime*

*Merci*

*Amira*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à*

*A mes parents, à ma précieuse maman ZOËRA qui grâce à elle je suis arrivée là où j'en suis aujourd'hui, à mon cher papa HOUARI que Dieu vous préserve et vous garde la santé*

*A mes sœurs SOUMIA, FAIZA et CHAHINEZ*

*A mon fiancé IMAD qui m'a toujours encouragé*

*A mes chères amies LYDIA, CHAIMAA et FATIMA*

*A ma copine et mon binôme AMIRA ainsi que toute sa famille*

*A toute personne qui m'est chère au cœur.*

*ILHEM*

## Liste de symbole:

$\rho$	Masse volumique de l'air (en Kg/m <sup>3</sup> )
$V(t)$	Vitesse instantané du vent (en m/s)
$E_c$	L'énergie cinétique (en Joules)
$P_{\text{éolienne}}$	La puissance de l'éolienne
$P_{\text{vent}}$	La puissance du vent
$C_p$	Coefficient de puissance
$V_1$	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur
$V_2$	Vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur
$F$	La force de l'air
$P_m$	La puissance absorbé par le rotot
$\Omega_t$	Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.
$R_t$	Rayon de la surface balayée en m.
$S$	Surface balayée par la turbine [m <sup>2</sup> ]
$\beta$	Angle d'orientation des pales [rad]
$V$	Vitesse de vent en m/s.
$\lambda$	La vitesse spécifique
$V_v(t)$	La vitesse du vent instantanée
$A$	La valeur moyenne de la vitesse du vent .
$a_k$	Amplitude de l'harmonique de l'ordre K
$w_k$	Pulsation de l'harmonique de l'ordre K
$i$	Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent
$G$	Rapport de multiplication.
$C_t$	Couple mécanique de la turbine éolienne [N.m],
$C_{mec}$	Couple mécanique sur l'axe de la génératrice [N.m],
$\Omega_r$	Vitesse de la génératrice (arbre rapide en rd/s),
$\Omega_t$	Vitesse de rotation des pales (arbre lent en rd/s).
$J$	Inertie totale des parties tournantes [kg.m <sup>-3</sup> ],
$F$	Coefficient de frottement visqueux,
$C_{em}$	Couple électromagnétique de la génératrice [N.m].
$P_{opt}$	La puissance optimale
$\lambda_{opt}$	La vitesse spécifique optimale
$\Omega_{ref}$	La vitesse de référence

$v_{s,123}$	Les tensions simples d'alimentation du stator
$i_{s,123}$	Les courants dans l'enroulement triphasé du stator
$l_s$	L'inductance propre d'une phase
$m_s$	L'inductance mutuelle entre deux phases du stator
$\theta$	La distance angulaire que fait le pôle nord de la roue polaire avec l'axe de la phase $i$ de l'armature fixe
$C_r$	Couple résistant
$f$	Coefficient de frottement visqueux
$\Omega_{mec}$	Vitesse angulaire mécanique rotorique
$V_{abc}, V_{dq}$	Tensions statoriques de la MSAPA dans le repère réel et de Park respectivement
$\phi_f$	Le flux traversant l'enroulement inducteur
$l_s$	Inductance de l'enroulement statorique
$R$	Résistance de l'enroulement statorique
$T_e$	Couple électromagnétique
$P(t)$	Puissance instantanée mise en jeux par le moteur
$L_d$	Inductance statorique directe [H].
$L_q$	Inductance statorique quadrature [H].
$P(\theta)$	Matrice de la transformation de Park.
$[P(\theta)]^{-1}$	Matrice inverse de Park.
$[M_{sf}]$	La matrice d'inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator.
$L_s$	La matrice des inductances et des inductances mutuelles
$m_s$	L'inductance mutuelle entre deux phases du stator
$V_1, V_2, V_3$	Tensions d'entrée entre phases du redresseur [V]
$V_{sab}, V_{sbc}, V_{sca}$	Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI
$e_{abc}$	Les tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre
$u_d(t), v_{dc}$	Tension redressée
$K_t$	Une constante
$K_p, K_i$	Actions proportionnelle et intégrale
$\omega_r$	Pulsation de coupure rad/s
$e_d, e_q$	Composantes de la force électromotrice de compensation
GSAP	génératrice synchrone aimant permanent

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
NACA	National Advisory Commit for Aeronautics
MPPT	Maximum Power Point Tracker

## Listes des figures :

<i>Figure (I.1) : Composants d'un aérogénérateur.....</i>	<i>5</i>
<i>Figure (I.2) : Différents types d'éolienne verticale de types Darrieus.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure (I.3) : Eolienne verticale de type Savonius.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure (I.4) : Aérogénérateur à axe horizontal.....</i>	<i>11</i>
<i>Figure (I.5) : éolienne à vitesse fixe directement connecté au réseau.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure (I.6) : Aérogénérateur à vitesse variable.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure (I.7) : Conversion d'énergie dans un aérogénérateur.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure (I.8) : Machine asynchrone dans une chaine de conversion d'énergie éolienne.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure (I.9) : MADA dans une chaine de conversion d'énergie éolienne.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure (I.10) : Structure des machines à induit fixe et inducteur tournant.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure (I.11) : Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants.....</i>	<i>17</i>
<i>Figure (I.12) : Machine synchrone dans une chaine de conversion d'énergie éolienne.....</i>	<i>18</i>
<i>Figure (II.1): colonne d'air animée d'une vitesse <math>v</math>.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure (II.2) :schéma de principe de la théorie de Betz.....</i>	<i>23</i>
<i>Figure II.3) : Vitesse de vent (<math>v</math>) et vitesse tangentielle de l'aubage (<math>\Omega t R_t</math>).....</i>	<i>24</i>
<i>Figure (II.4): Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine <math>\lambda</math> .....</i>	<i>25</i>
<i>Figure (II.5): puissance utile en fonction de la vitesse du vent.....</i>	<i>25</i>
<i>Figure (II.6) : Schéma bloc du modèle des pales.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure (II.7): Turbine connecté au modèle de multiplicateur de vitesse et au modèle de l'arbre.....</i>	<i>28</i>
<i>Figure II.8) : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure (II.9) : Schéma bloc de la simulation de la turbine éolienne.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure (II.10) : schéma de la MSAP dans le repère (<math>a, b, c</math>).....</i>	<i>30</i>
<i>Figure (II.11) : Schéma de la MSAP dans le repère (<math>d q</math>).....</i>	<i>32</i>
<i>Figure (II.12): Tensions statoriques.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure (II.13) : Composantes <math>V_d</math> et <math>V_q</math>.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure (II.14) : vitesse de rotation et couple moteur.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure (II.15) : Tensuins de phase <math>V_a, V_b, V_c</math>.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure (II.16) : Courants de phase <math>I_a, I_b, I_c</math>.....</i>	<i>38</i>

<i>Figure (II.17) : Courant direct <math>I_d</math></i> .....	38
<i>Figure(II.18) : Représentation triphasé à diodes à doubles alternance</i> .....	39
<i>Figure (II.19) : Schéma de principe du redresseur MLI</i> .....	40
<i>Figure II.20) : Structure de redresseur triphasé</i> .....	40
<i>Figure (II.21) : Schéma synoptique d'un MLI</i> .....	41
<i>Figure (II.22) : Schéma d'un onduleur de tension triphasé</i> .....	41
<i>Figure (II.23) : Système global</i> .....	44
<i>Figure (II.24) : Schéma de découplage</i> .....	44
<i>Figure (II.25): Schéma bloc du correcteur</i> .....	45
<i>Figure (II.26): bouclr de régulation du courant <math>I_d</math></i> .....	46
<i>Figure (II.27): Boucle de régulation du courant <math>I_d</math></i> .....	46
<i>Figure (II.28) : Régulation de tension <math>V_{dc}</math></i> .....	46
<i>Figure (II.29) : Schéma électrique du bus continu</i> .....	47
<i>Figure (II.30): Schéma bloc de commande du processus d'injection</i> .....	50
<i>Figure (II.31) : Schéma électrique du filtre</i> .....	50
<i>Figure (II.32) : Schéma global de la commande de l'aérogénérateur à bus du GSAP</i> .....	51
<i>Figure (III.1) : Profil du vent</i> .....	55
<i>Figure (III.2) : Coefficient de puissance en fonction du ratio de la vitesse</i> .....	56
<i>Figure (III.3) : Puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation</i> .....	57
<i>Figure (III.4) : Puissance en fonction de la vitesse mécanique</i> .....	57
<i>Figure (III.5): Couple aérodynamique</i> .....	58
<i>Figure (III.6) : Puissance aérodynamique</i> .....	59
<i>Figure (III.7) : Coefficient de puissance</i> .....	59
<i>Figure (III.8) : Vitesse spécifique</i> .....	60
<i>Figure (III.9) : Vitesse de rotation mécanique et vitesse de référence</i> .....	60
<i>Figure (III.10) : Profil de vent</i> .....	61
<i>Figure (III.11) : Coefficient de puissance à sa valeur maximale</i> .....	62
<i>Figure (III.12) : Vitesse de rotation et vitesse de rotation optimale</i> .....	62
<i>Figure (III.13) : Vitesse spécifique et vitesse spécifique optimale</i> .....	63
<i>Figure (III.14) : Tensions statoriques <math>V_{abc}</math></i> .....	63
<i>Figure (III.15) : Courants statoriques <math>I_{abc}</math></i> .....	64
<i>Figure (III.16) : Tension redressé</i> .....	64
<i>Figure (III.17) : Tension filtré</i> .....	65
<i>Figure (III.18) : Tensions ondulées</i> .....	65

<i>Figure (III.19) : Tensions statoriques <math>V_{abc}</math></i> .....	66
<i>Figure (III.20) : Courants statoriques <math>I_{abc}</math></i> .....	66
<i>Figure (III.21) : Courant direct et sa référence</i> .....	67
<i>Figure (III.22) : Courant quadratique et sa référence</i> .....	67
<i>Figure (III.23) : Tension du bus continu</i> .....	68
<i>Figure (III.24) : Tensions de réseau et courants injecté au réseau</i> .....	68

# Sommaire

Introduction générale : .....	1
Chapitre I.....	
<b>THEORIE GENERALE SUR LES AEROGENERATEURS .....</b>	<b>4</b>
<b>I.1 INTRODUCTION :.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2 ENERGIE EOLIENNE :.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.1 Fonctionnement d'une éolienne .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.2 Composants d'un aérogénérateur .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne : .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.1. Avantages : .....</b>	<b>6</b>
<b>I.3.2 Inconvénients : .....</b>	<b>7</b>
<b>I.4 TYPES DES AEROGENERATEURS.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.1 Aérogénérateur à axe vertical : .....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.1.1 Aérogénérateur vertical de type Darrieus .....</b>	<b>8</b>
<b>I.4.1.2 Aérogénérateur verticale de type Savonius : .....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.1.3 Cyclo turbines : .....</b>	<b>10</b>
<b>I.5 AEROGENERATEUR A AXE HORIZONTAL : .....</b>	<b>11</b>
<b>I.6 CLASSIFICATION DES AEROGENERATEURS SELON LA VITESSE : .....</b>	<b>11</b>
<b>I.6.1 Aérogénérateur à vitesse fixe : .....</b>	<b>11</b>
<b>I.6.1.1 Avantages.....</b>	<b>12</b>
<b>I.6.1.2 Inconvénients.....</b>	<b>12</b>
<b>I.6.2 Aérogénérateur à vitesse variable : .....</b>	<b>12</b>
<b>I.6.2.1 Avantages.....</b>	<b>13</b>
<b>I.6.2.2 Inconvénients .....</b>	<b>13</b>
<b>I.7 PRINCIPE DU SYSTEME DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE :.....</b>	<b>13</b>
<b>I.8 Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique :.....</b>	<b>14</b>
<b>I.8.1 Système utilisant les générateurs Asynchrones :.....</b>	<b>14</b>
<b>I.8.2 Machine asynchrone à cage : .....</b>	<b>14</b>
<b>I.8.4 Système utilisant les générateurs Synchrone : .....</b>	<b>16</b>
<b>I.8.5 Machine synchrone à rotor bobiné : .....</b>	<b>16</b>
<b>I.8.6 Machine synchrone à aimant permanent : .....</b>	<b>17</b>
<b>I.8.6.1 Avantages de la machine synchrone (MS) à aimant permanent [23] :.....</b>	<b>18</b>
<b>I.9 CONCLUSION :.....</b>	<b>18</b>
Chapitre 02 .....	
Modélisation de la chaine de conversion éolienne .....	21

<b>II.1 Introduction :</b> .....	<b>21</b>
<b>II.2 Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne :</b> .....	<b>21</b>
<b>II.2.1 Modélisation de la partie mécanique :</b> .....	<b>21</b>
<b>II.2.2 Loi de Betz :</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2.3 La vitesse spécifique (Tip-Speed-Ratio) :</b> .....	<b>24</b>
<b>II.2.4 Le coefficient Cp :</b> .....	<b>24</b>
<b>II.2.5 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes :</b> .....	<b>24</b>
<b>II.3 Régulation mécanique de la puissance aérodynamique :</b> .....	<b>25</b>
<b>II.3.2 Technique de régulation pour les éoliennes :</b> .....	<b>26</b>
<b>II.4 Modèle du profil de vent :</b> .....	<b>26</b>
<b>II.5 Modèle de la turbine :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.6 Modèle des pales :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.7 Modèle de multiplicateur de vitesse :</b> .....	<b>27</b>
<b>II.8 Les stratégies de commande de la turbine :</b> .....	<b>28</b>
<b>II.9 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent :</b> .....	<b>30</b>
<b>II.9.1 Hypothèses simplificatrices :</b> .....	<b>30</b>
<b>II.9.2 Mise en équations électriques et magnétiques dans repère (a b c) :</b> .....	<b>30</b>
<b>II.9.3 Mise en équations électriques et magnétiques dans le repère de Park :</b> .....	<b>32</b>
<b>II.10 modélisation à vide de la GSAP :</b> .....	<b>35</b>
<b>II.10.1 résultats de simulation :</b> .....	<b>35</b>
<b>II.11 modélisation de la GSAP en charge :</b> .....	<b>37</b>
<b>II.11.1 Résultats de simulation :</b> .....	<b>37</b>
<b>II.12 Modélisation d'interface d'électronique de puissance :</b> .....	<b>39</b>
<b>II.12.1 Redresseur triphasé à diode doubles alternance:</b> .....	<b>39</b>
<b>II.12.2 redresseur MLI :</b> .....	<b>40</b>
<b>II.12.3 La commande MLI :</b> .....	<b>41</b>
<b>II.12.5 Modèle de l'onduleur de tension :</b> .....	<b>41</b>
<b>II.13 La commande vectorielle :</b> .....	<b>42</b>
<b>II.13.1 Principe de la commande vectorielle :</b> .....	<b>42</b>
<b>II.13.2 La commande vectorielle de la GSAP :</b> .....	<b>43</b>
<b>II.13.4 découplage :</b> .....	<b>44</b>
<b>II.13.5 Synthèse des Contrôleurs PI du convertisseur de puissance :</b> .....	<b>45</b>
<b>II.13.5.1 Régulateur de courant :</b> .....	<b>45</b>
<b>II.13.5.2 Régulation de tension <math>V_{dc}</math> :</b> .....	<b>46</b>
<b>II.14 Modélisation de la liaison au réseau</b> .....	<b>47</b>
<b>II.14.1 Modélisation et régulation du bus continu :</b> .....	<b>47</b>
<b>II.14.2 Injection de la puissance au réseau :</b> .....	<b>48</b>

II.14.3 Modélisation du filtre :.....	50
II.14.3.1 Modélisation du filtre dans le repère naturel : .....	50
II.14.3.2 Modélisation du filtre dans le repère de Park : .....	51
II.15 Conclusion :.....	52
Chapitre3 :.....	
Simulation et résultats.....	55
III.1 Introduction : .....	55
III.2 Profil du vent : .....	55
III.3. Caractéristique de la turbine éolienne :.....	55
III.4. Maximisation de puissance de la turbine avec asservissement de vitesse : .....	58
III.4.1. Résultats de simulations :.....	58
III.5. Simulation de la chaine globale : .....	61
III.5.1.Simulation de la chaine globale sans commande vectorielle :.....	61
III.5.2. Simulation de la chaine globale avec commande vectorielle : .....	66
III.6. Conclusion : .....	69
Conclusion générale .....	70

# **Introduction générale**

## **Introduction générale :**

Actuellement le monde commence à prendre conscience des risques menaçant la planète et du changement climatique comme conséquence de la consommation croissante des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon,...) [1].

Par ailleurs, la demande mondiale en énergie électrique ne cesse pas de croître. Ce qui a contraint certains pays développés à combler leur déficit énergétique par l'utilisation des centrales nucléaires [2]. Ces centrales sont moins attractives pour le futur à cause des dégâts qu'elles peuvent engendrer. Ceci a amené les décideurs politiques des principaux pays industrialisés et des pays émergents à favoriser la mise en place de nouveaux moyens ou bien de nouvelles énergies de production d'énergie plus propres et respectueuses à l'environnement. La solution s'avérait donc dans l'utilisation des énergies renouvelables tel que : le solaire, l'éolien, la biomasse, la géothermie, la marémotrice [1]....

L'énergie éolienne est l'une de ces énergies renouvelables les plus sollicitées pour la production de l'énergie électrique, aussi bien pour des sites isolés ou bien des sites connectés au réseau. L'utilisation des éoliennes a connu un développement rapide. Elles font partie des techniques les plus prometteuses en termes d'écologie et de compétitivité, en contribuant à la réduction de la demande de plus en plus galopante de l'électricité [2].

Dans notre pays, l'énergie éolienne accuse un retard considérable par rapport aux autres pays. Les études qui se font dans ce domaine sont minimales. Ce travail est une contribution à l'étude des systèmes de commande d'une éolienne connectée au réseau électrique. Pour ce faire, notre choix est porté sur une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents.

Ce choix est fait car la machine synchrone à aimants permanents a des caractéristiques et/ou offrent des performances intéressantes et une meilleure contrôlabilité. En effet, le développement actuel dans le domaine des matériaux magnétiques permet une meilleure utilisation de la GSAP à moindre coût pour la construction de grandes et puissantes éoliennes autrement dit les éoliennes de l'avenir.

Le mémoire est structuré comme suit :

Le premier chapitre est une description générale du principe de conversion de l'énergie éolienne, des différents types d'éoliennes et de génératrices, ainsi que les éléments principaux dans la chaîne de conversion électromécanique de la machine synchrone à aimants permanents.

Le deuxième chapitre porte sur la modélisation des différents composants de la chaîne de conversion éolienne.

Le troisième chapitre concerne la modélisation et la commande de la chaîne de conversion éolienne connectée au réseau électrique. Une illustration des différents constituants de système de conversion d'énergie et les techniques de commande utilisées, est présentée, ainsi que les résultats obtenus de la simulation.

Enfin une conclusion générale est présentée à la fin de cette étude.

**Références :**

[1] : N.Khezami, «Commande multi-modèle optimale des éoliennes : application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence», thèse de doctorat, Ecole centrale de Lille et Ecole supérieure des sciences et technique de Tunis, 2011.

[2] : F.Louar, «Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents», thèse de doctorat, université BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016.

**Chapitre I**  
**THEORIE GENERALE**  
**SUR LES AEROGENERATEURS**

## **I.1 INTRODUCTION :**

L'énergie renouvelable est une source d'énergie considérée comme source inépuisable à l'échelle de temps. On peut dire qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future.

Ces dernières années, l'intérêt d'utiliser ces énergies augmentent de plus en plus à cause de la pénurie des énergies non renouvelables et la forte pollution environnementale engendrée par la combustion des matières fossiles.

Parmi ces énergies l'énergie éolienne qui représente une solution pour ce problème mondiale puisque elle est renouvelable et non polluante.

Ce premier chapitre, consiste à faire une description de l'énergie éolienne et les composants d'une éolienne ainsi que les types de cette dernière. Ainsi qu'une description générale du système de conversion de l'énergie éolienne.

## **I.2 ENERGIE EOLIENNE :**

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, pour moulin des grains ou pomper de l'eau, ce type d'énergie a été exploité sur terre durant au moins les 3000 dernières années [27]. Son nom vient du grec Eole 'Dieu du vent'.

Cette énergie vient du soleil, le soleil chauffe la terre causant ainsi des variations de la densité et de la pression d'air, ces variations génèrent le vent.

Le terme aérogénérateur couramment nommé éolienne désigne une machine capable de capter l'énergie cinétique du vent et la transformé en énergie mécanique qui est transformé en énergie électrique.

### **I.2.1 Fonctionnement d'une éolienne**

L'éolienne ou bien l'aérogénérateur est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cela est fait par l'hélice qui entre en rotation par la force du vent et permet ainsi la production d'énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission (cet arbre est couplé à un système d'engrenage qui joue le rôle d'une boîte de vitesse) [1]. L'énergie mécanique est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique [2].

Pour des vents faible, le système d'engrenage multiple la vitesse de rotation de la turbine et pour un vent fort il freine la rotation pour garder une vitesse constante et éviter la destruction de l'éolienne [3].

### I.2.2 Composants d'un aérogénérateur

L'aérogénérateur est composé de plusieurs composants selon la figure (I.1) : [4]

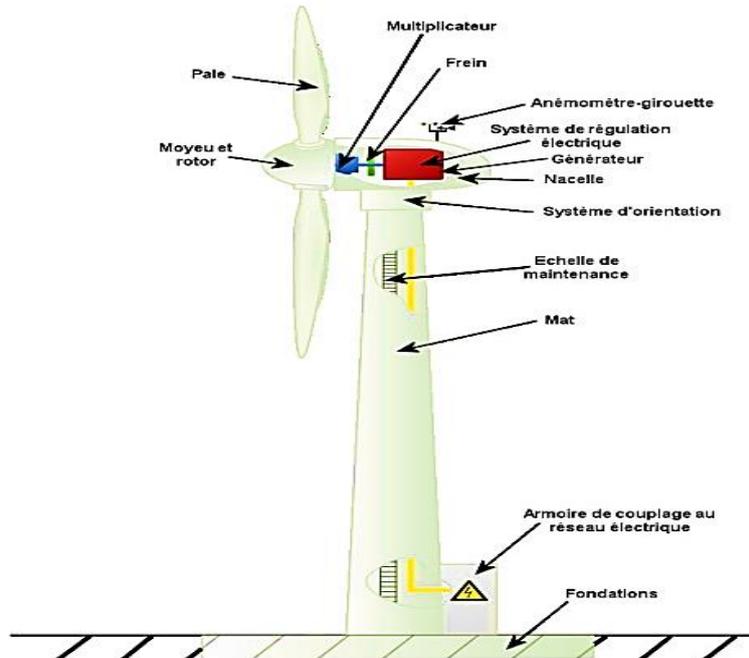


Figure (I.1) : Composants d'un aérogénérateur [25].

- **Moyeu et rotor** : C'est un système de régulation du pas des pales qui permet de modifier l'orientation des pales ainsi que l'énergie récupérer par l'éolienne.
- **Pales** : Les pales sont réalisées dans un mélange de fibres de verre et de matériaux composites. Elles ont le rôle d'un capteur d'énergie cinétique du vent pour la transmettre au rotor.
- **Multiplicateur** : Il permet de transformer la vitesse lente en une vitesse rapide. En effet, la rotation des pales, qui est trop lente, ne peut être utilisée par la génératrice.
- **Frein** : Le frein est utilisé pour arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer des réparations.
- **Anémomètre-girouettes** : La girouette est utilisée pour connaître la direction du vent et l'anémomètre pour mesurer la vitesse du vent.
- **Générateur** : C'est un dispositif qui permet de transformer l'énergie mécanique transmise par le rotor en une énergie électrique.
- **Nacelle** : Elle sert principalement à abriter les éléments qui produisent l'électricité, c'est le coffret qui se trouve en haut de la tour. Le transport de l'électricité produit

dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électrique descendant à l'intérieur au mat.

- **Système d'orientation :** Il est équipé d'un moteur et permet d'orienter l'éolienne dans l'axe du vent grâce à un frein.
- **Mat :** Le mat est un tube fabriqué en acier et qui supporte la nacelle et le rotor c'est-à-dire l'ensemble des éléments capable de fournir l'électricité. Un escalier à l'intérieur doit permettre d'y accéder pour les opérations d'entretien. Le mat mesure maximum 98 mètres de haut pour 7 mètres de diamètres à la base et 3 mètres en haut environ. Il doit être suffisamment robuste pour résister à des vents violents et froids par exemple. La partie inferieur contient l'ordinateur qui commande l'éolienne.
- **Fondation :** Les fondations d'une éolienne sont en béton armé. Elles pèsent de 100 tonnes pour ancrer solidement l'éolienne dans le sol.

### **I.3 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :**

#### **I.3.1. Avantages :**

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels [5].
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols [6].
- Lorsque de grands parcs d'éolienne sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations [6].
- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte [5].
- L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre cout à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie [5].
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole [7].

- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant [8].
- Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien [9].
- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site originale [10].
- C'est une énergie propre et indéfiniment durable et propre pendant son fonctionnement.
- Une éolienne est en grande partie recyclable (acier, béton). Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans), elle est entièrement et rapidement démontable [11].

### **I.3.2 Inconvénients : [5]**

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- Lorsque les éoliennes sont placées à des distances trop faibles, elles peuvent affecter des riverains, notamment par leurs nuisances sonores.

## **I.4 TYPES DES AEROGENERATEURS**

L'aérogénérateur est un dispositif utilisé pour le transfert de l'énergie cinétique du vent vers l'arbre de transmission en mouvement rotatif. Plusieurs types existent, ils se caractérisent par la position de leur axe de rotation et des performances qui leurs sont propres [12].

### **I.4.1 Aérogénérateur à axe vertical :**

L'éolienne à axe verticale est pourvue d'un rotor dont l'axe de rotation est globalement perpendiculaire au flux du fluide, et donc bien souvent verticale. La technologie existe depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle et regroupe différentes technologies : Darrieus, Savonius, Cyclo turbine. [13]

Elles sont moins sensibles aux vents forts, démarrent avec un vent plus faible et n'ont pas besoin d'être orientées.

Les propriétés de ces éoliennes (silence, simplicité d'entretien, tolérance aux vents variables) les rendements particulièrement adaptées pour les éoliennes domestiques ou les éoliennes pour l'autoconsommation.

Le principe essentiel de ces systèmes dits « à axes vertical » est de convertir la puissance mécanique du flux par un mouvement d'un solide, le rotor, qui tourne sur un axe globalement orthogonal à la vectrice vitesse du flux d'air. Cette particularité rend le système isotrope quel que soit la direction du flux du fluide dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation. L'intérêt évident en éolien est de placer l'axe de rotation verticalement, afin de capter l'énergie du vent quel que soit sa direction dans le plan horizontal, sans besoin d'orienter une nacelle, sans empennage. La mécanique s'en trouve simplifiée notamment car la génératrice est fixe par rapport au sol [13].

#### **I.4.1.1 Aérogénérateur vertical de type Darrieus**

Ce type d'éolienne est fabriqué par l'ingénieur français Georges Darrieus (1888-1979). Ces éoliennes sont équipées de pales profilées comme des ailes d'avion (NACA). Les pales, en traversant le flux d'air, permettent de convertir la portance qu'elles génèrent en couple animant le rotor.

Cette éolienne est de type rapide, ce qui permet d'atteindre des nombre de Reynolds suffisamment élevés pour obtenir une portance correcte des pales. La portance est la force perpendiculaire à la vectrice vitesse du vent relatif. Lorsque la vitesse de vent relatif devient élevé, la portance devient largement dominante sur la traînée, le rapport des 2, appelé finesse. Ainsi, par la vitesse, ces éoliennes profitent des finesses élevées, tout comme le vol des avions modernes ou les pales des éoliennes à axe horizontal. Les forces de portance deviennent majoritaires lorsque les pales traversent le flux d'air, et captent ainsi la puissance du flux. Lorsque les pales remontent ou redescendent parallèlement au vent, les forces de traînée sont faibles et ne pénalisent pas le fonctionnement de l'éolienne [13].

L'avantage essentiel de ces éoliennes est leur rendement, pouvant théoriquement atteindre 59%, la vitesse de rotation, permettant d'atteindre des vitesses de génératrice optimum pour la production électrique, et l'architecture, extrêmement simple en cout et en maintenance car le rotor est lié à la structure par un pivot unique. La génératrice est fixée au bâti, et non pas en haut d'une nacelle qui pivote [13].

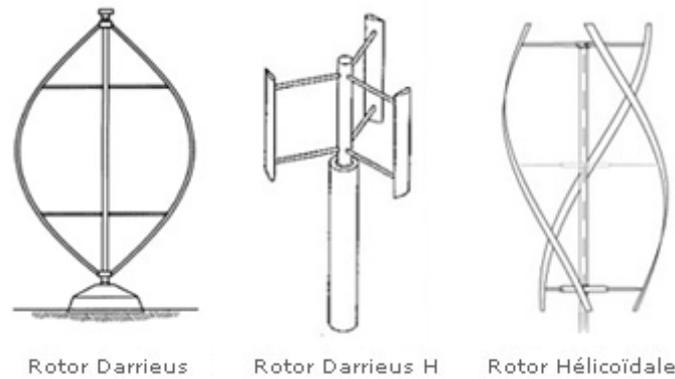


Figure (I.2) : Différents types d'éolienne verticale de types Darrieus. [28]

#### I.4.1.2 Aérogénérateur verticale de type Savonius :

Du nom de leur inventeur Sigurd Savonius (1884-1931) (Voir figure I.3) qui est un architecte finlandais qui a mené des travaux complets et précis sur les éoliennes conçues de façon extrêmement simple : 2 demi-tuyaux emboîtés et maintenus par des plaques.

L'aérodynamique de son architecture est plus complexe qu'il n'y paraît : le tuyau qui descend le vent présente une forme concave dont la trainée est plus élevée que le tuyau offrant sa partie convexe et remontent le vent. L'écart de trainée génère le couple et donc la conversion d'énergie. Mais lorsque les deux tuyaux se chevauchent, une partie du fluide passe d'une zone concave à l'autre, générant une poussée dans le tuyau qui remonte le vent. Ainsi, la trainée du tuyau remontant le vent est abaissée et le rendement optimisé.

Les éoliennes de Savonius ont une vitesse caractéristique de 1. Cette valeur adimensionnée, caractéristique de toutes les éoliennes, permet de déterminer s'il s'agit d'une éolienne plus ou moins rapide.

L'inconvénient des éoliennes de Savonius est leur opacité au vent. Si une éolienne est dimensionnée pour optimiser la conversion d'énergie, elle doit aussi être dimensionnée pour le cas de tempête. Sa structure devra supporter les efforts considérables dus à la trainée globale, et un frein devra être dimensionné pour résister au couple de l'hélice en cas de tempête [13].

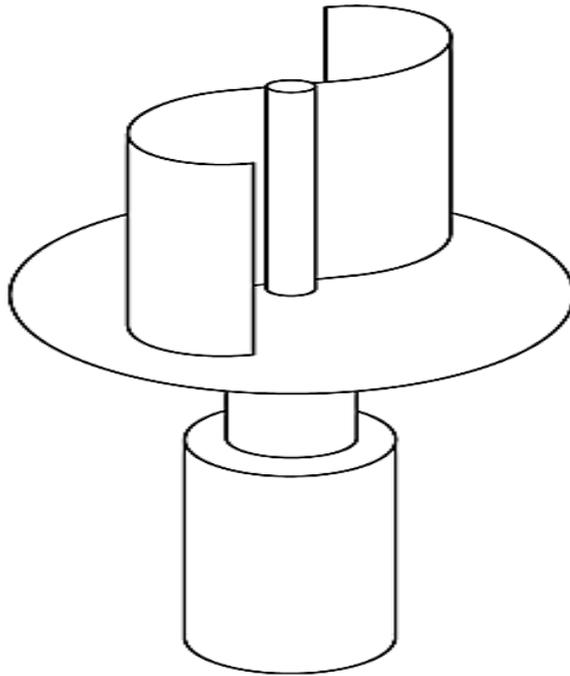


Figure (I.3) : *Eolienne verticale de type Savonius* [4].

#### **I.4.1.3 Cyclo turbines :**

Ces machines sont intéressantes d'un point de vue technique, car elles impliquent une cinématique complexe d'orientation des pales. De nombreux inventeurs ont tenté de développer des machines de ce type avec plus ou moins de succès. A la différence des éoliennes à axe horizontal qui modifient le calage des pales lorsque la puissance du vent change, c'est-à-dire quelques ajustements par heure, les cyclo turbines modifient le calage des pales à chaque tour. Leur mécanique s'approche de la mécanique des rotors d'hélicoptères.

L'avantage de ces éoliennes est d'ajuster l'orientation des pales en permanence, tout au long du cycle de rotation. Ainsi, lorsque les pales avancent perpendiculairement au vent, ou qu'elles descendent le vent, leur orientation est optimisée pour augmenter l'effet de portance ou de trainée, et lorsque ces mêmes pales avancent contre le vent, la cinématique essaie de les rendre les moins résistantes à l'avancement, en réduisant leur trainée [13].

Ces machines travaillent à des nombres de Reynolds bas, tout comme les éoliennes de Savonius, mais recherchent à optimiser la portance des pales. Pour obtenir une portance élevée, ces machines requièrent malgré tout d'avoir un déplacement rapide des pales, mais la mécanique agissant sur les pales ne peut pas actionner trop vite celles-ci. Les cyclo turbines sont un compromis de vitesse et de mécanique, conduisant à des parties tournantes assez lourdes en comparaison aux autres technologies [13].

## **I.5 AEROGENERATEUR A AXE HORIZONTAL :**

Les aérogénérateurs à axe horizontal (Voir figure I.4) sont de loin les plus utilisées. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent des voilures à deux, trois ou plusieurs pales.

Toutefois, les structures les plus courantes sont à trois pales. Un aérogénérateur à axe horizontal est constitué d'une hélice perpendiculaire au vent montée sur un mat dont les pales sont profilées aérodynamique à la manière d'une aile d'avion.

Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent. Par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les aérogénérateurs à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont un cout moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [14].



Figure (I.4) : *Aérogénérateur à axe horizontal [17].*

## **I.6 CLASSIFICATION DES AEROGENERATEURS SELON LA VITESSE :**

### **I.6.1 Aérogénérateur à vitesse fixe :**

Les aérogénérateurs à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice montré dans la figure (I.5) [16].

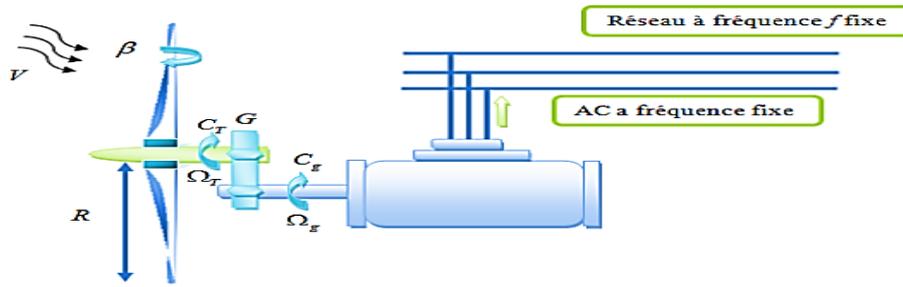


Figure (I.5) : éolienne à vitesse fixe directement connecté au réseau.

Le couple mécanique produit par la génératrice accélère la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme, ce qui nécessite l'adjonction d'un multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne.

#### I.6.1.1 Avantages [25]

- Système électrique plus simple.
- Moins cher.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Plus faible.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne

#### I.6.1.2 Inconvénients [25]

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau.
- Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

#### I.6.2 Aérogénérateur à vitesse variable :

L'éolienne à vitesse variable connecté au réseau est composée d'une turbine, un multiplicateur, un générateur, un convertisseur de puissance.

La partie électrique de l'éolienne consiste en générale d'un générateur électrique synchrone ou asynchrone.

Le fonctionnement à vitesse variable est autorisé dans une large plage de variation par une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau comme le montre la figure (I.6).

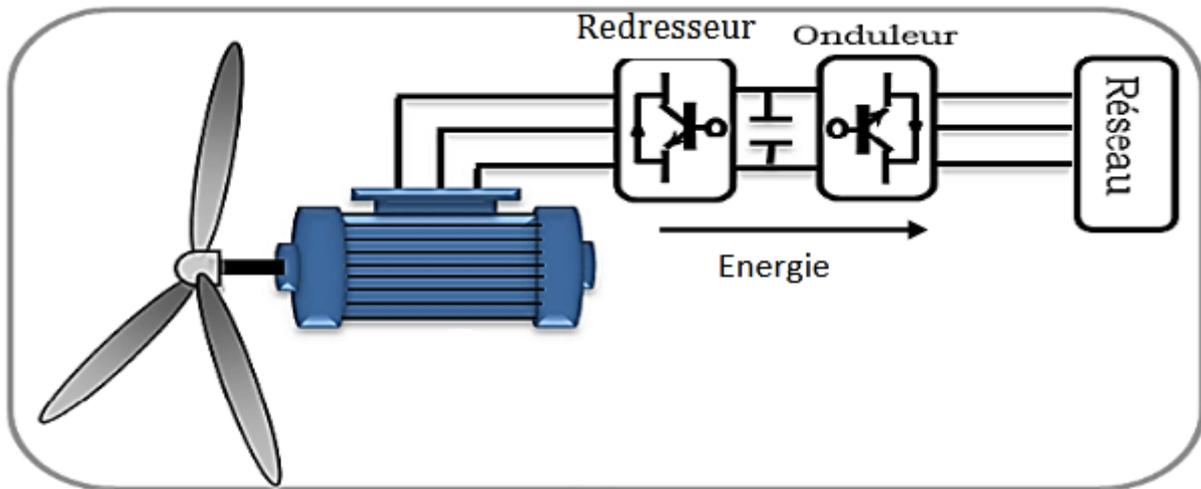


Figure (I.6) : Aérogénérateur à vitesse variable [17]

### I.6.2.1 Avantages [25]

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance, les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple.
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Réduction des bruits acoustiques.
- Augmentation du rendement énergétique.

### 1.6.2.2 Inconvénients [25]

- Utilisation des machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.

## I.7 PRINCIPE DU SYSTEME DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE :

Les aérogénérateurs permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique.

Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la figure (I.7). L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique [19].

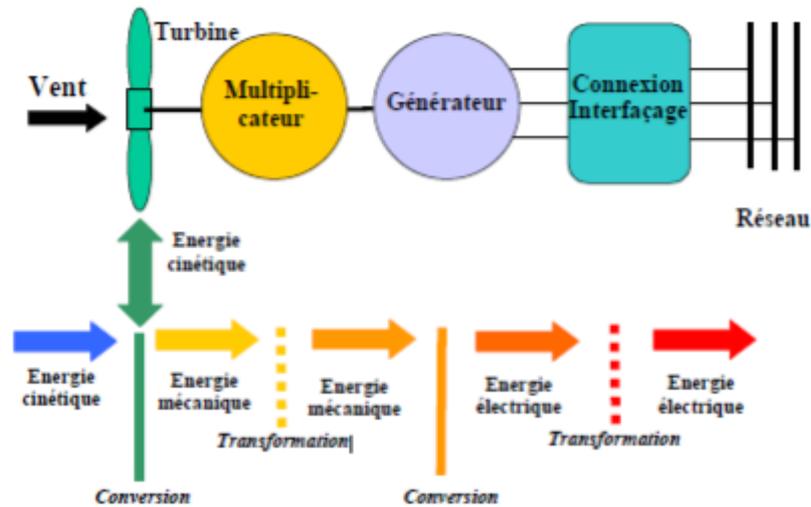


Figure (I.7) : Conversion d'énergie dans un aérogénérateur [27].

## I.8 Aperçu sur les systèmes de conversion électromécanique :

### I.8.1 Système utilisant les générateurs Asynchrones :

Le terme de Machine Asynchrone « **MAS** » regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est différente de la vitesse de rotation du champ tournant. En fait, le fonctionnement moteur de cette machine correspond au cas où elle transformerait l'énergie électrique qu'elle absorbe en énergie mécanique rotationnelle. L'opération inverse correspond au fonctionnement générateur. Entre autres, on peut distinguer deux principaux types de machine asynchrone : machines asynchrones à cage, machines asynchrones à double alimentation [16].

### I.8.2 Machine asynchrone à cage :

La machine asynchrone à cage d'écureuil équipe actuellement la majorité des éoliennes dans le monde. Cette machine est d'habitude utilisée comme moteur mais elle est toute à fait réversible et peut répondre aux exigences extrêmes que présente l'énergie éolienne à cause de sa robustesse, son faible coût ainsi que l'absence du système balais collecteur ou les systèmes de contact glissant [20].

Pour s'assurer que la génératrice à cage d'écureuil est dans la zone stable de fonctionnement, il faut travailler aux faibles glissements (autour de synchronisme  $g=0$ ). Cette machine a un nombre de pôles fixes, donc le fonctionnement doit être sur une plage très serrée (glissement inférieur à 2%) [24].

Si le glissement devient important, les courants statoriques augmentent en présentant des pics qui peuvent être destructifs car le stator de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil est connecté directement au réseau figuré dans la figure (I.8) [24].

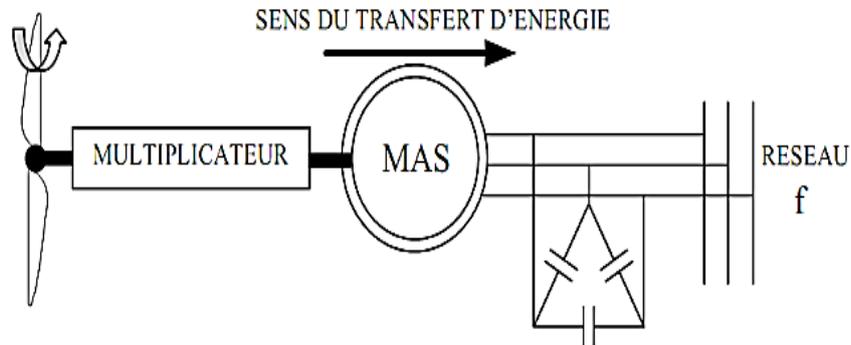


Figure (I.8) : Machine asynchrone dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne [18].

### I.8.3 Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) :

La MADA est émergé en puissance dans le domaine de production de l'énergie éolienne. Cette machine possède la caractéristique primordiale pour un bon fonctionnement d'un système éolien : travailler sur une grande plage de variation de vitesse, en s'appuyant sur sa structure en double alimentation. La configuration la plus simple est de connecter le stator de la MADA directement au réseau en utilisant un système de protection et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique [17].

Dans cette configuration, le convertisseur statique est dimensionné (à une fraction de la puissance nominale de l'éolienne) uniquement pour faire transiter la puissance destinée à la magnétisation de la machine et il est donc moins coûteux figure (I.9).

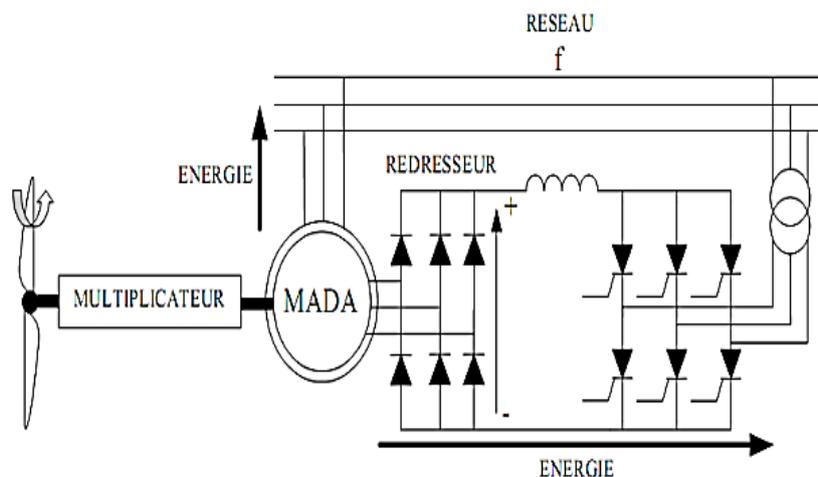


Figure (I.9) : MADA dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne [19].

#### I.8.4 Système utilisant les générateurs Synchrones :

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre mécanique est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique inducteur est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique d'induit est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre les deux parties (l'inducteur et l'induit) [21].

Cette famille de machine regroupe en fait 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 et à réluctance variable [21].

Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche.

Il existe deux manières de construire une machine synchrone, soit l'inducteur est tournant soit l'inducteur est fixe. Mais la plupart des machines synchrone sont à induit fixe et inducteur tournant comme le montre la figure (I.10).

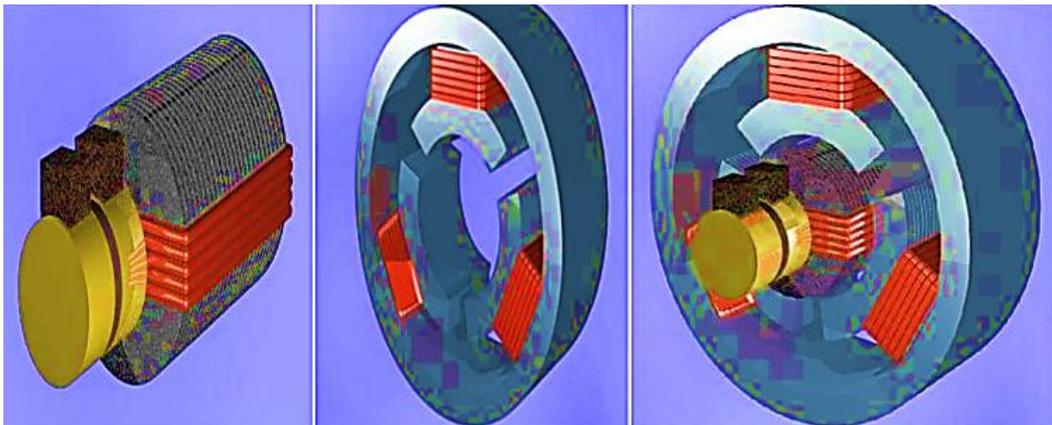


Figure (I.10) : Structure des machines à induit fixe et inducteur tournant [16].

#### I.8.5 Machine synchrone à rotor bobiné :

Ce genre de machine est constitué d'un rotor qui comporte des bobines. Ces bobines sont alimentées par des courants continus par l'intermédiaire de contacts glissant balais-bagues pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. Il y a deux types de machines synchrones à rotor bobiné : les machines à pôles lisses et les machines à pôles saillants [18].

La machine à pôles lisses à une inductance constante quelle que soit la position du rotor. Par contre, la machine à pôles saillants à un entrefer magnétique variable suivant la position des pôles, ce qui entraîne une variation d'inductance. L'alternateur d'automobile à griffes est considéré comme une machine à pole saillant [18].

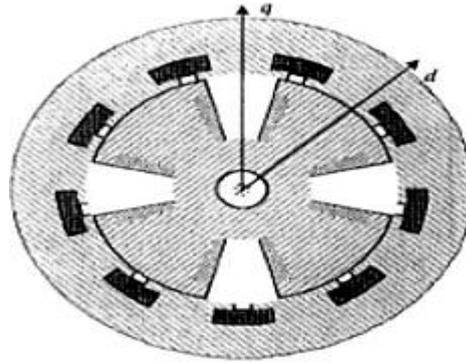


Figure (I.11) : *Machine synchrone à rotor bobiné à pôles saillants [18]*

### I.8.6 Machine synchrone à aimant permanent :

La machine synchrone à aimant permanent est devenue compétitive par rapport à la machine asynchrone, même dans le domaine de la moyenne puissance. Le stator de la machine synchrone à aimant permanent est identique à celui d'une machine asynchrone, il est constitué d'un empilage de tôle magnétique qui contient des encoches dans les quelles sont logés trois enroulements identiques décalés entre eux de  $120^\circ$  [22]. Le rotor de la machine synchrone à aimant permanent est généralement de deux types :

- Rotor possédant des pièces polaires, servant à la concentration du flux d'induction dans lequel les aimants sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à l'entrefer, soit de manière plus complexe.
- Rotor sans pièces polaires, donc à entrefer constante, dans lequel l'aimantation des aimants est généralement perpendiculaire à l'entrefer [22].

Les systèmes de conversion basée sur les machines synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse. La machine synchrone à aimant permanent est la plus performante de toutes les machines existantes [26].

De par son aimantation permanente à plusieurs pôles lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruit. Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible.

Cette machine est utilisée dans les systèmes éoliens pour la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique mais cela est fait en rendant le fonctionnement de la machine en fonctionnement génératrice.

La caractéristique d'auto excitation de la génératrice synchrone à aimant permanent lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevée et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génératrice éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, sont cout réduit et simplicité en font le générateur le plus employé.

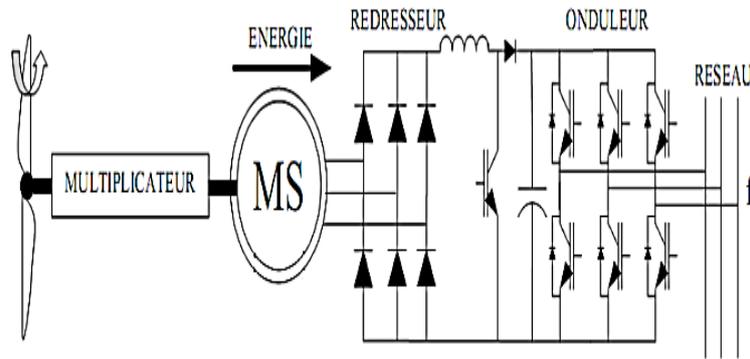


Figure (I.12) : Machine synchrone dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne [17].

### I.8.6.1 Avantages de la machine synchrone (MS) à aimant permanent [23] :

Comparé aux autres machines la machine synchrone (MS) à aimants permanents présente ces avantages :

- Robustesse incontestée par rapport à la machine à courant continu.
- Augmentation de la constante de temps thermique et de la fiabilité grâce à l'élimination des bagues et des balais.
- Facteur de puissance et rendement plus élevés par rapport à la machine asynchrone.
- Cette structure donne à la machine l'avantage de réduire les dimensions et par conséquent un moindre moment d'inertie, ce qui augmente sa fiabilité et sa densité de puissance par unité de volume.
- L'utilisation d'aimants permanents au rotor permet d'éliminer les pertes électriques dans le circuit rotorique.
- Elle possède un couple moteur élevé au démarrage ce qui permet d'éliminer le multiplicateur de vitesse pour les systèmes éoliens.
- Fonctionnement à très grande vitesse.

## I.9 CONCLUSION :

Ce chapitre, représente une brève description sur les systèmes de conversion éolienne qu'on a essayé de les présenter d'une façon générale, un aperçu succinct des deux grandes familles d'éoliennes, avec leurs avantages et inconvénients.

Une description sur les différents constituants d'une éolienne. Ainsi que les systèmes de conversion électromécanique et les différentes machines utilisées dans les éoliennes et surtout la machine synchrone à aimant permanent.

**Références :**

- [1] : J.D.DELORD, E.ROGER, « étude d'un aérogénérateur» Lycée Maximilien Perret, Alfortville Académie de Creteil, 2009.
- [2] : M.T. LATRECHE « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien » mémoire de magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Setif, (24 /06 /2012).
- [3] : H. Abderrezek et K. Gasmi « Les énergies renouvelables, un pilier de développement de l'agriculture algérienne - Cas de l'énergie éolienne » Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°3 (2016) 497 - Université Med Boudiaf, BP 166, 28000 M'Sila, (26 Septembre 2016)
- [4] : A.BELAMRI « Simulation d'une turbine éolienne à axe horizontal » mémoire de master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, (2018).
- [5] : <https://www.les-energies-renouvelables.eu>,(28/02/2020)
- [6] : <https://www.comptoireolien.fr>, (28/02/2020)
- [7] : <http://www.abalone-energie.com> (28/02/2020)
- [8] : <https://www.ecobatenergie.fr/eolien>. , (28/02/2020)
- [9] : <https://ecoliennes.weebly.com>, (28/02/2020)
- [10] : <https://www.boivrelavallee.fr>, (28/02/2020)
- [11] : <https://sites.google.com>, (28/02/2020)
- [12] : <http://electronique1.blogspot.com>, (28/02/2020)
- [13] : <https://site.eolie-energie.fr>, (28/02/2020)
- [14] :N.DJOHRI, H.BORDJIHANE « participation des aérogénérateurs en mode dégradé au réglage de la fréquence d'un réseau électrique », mémoire de maser, université A.MIRA, Béjaia, 2016
- [15] : M. Kherouf et Z. Kherici « Etude et modélisation d'une chaîne de conversion éolienne à base de MADA connectée au réseau » mémoire de master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA,(2017).
- [16] : A.Kerboua, « cour machine électrique à courant continu », cours machine électrique, école supérieur en sciences appliquées-Tlemcen,(2019)
- [17] : A.TELLI « étude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégré au réseau », mémoire de magister, université d'Oran USTO, (2012)

- [18] : L.E.RADAOROZANDRY, « conception et optimisation des machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnétique », université LAVAL QUEBEC, (2007)
- [19] : M.Touati, «Etude d'une génératrice éolienne connectée au réseau électrique», mémoire de Magister, université de Batna, (2015).
- [20] : R.Rouabhi, «Etude et commande d'une machine asynchrone à double alimentation application : énergie éolienne», mémoire de Magister, université Ferhat Abbas Sétif, (2012).
- [21] : A.Derkawi, «Etude, Développement et mise en œuvre de deux observateurs de position pour la commande sans capteurs de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) », Faculté des sciences Semlalia Merrakech – DESA diplôme d'études supérieures spécialisées, (2007).
- [22] : M.Bardadi, «Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel», mémoire de Magister, université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf, Oran, (2015).
- [23] : S.ZIRAOU, «Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau», mémoire Master, université BADJI MOKHTAR ANNABA (2017).
- [24] : B.Houas, A.Khalidi, «Amélioration de la commande par mode glissant d'un générateur Asynchrone A Double Alimentation», master académique, université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, (2019).
- [25] : H.Tebani, Y.Touri, «Commande vectorielle en puissance de la machine asynchrone à double alimentation», master académique, université MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU, (2016).
- [26] : S. Hamecha, « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents», mémoire de Magister, université MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU,(2013).
- [27] : B.Kelkoul, «Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation», mémoire de Magister, université de Tlemcen, 2011.
- [28] : R.GUILLO, « éolienne à axe vertical de type Darrieus », article sur ecosources.info, France, (2014)

# **Chapitre 02**

## **Modélisation de la chaîne de conversion éolienne**

## II.1 Introduction :

Tout système physique peut être considéré comme un ensemble de sous-systèmes. Ainsi, pour simplifier l'étude de l'ensemble, chacune de ses parties est abordée séparément. Puis, une synthèse de toutes ces parties constituant le système global est à déduire. Dans la chaîne de conversion éolienne, la turbine et la génératrice sont des sous système qui assurent le fonctionnement du système éolien, la turbine permet de transformé l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui fait tourner la génératrice et cette dernière assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la turbine éolienne et puis la modélisation de la génératrice synchrone à aimant permanent, redresseur et onduleurs MLI, et se termine avec la commande vectorielle de la GSAP.

## II.2 Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne :

Notre étude se fait un générateur éolien, qui est basé sur une turbine à vitesse variable et une génératrice synchrone à aimants permanents est raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance MLI.

### II.2.1 Modélisation de la partie mécanique :

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique mais ça ne peut pas être réalisé sans passer par l'étape de convertir l'énergie du vent à une énergie mécanique.

Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site. [1]

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur  $dx$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $v$ , figure II.1 est donnée par la relation suivante :

$$dEc = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot dx \cdot v^2 \quad \text{II.1}$$

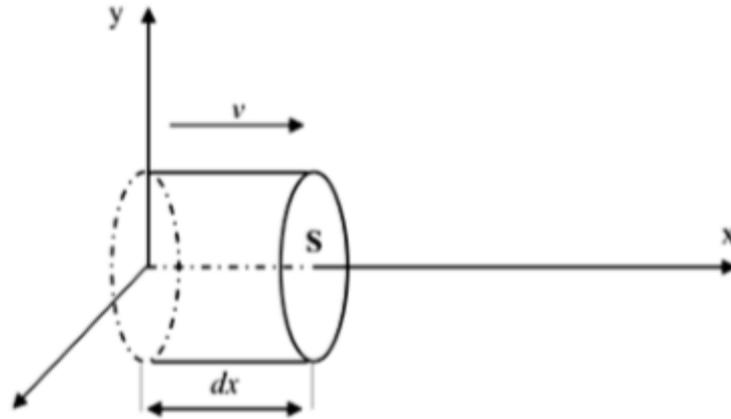


Figure (II.1) : colonne d'air animée d'une vitesse  $v$ . [24]

La puissance  $P_m$  extraite du volume d'air en mouvement représente la dérivée d'énergie cinétique par rapport au temps :

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad \text{II.2}$$

Où :

$\rho$  : masse volumique de l'air (en Kg/m<sup>3</sup>)

$V$  : vitesse instantané du vent (en m/s)

$E_c$  : l'énergie cinétique (en Joules) [1]

### II.2.2 Loi de Betz :

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent. la relation de la puissance de l'éolienne par rapport à la puissance du vent s'écrit par la relation suivante : [2]

$$P_{\text{éolienne}} = C_p \cdot P_{\text{vent}} \quad \text{II.3}$$

Où :

$C_p$  : Coefficient de puissance.

Le système de la figure II.2 représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal où  $V_1$  représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. [1]

Avec :  $V_1 > V > V_2$

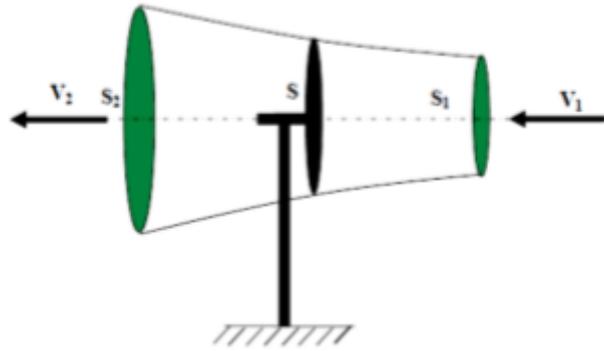


Figure (II.2) : schéma de principe de la théorie de Betz. [24]

$$dEc = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad \text{II.4}$$

La force de l'air F sur l'éolienne est donnée par :

$$F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad \text{II.5}$$

Supposant que Pm : la puissance absorbée par le rotor

$$Pm = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad \text{II.6}$$

Pm = dEc alors :

$$\rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad \text{II.7}$$

Ce qui donne :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad \text{II.8}$$

En remplaçant le résultat de l'équation (II.8) dans l'équation (II.6) On trouve :

$$Pm = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad \text{II.9}$$

La puissance de l'éolienne est maximale lorsque la dérivée  $\frac{Pm}{dV_2}$  est nulle ce qui donne :

$$-3V_2^2 - 2 \cdot V_1 \cdot V_2 + V_1^2 = 0 \quad \text{II.10}$$

On résout cette équation on trouve deux solutions on élimine celle qui est négative, la deuxième solution est :

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \text{ qui donne :}$$

$$Pm_{max} = \frac{16}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot \frac{1}{2} = \frac{16}{27} \cdot P_V \quad \text{II.11}$$

L'équation II.11 représente la formule finale de la loi de Betz.

La loi de Betz signifie que la puissance maximale développée par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne. [1]

### II.2.3 La vitesse spécifique (Tip-Speed-Ratio) :

Appelé aussi la vitesse normalisée  $\lambda$ , elle est définie comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine divisé par la vitesse instantanée de vent  $V$  (voir figure II.3) et donné par la relation suivante : [1]

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad \text{II.12}$$

Où :

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

$R_t$  : Rayon de la surface balayée en m.

$V$  : Vitesse de vent en m/s. [1]

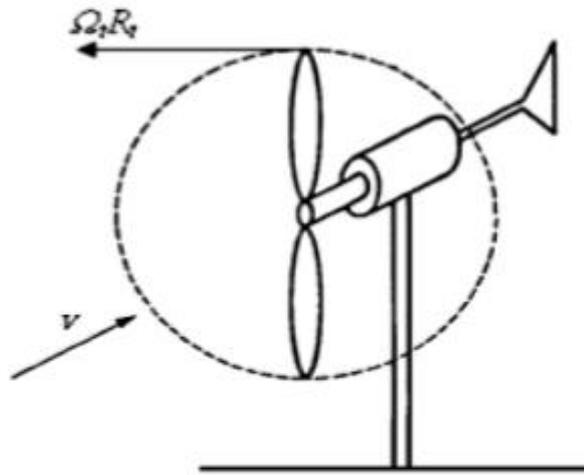


Figure ( II.3 ) : Vitesse de vent ( $v$ ) et vitesse tangentielle de l'aube ( $\Omega_t R_t$ ) .[5]

### II.2.4 Le coefficient $C_p$ :

Le coefficient  $C_p$  indique le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible.[5]

Le coefficient  $C_p$  est variable, il dépend de plusieurs paramètres tel que : la vitesse du vent, la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$ , et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage.[5]

### II.2.5 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes :

Les courbes qui caractérisent les turbines éoliennes sont décrites par le coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ . Figure II.4.

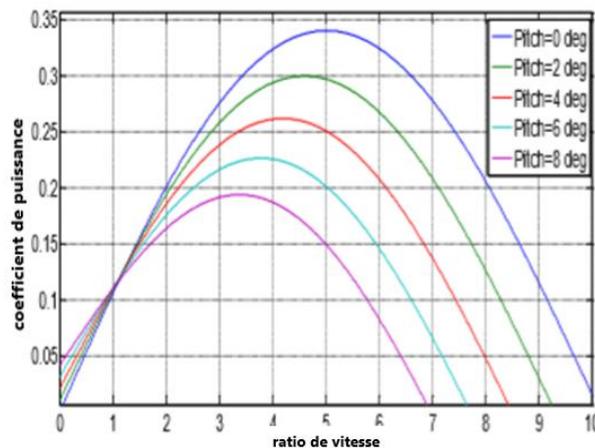


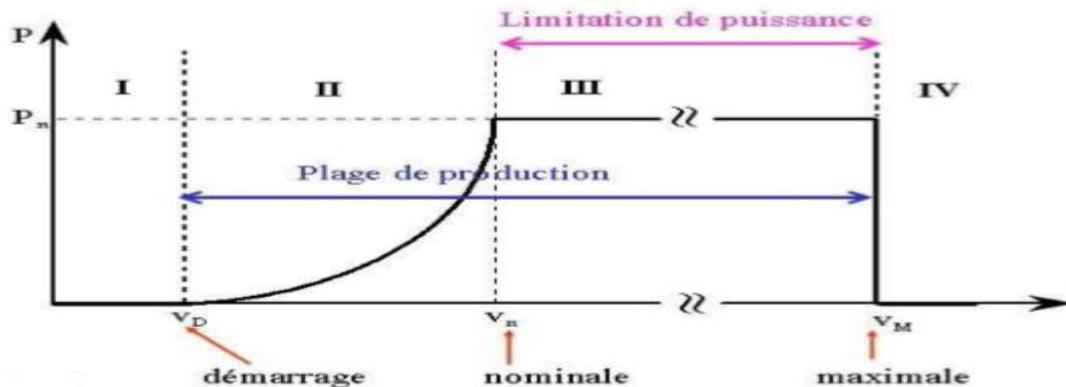
Figure (II.4) : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine  $\lambda$

### II.3 Régulation mécanique de la puissance aérodynamique :

Le fonctionnement d'un aérogénérateur est dépend de trois vitesses, que sont :

- $V_D$  : vitesse de démarrage
- $V_N$  : vitesse nominale
- $V_M$  : vitesse maximale

Ces trois vitesses définissent quatre zones de fonctionnement sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (voir figure II.9) : [3]



Figure( II.5) : puissance utile en fonction de la vitesse du vent

Pour la zone 1 la turbine ne fonctionne pas car le vent est assez faible, pour la deuxième le vent est atteint la vitesse de démarrage et la puissance augmente avec la croissance de la vitesse du vent jusqu'à atteindre sa valeur nominale ; dans la zone trois grâce à un système de régulation mécanique, la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance fournie est égale à la puissance nominale, dans la dernière zone la puissance est nulle car le système de sécurité arrête le transfert de l'énergie. [3]

### II.3.2 Technique de régulation pour les éoliennes :

il existe deux technique de régulation dans le cas des éoliennes à grande puissance.

#### a) Régulation « pitch » :

Cette régulation est appelée aussi « à pas variable » ou « calage variable » a pour but de varier l'angle de calage des pales et d'ajuster leur portance à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone « 3 ».

En général, cette régulation a quatre objectif distincts :

- Démarrage à une vitesse du vent réduite
- Régulation de la vitesse  $\Omega$ , pour  $V > V_N$
- Optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites  $[V_D V_N]$
- Protection de l'éolienne contre les grandes vitesses du vent ( $V > V_M$ ), par la mise en drapeau des pales de l'hélice [3]

#### b) Régulation « stall » :

Elle est appelée aussi « à décrochage aérodynamique », est un système de régulation aérodynamique passif. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Ce système empêche les pales, qui sont conçues spécialement pour subir des décrochages, d'accélérer en utilisant l'effet Stall qui agit comme un frein par le décrochage aérodynamique au niveau de la pale du rotor. En effet grâce à sa forme, la pale ne peut plus accélérer même si le vent augmente. En plus elle est la plus fiable car elle possède moins de pièces (pas de système de contrôle d'angle de calage). [4]

### II.4 Modèle du profil de vent :

Pour la production de l'énergie électrique à partir des éoliennes, il est nécessaire de déterminer un modèle mathématique du profil du vent. Ce dernier peut être une simple loi exponentielle ou des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente.[6]

La modélisation est essentiel pour définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne et les solutions qui s'appliquent sur les pales et pour développer et affiner la modélisation du rotor. Et aussi pour connaitre le potentiel de l'énergie utilisable.

La modélisation du vent est dépend de plusieurs paramètres tel que les données climatiques et géographiques du site concerné.

La vitesse du vent instantanée est donnée par une série de fourier. Elle représente le vent comme un signal constitué par une somme de plusieurs harmoniques.

Elle s'écrit :

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(w_k t) \quad \text{II.13}$$

Où :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent .

$a_k$  : Amplitude de l'harmonique de l'ordre K

$w_k$  : Pulsation de l'harmonique de l'ordre K

i : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

### II.5 Modèle de la turbine :

Les variables d'entrée/sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit [5] :

- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.

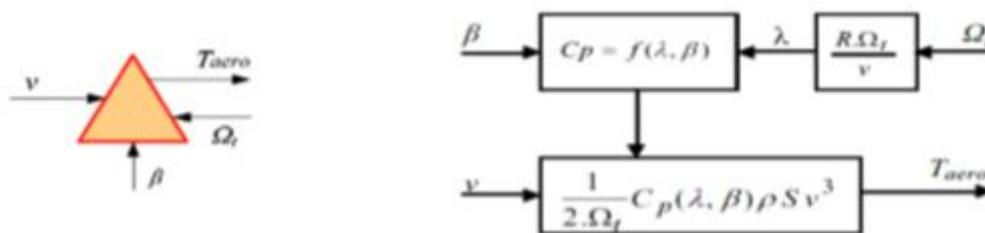
La caractéristique  $C_p(\lambda)$  de la voilure est représentée par un polynôme de troisième degré sous la forme [7]:

$$C_p(\lambda) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda^i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\lambda i - 21} \quad \text{II.14}$$

$$\frac{1}{\lambda^i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^{3+1}} \quad \text{II.15}$$

### II.6 Modèle des pales :

Le schéma bloc des pales étudiées sont représentés en Figure II.6 [9].



Figure( II.6) : Schéma bloc du modèle des pales [8].

### II.7 Modèle de multiplicateur de vitesse :

le multiplicateur de vitesse est situé entre la turbine éolienne et la génératrice, son role est d'adapter la vitesse de la turbine  $\Omega_t$ , assez lente, à celle que nécessite la génératrice  $\Omega$ .

Il est représenté par les deux équations suivantes :

$$G = \frac{C_t}{C_{mec}} \quad \text{II.16}$$

$$G = \frac{\Omega_r}{\Omega_t} \quad \text{II.17}$$

Avec :

G : Rapport de multiplication.

$C_t$  : Couple mécanique de la turbine éolienne [N.m],

$C_{mec}$  : Couple mécanique sur l'axe de la génératrice [N.m],

$\Omega_r$  : Vitesse de la génératrice (arbre rapide en rd/s),

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation des pales (arbre lent en rd/s).

La modélisation de la transmission mécanique se résume comme suit :

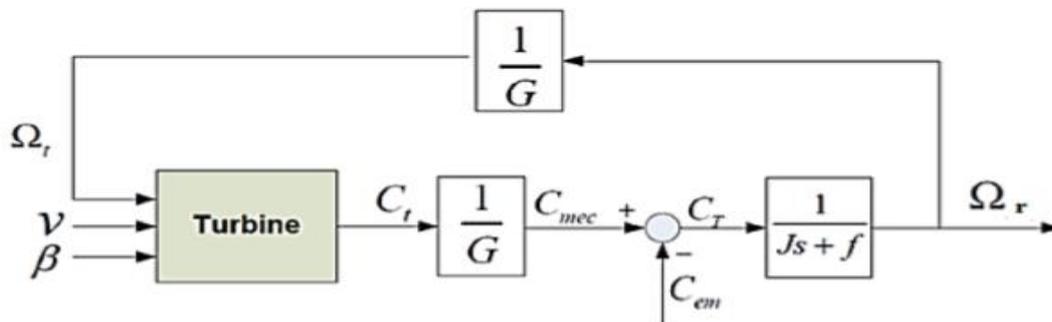
$$J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} = C_{mec} - C_{em} - f \cdot \Omega_{mec} \quad \text{II.18}$$

Où :

J : Inertie totale des parties tournantes [kg.m<sup>3</sup>],

f: Coefficient de frottement visqueux,

$C_{em}$  : Couple électromagnétique de la génératrice [N.m]. [36]



Figure( II.7) : Turbine connecté au modèle de multiplicateur de vitesse et au modèle de l'arbre [10]

## II.8 Les stratégies de commande de la turbine :

On voit bien qu'il y a deux zone de fonctionnement intéressante ou interviennent deux stratégies de commande, l'une pour maximiser la puissance et l'autre pour la limiter à sa valeur nominale.

### a) Méthodes de recherche du point maximum de puissance :

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est représentée une courbe non linéaire en forme de «cloche» [5]. Pour chaque vitesse du vent, le système doit atteindre sa puissance maximale qui correspond à sa vitesse de rotation optimale. [11]

La figure (II.8) représente la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la turbine de l'éolienne. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent  $V_v$  donnée. L'ensemble des sommets (points optimaux recherchés) de ces caractéristiques définit la courbe de puissance optimale. L'équation de cette courbe est :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad \text{II.19}$$

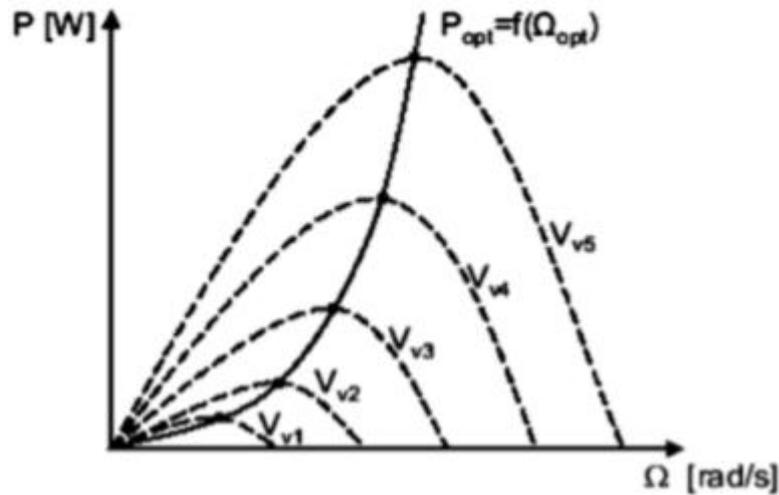


Figure (II.8) : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation [26].

### b) Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse :

En appliquant cette solution lorsque la valeur de la vitesse spécifique optimale  $\lambda_{opt}$  est connue. En effet, selon la relation II.12 la vitesse de référence est :

$$\Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt}}{R} v_v \quad \text{II.20}$$

Le schéma de simulation d'une turbine éolienne par cette méthode, en utilisant un régulateur PI (proportionnel-intégral) pour l'asservissement de la vitesse mécanique, est donné sur la figure (II.9) : [12]

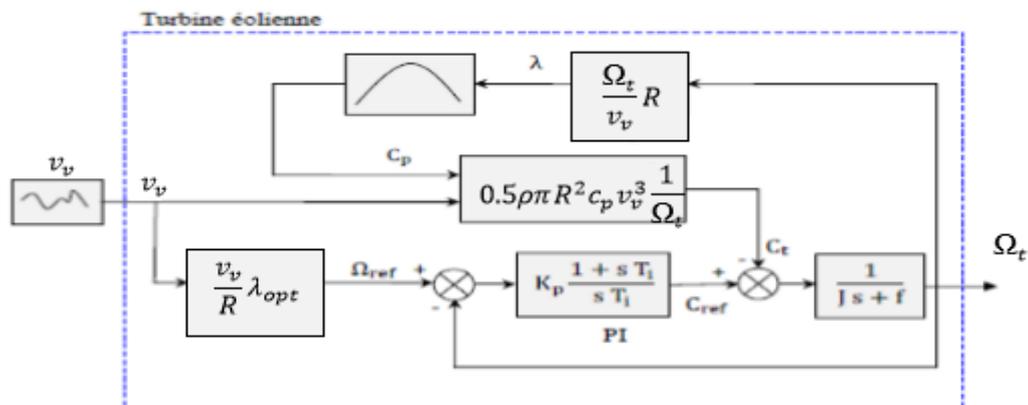


Figure (II.9) : Schéma bloc de la simulation de la turbine éolienne [12]

### c) Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse :

Le recours au control des éoliennes sans asservissement de vitesse est considéré comme une nécessité pour la plupart des constructeurs. [13]

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varient très peu en régime permanent. Ceci, implique que :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul  $C_{mec} = 0$
- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé  $C_f \approx 0$  [3]

## II.9 Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent :

### II.9.1 Hypothèses simplificatrices :

Dans cette partie on va modéliser la génératrice synchrone à aimant permanent, en basant sur les hypothèses suivantes :

- On néglige la saturation du circuit magnétique, ainsi que les pertes par hystérésis et courant de Foucault. Cela permet de définir facilement les inductances propres ou mutuelles des bobinages.
- On suppose que les enroulements de chaque phase du stator est celle de la roue polaire, créent un flux à répartition sinusoïdale. Cela simplifie l'expression des mutuelles-inductances entre phase du stator et du rotor.
- La construction de la machine est supposé symétrique pour éliminer la composante homopolaire de la machine.
- L'entrefer est constant et l'échauffement n'est pas pris en compte. [14]

### II.9.2 Mise en équations électriques et magnétiques dans repère (a b c) :

Schéma qui représente la machine à modélisé est donné par (figure II.10) :

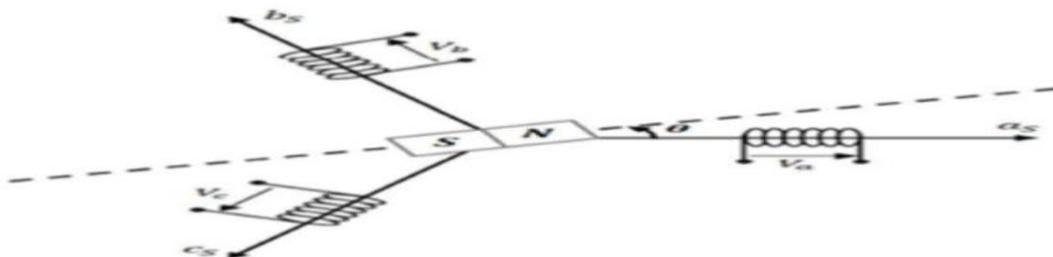


Figure (II.10) : schéma de la MSAP dans le repère (a, b, c) [14]

Au stator : trois enroulements a, b, c électriques décalés entre eux de  $2\pi/3$ . [14]

Au rotor : un inducteur à aimant permanent.

**a) Equation électrique :**

En régime permanent, le courant d'excitation est directement proportionnel à la tension d'excitation (car le flux  $\Phi_f$  est constant) :

Au stator :

$$[v_s] = R[is] + \frac{d}{dt} ([\Phi_s]) \quad \Leftrightarrow \quad \begin{cases} v_{s1} = R i_{s1} + \frac{d\Phi_{s1}}{dt} \\ v_{s2} = R i_{s2} + \frac{d\Phi_{s2}}{dt} \\ v_{s3} = R i_{s3} + \frac{d\Phi_{s3}}{dt} \end{cases} \quad \text{II.21}$$

Avec :

$$[\Phi_s] = ([L_s][is]) + [\Phi_{fs}(\theta)] \quad \text{II.22}$$

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix}, \text{ les tensions simples d'alimentation du stator.}$$

$$[is] = \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix}, \text{ les courants dans l'enroulement triphasé du stator. [14]}$$

**b) Equation des flux :**

$$[\Phi_s] = [L_s] + [L_{s2}(\theta)] \quad \text{II.23}$$

Où :

$$L_s = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}, \text{ la matrice des inductances et des inductances mutuelles.}$$

Avec  $l_s$  est l'inductance propre d'une phase. Alors que  $m_s$  est l'inductance mutuelle entre deux phases du stator.

$\theta$  : la distance angulaire que fait le pôle nord de la roue polaire avec l'axe de la phase  $i$  de l'armature fixe

$$[L_{s2}(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II.24}$$

$$M_{sf} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II.25}$$

$[M_{sf}]$  : La matrice d'inductance qui correspond au couplage entre le rotor et le stator. [14]

### c) Equation mécanique :

L'équation mécanique est exprimée comme suit :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} = C_{em} - C_r \quad \text{II.26}$$

Avec :

$J$  : moment d'inertie.

$C_{em}$  : couple électromagnétique.

$C_r$  : couple résistant.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

$\Omega_{mec}$  : vitesse angulaire mécanique rotorique. [14]

### II.9.3 Mise en équations électriques et magnétiques dans le repère de Park :

La transformation triphasé/diphasé consiste à transformer le système triphasé en un système réduit fictif (diphasé) pour simplifier l'étude et la modélisation puis retourner vers le système réel (triphase). Il y a plusieurs types de transformation dont on s'intéresse à celle de PARK. Il s'agit de remplacer les trois phases du stator par un système diphasé tournant d'axe 'd' dit direct et l'autre 'q' en quadrature. (Figure II.11) [14]

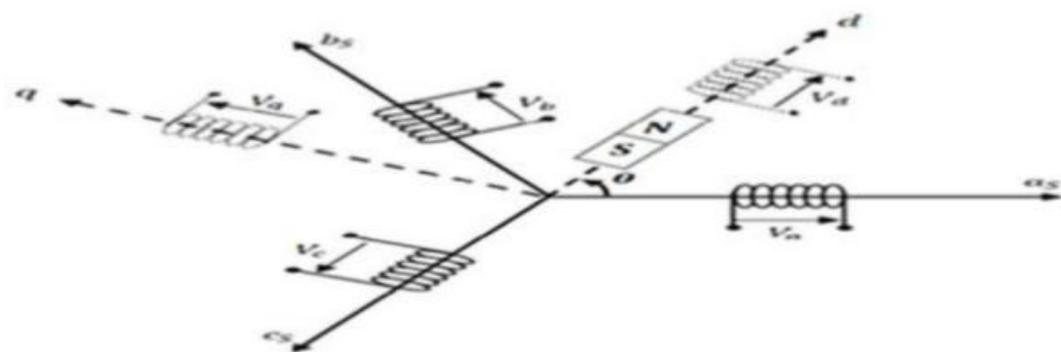


Figure ( II.11) : Schéma de la MSAP dans le repère (d q) [14]

$$V_{abc} = [P(\theta)] [V_{dq}] \quad \text{II.27}$$

$$[V_{dq}] = [P(\theta)]^{-1} [V_{abc}] \quad \text{II.28}$$

Avec :

$[P(\theta)]$  et  $[P(\theta)]^{-1}$  : sont les matrices de passage direct et inverse.

$$\begin{bmatrix} x_{sd} \\ x_{sq} \end{bmatrix} = P(\theta) \begin{bmatrix} x_{s1} \\ x_{s2} \\ x_{s3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{II.29}$$

$x$  peut être une des grandeurs sinusoïdales du stator et la transformée inverse depuis le repère diphasé vers le repère triphasé sera donnée comme suit :

$$\begin{bmatrix} xs1 \\ xs2 \\ xs3 \end{bmatrix} = P^T(\theta) \begin{bmatrix} xsd \\ xsq \end{bmatrix} \quad \text{II.30}$$

Appliquons cette transformation au système d'équation de la MS

$$P^T(\theta)[v_{dq}] = R * P^T(\theta)[i_{dq}] + L_s \frac{d}{dt}(P^T(\theta)[i_{dq}]) - P^T(\theta)[e_{dq}(\theta)] \quad \text{II.31}$$

On multiplie les deux membres de l'équation par  $P(\theta)$ , on aura :

$$[v_{dq}] = R * [i_{dq}] + L_s * P(\theta) \frac{d}{dt}(P^T(\theta)[i_{dq}]) + L_s \frac{d}{dt}(i_{dq}) - [e_{dq}(\theta)] \quad \text{II.32}$$

Avec :

$$P(\theta) \frac{d}{dt}(P^T(\theta)) = -w_s \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{II.33}$$

Et :

$$e_{dq}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} w_s M_{max} \begin{bmatrix} \sin(p\theta) \\ \sin(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(p\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{\frac{2}{3}} w_s M_{max} \end{bmatrix} \quad \text{II.34}$$

Ainsi, le système d'équation au stator de la MS devient en supposant  $\sqrt{\frac{2}{3}} M_{max} = M_f$

$$\begin{cases} Vd = R id + Ls \frac{di d}{dt} - Ls Ws iq \\ Vq = R iq + Ls \frac{di q}{dt} + Ls ws i_d + M_f ws J \end{cases} \quad \text{II.35}$$

Lorsque la machine synchrone est à aimant permanent, on pose  $M_f J = \phi_f$

$$\begin{cases} Vd = R id + Ls \frac{di d}{dt} - Ls Ws Iq \\ Vq = R iq + Ls \frac{di q}{dt} + Ls ws Id + ws \Phi_f \end{cases} \quad \text{II.36}$$

D'autre part :

$$\begin{cases} \Phi_d = L_s * i_d + \Phi_f \\ \Phi_q = L_s * i_q \end{cases} \quad \text{II.37}$$

Et le système d'équation au stator de la MS devient :

$$\begin{cases} Vd = R id + Ls \frac{d\Phi_d}{dt} - Ws \Phi_q \\ Vq = R iq + Ls \frac{d\Phi_q}{dt} + ws \Phi_d \end{cases} \quad \text{II.38}$$

La puissance instantanée mise en jeu par le moteur est :

$$p(t) = v_{s1}i_{s1} + v_{s2}i_{s2} + v_{s3}i_{s3} \quad \text{II.39}$$

En utilisant la transformé de PARK, on obtient :

$$p(t) = vdid + vqi q \quad \text{II.40}$$

Par substitution, on aboutie à:

$$p(t) = R(id^2 + iq^2) + \left(\frac{d\Phi d}{dt} id + \frac{d\Phi q}{dt} iq\right) + \omega_s (\Phi diq - \Phi qid) \quad \text{II.41}$$

$R(id^2 + iq^2)$  : représente la puissance dissipée en pertes Joules dan les enroulements du stator.

$\left(\frac{d\Phi d}{dt} id + \frac{d\Phi q}{dt} iq\right)$ : Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator. Cette puissance est nulle en régime permanent.

$\omega_s (\Phi diq - \Phi qid)$  : représente la puissance électromagnétique. Elle peut être écrite sous la forme :

$$Pe = p \frac{d\theta}{dt} (\Phi diq - \Phi qid) \quad \text{II.42}$$

On obtient le couple électromagnétique par la dérivée partielle de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du champ tournant comme suit :

$$dEe = Pe dt = p(\Phi diq - \Phi qid)d\theta \quad \text{II.43}$$

$$Te = \frac{dEe}{d\theta} = p(\Phi diq - \Phi qid) \quad \text{II.44}$$

Utilisons la transformation de LAPLACE pour les équations générales dans le plan de PARK régissant la MS en régime transitoire : [14]

Equation électrique au stator :

$$\begin{cases} Vd(s) = (R + Ls S)Id (s) - Ls \omega_s Iq (s) \\ Vq(s) = (R + Ls S)Iq (s) - Ls \omega_s Id (s) + p \Phi f \Omega(s) \end{cases} \quad \text{II.45}$$

Donc :

$$\begin{cases} Vd(s) = (R + Ls S)Id (s) - \omega_s \Phi q (s) \\ Vq(s) = (R + Ls S)Iq (s) + \omega_s \Phi d (s) \end{cases} \quad \text{II.46}$$

L'équation mécanique :

$$Te(s) - Tr(s) = (f + Js)\Omega(s) \quad \text{II.47}$$

Avec :

$$Te = p(\Phi d (s)iq(s) - \Phi q (s)id (s)) \quad \text{II.47}$$

Et :

$$\begin{cases} \Phi d = L d Id + \Phi f \\ \Phi q = L q Iq \end{cases} \quad \text{II.48}$$

## II.10 modélisation à vide de la GSAP :

Pour la génératrice à vide les courants statoriques sont nulles :

$$\begin{cases} Id = 0 \\ Iq = 0 \end{cases} \quad \text{II.49}$$

Les expressions de tension et du couple deviennent :

$$\begin{cases} Vd = 0 \\ Vq = w\varphi_f \\ C_{em} = 0 \end{cases} \quad \text{II.50}$$

### II.10.1 résultats de simulation :

Dans ce fonctionnement, on voulait montrer la proportionnalité entre la vitesse de rotation de la génératrice, l'amplitude et la fréquence de la tension fournie. Pour ce faire, on a démarré le générateur par un couple moteur égale à 4.138 N.m pour une durée de 0.01s puis on l'a laissé tourner librement. Le frottement dans ce cas est nul.

La figure (II.12) représente les tensions statoriques

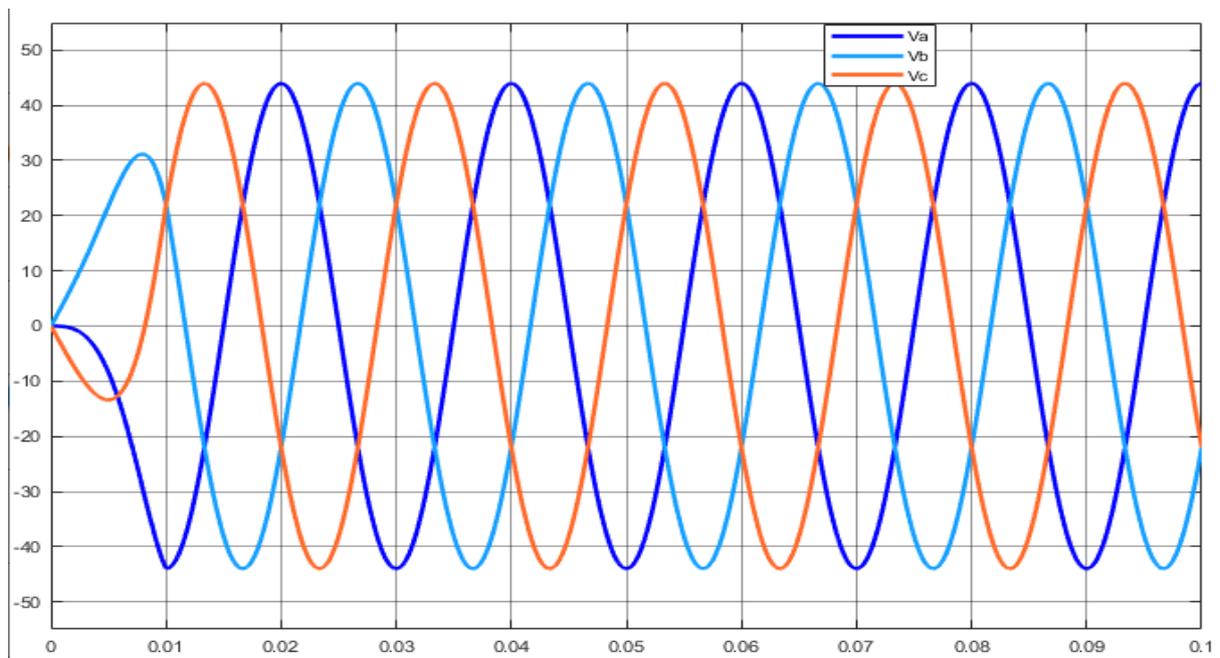


Figure (II.12) : Tensions statoriques

D'après la figure ci-dessus (II.12) on a remarqué que l'amplitude des tensions augmente avec la vitesse, puis les tensions deviennent parfaitement sinusoïdales en régime permanent à (0.01 s) avec une valeur crête de 44 (V) et une fréquence de 50 Hz.

Dans la figure (II.13), nous avons présenté les composantes des tensions directe  $V_d$  et quadratique  $V_q$ .

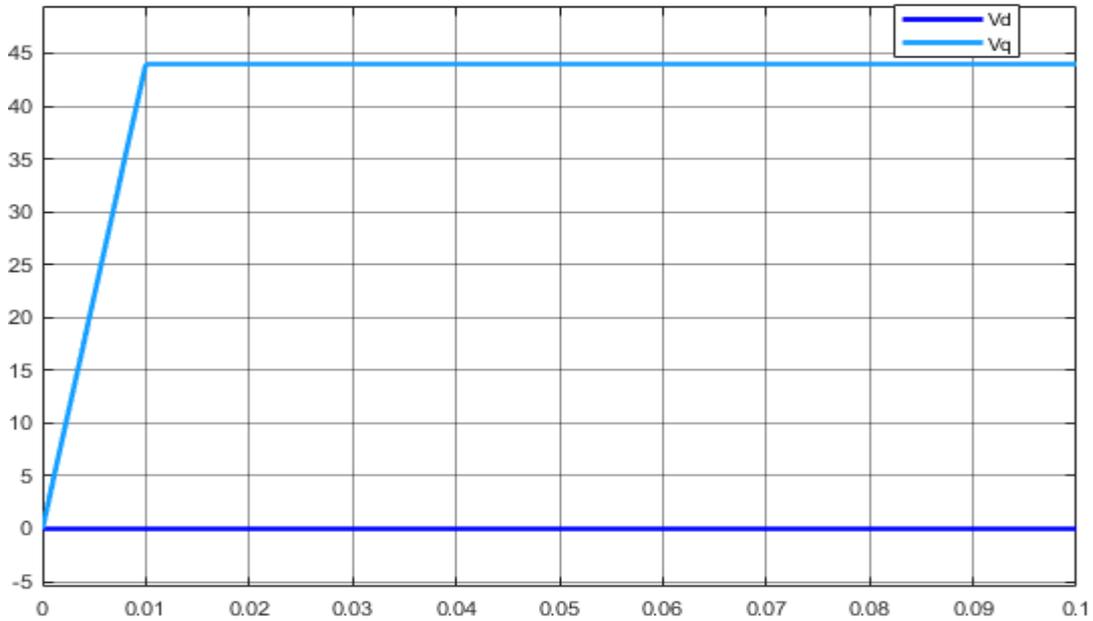


Figure (II.13) : Composantes  $V_d$  et  $V_q$

Nous avons remarqué que les deux tensions directe et quadratique prennent respectivement une valeur de 0V et 44V à (0.01s) ; ce qui correspond à la valeur crête.

La figure (II.14) représente le couple moteur et la vitesse de rotation

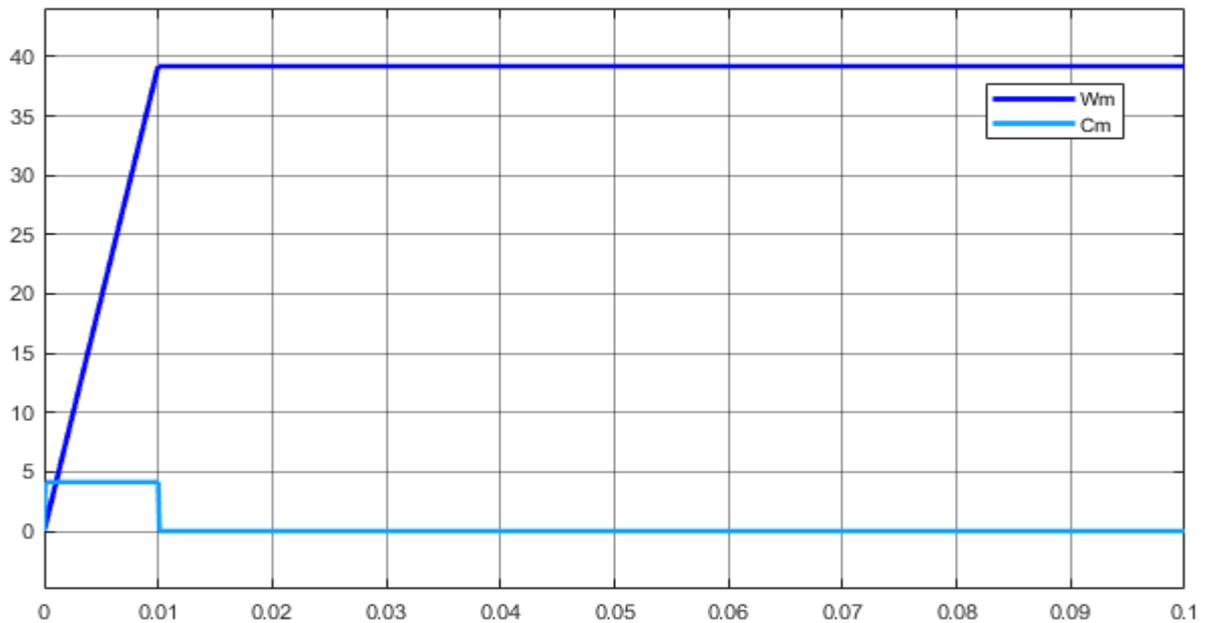


Figure (II.14) : Vitesse de rotation et couple moteur

Le couple moteur appliqué à la génératrice est égal à 4.138 Nm puis il s'annule à (0.01s) et la vitesse de rotation augmente jusqu'à ce qu'elle se stabilise à la valeur (39.2 tr/min). Les couple moteur et électromagnétique et le frottement sont nuls à partir de cet instant, alors on peut dire que l'amplitude des tensions statoriques et la fréquence sont proportionnels à la vitesse de rotation.

## II.11 modélisation de la GSAP en charge :

$$\begin{cases} Vd = R_{ch}i_d + L_{ch}\frac{d}{dt}i_d - wL_{ch}i_q \\ Vq = R_{ch}i_q + L_{ch}\frac{d}{dt}i_q - wL_{ch}i_d \end{cases} \quad \text{II.51}$$

En remplaçant les expressions de  $Vd$  et  $Vq$  dans l'équation (II.46), on aura le système suivant : [14]

$$\begin{cases} 0 = -(R_s + R_{ch})i_d - (L_d + L_{ch})\frac{d}{dt}i_d + w(L_q + L_{ch})i_q \\ 0 = -(R_s + R_{ch})i_q - (L_q + L_{ch})\frac{d}{dt}i_q + w(L_d + L_{ch})i_d + w\varphi_f \end{cases} \quad \text{II.52}$$

En introduisant le modèle d'état dans les équations ci-dessus, elles deviennent : [14]

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})i_d + w(L_q + L_{ch})i_q] \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q + L_{ch}} [-(R_s + R_{ch})i_q + w(L_d + L_{ch})i_d] + w\varphi_f \end{cases} \quad \text{II.53}$$

### II.11.1 Résultats de simulation :

Pour déduire le comportement de la charge sur le fonctionnement de la génératrice, on a supposé que le couple d'entraînement soit  $C_m=3.5$  N.m à l'instant 0s. Ensuite, on a diminué ce couple  $C_m= 3$  Nm à l'instant 0.5 s. Pour voir les tensions et les courants résultants de l'application de cette charge sur le générateur.

La simulation a donné les résultats suivants :

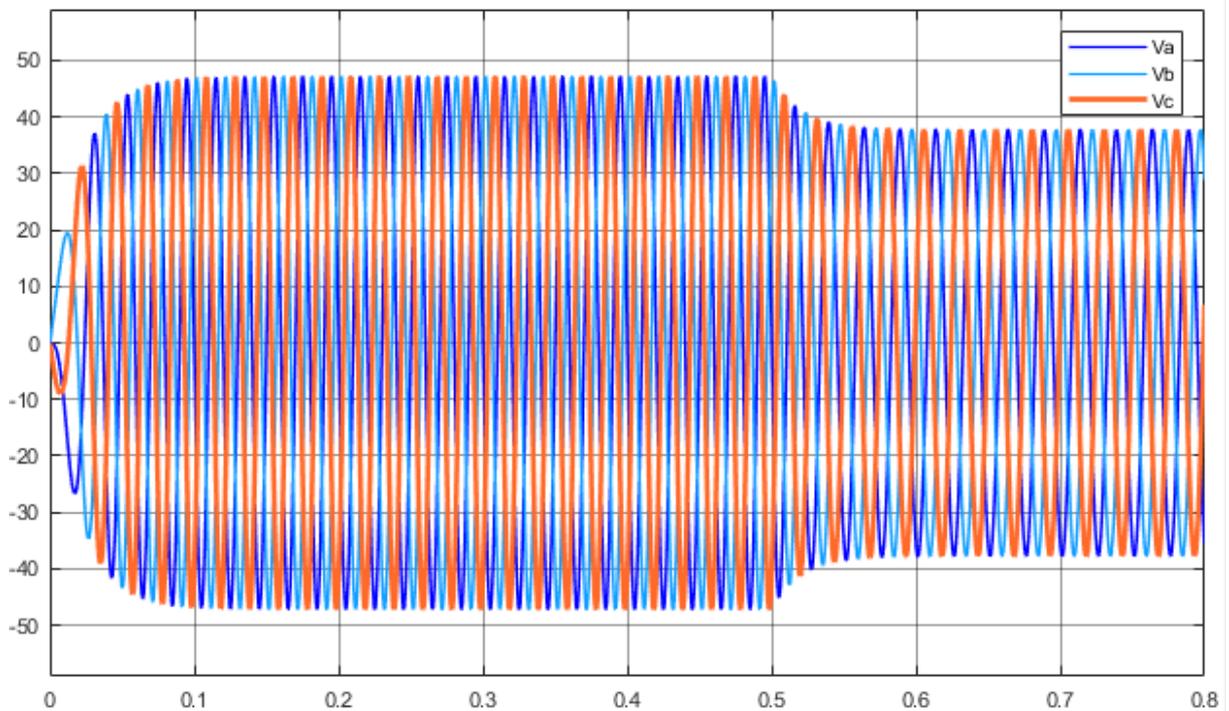


Figure (II.15) : Tensions de phases  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$

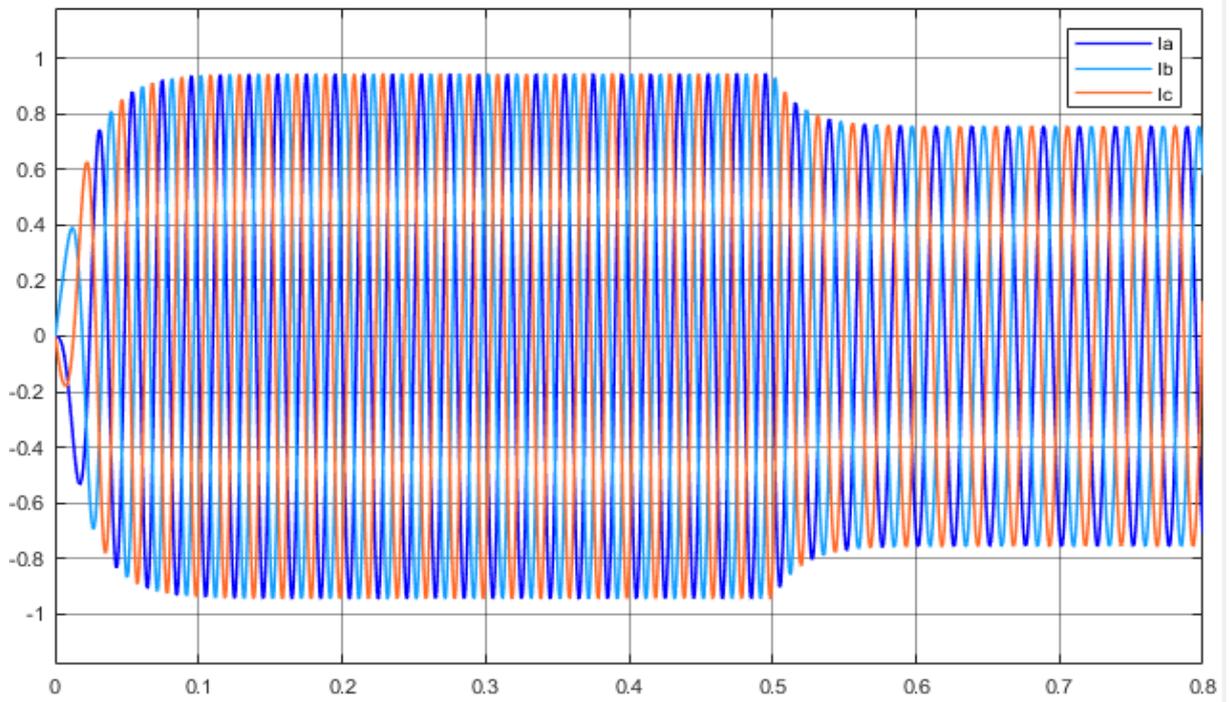


Figure (II.16) : Courants de phase Ia, Ib, Ic

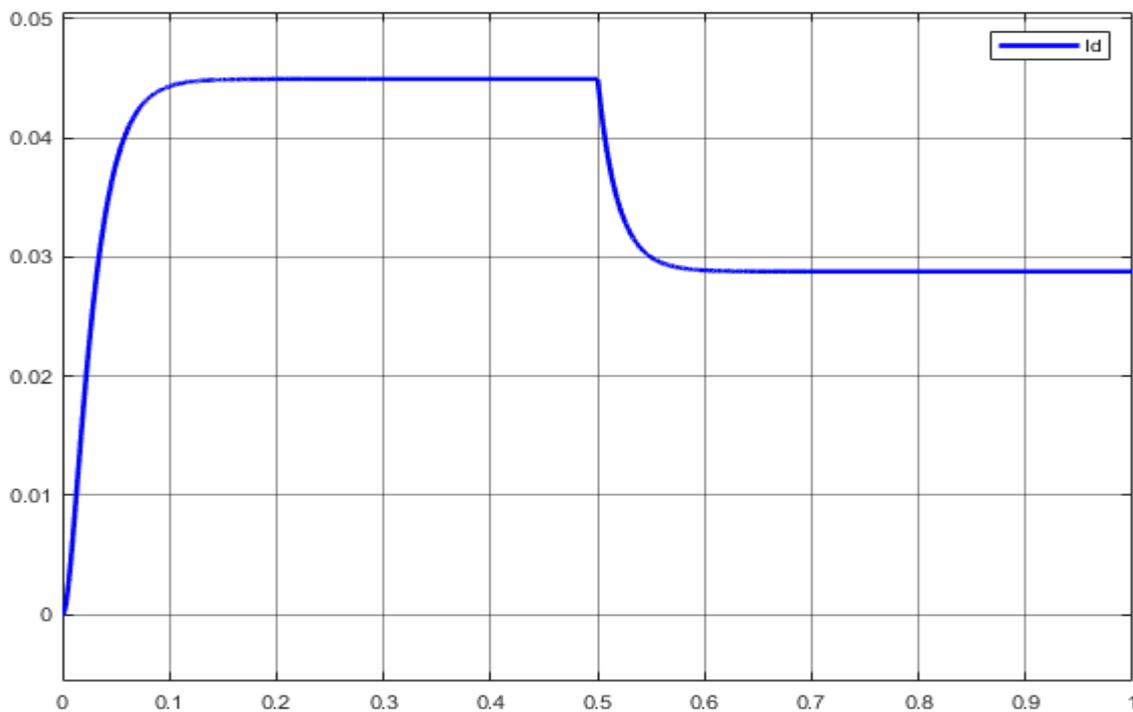


Figure (II.17) : Courants direct Id.

#### ❖ Interprétations :

Pour déduire l'effet de la charge électrique sur le comportement de la GSAP en fonction de la puissance mécanique fournie on applique un couple mécanique  $C_m = 3.5 \text{ N.m}$ , on

remarque que le courant commence à augmenter en manifestant un couple électromagnétique qui suit le couple magnétique  $C_m$ .

Les tensions réelles de la GSAP entrent dans un régime uniforme et stable ;  $V_a=V_b=V_c$ . Une fois que le couple d'entraînement diminue à la valeur  $C_m=3 \text{ N.m}$ , la machine va ralentir. Les tensions réelles de la GSAP vont diminuer en limitant le courant. Il est clair donc, que la puissance électrique de la charge est directement liée à la puissance mécanique fournie. Le couple électromagnétique va diminuer jusqu'à ce qu'il soit égal au  $C_m$ . On remarque aussi que le courant direct est inférieur au courant quadratique.

## II.12 Modélisation d'interface d'électronique de puissance :

Dans cette partie, on va étudier les convertisseurs qui prennent une part dans la chaîne de conversion éolienne.

### II.12.1 Redresseur triphasé à diode doubles alternance:

Le redresseur est les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assure la conversion alternative continue, il est représenté par la figure (II.18) :

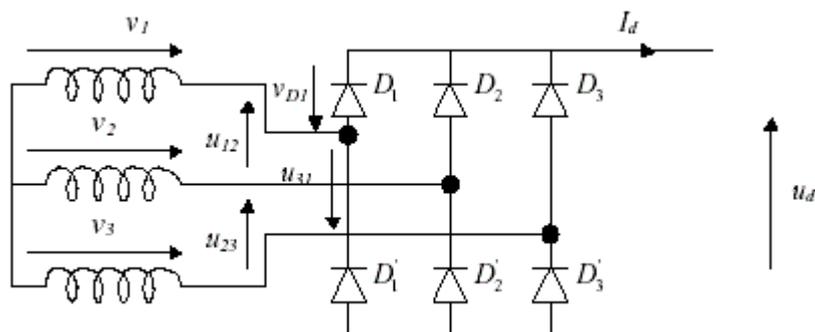


Figure (II.18) : Représentation triphasé à diodes à doubles alternances.

Le redressement triphasé à double alternance utilise six diodes (ou thyristors si on souhaite le commander). La tension de sortie est caractérisée par trois valeurs : tension minimale, tension moyenne et tension crête.

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur à diode peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin wt \\ V_2 = V_m \sin(wt - \frac{2f}{3}) \\ V_3 = V_m \sin(wt + \frac{2f}{3}) \end{cases} \quad \text{II.54}$$

En négligeant d'empiétement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit :

$$u_d(t) = \max[V_1(t), V_2(t), V_3(t)] - \min[V_1(t), V_2(t), V_3(t)] \quad \text{II.55}$$

### II.12.2 redresseur MLI :

Les redresseurs à MLI sont des onduleurs exploitant leurs réversibilités en courant dans le deuxième mode de fonctionnement. Grâce à la commande MLI, ces convertisseurs peuvent prélever des courants sinusoïdaux sur le réseau alternatif et assurer aussi un facteur de puissance unitaire. [9]

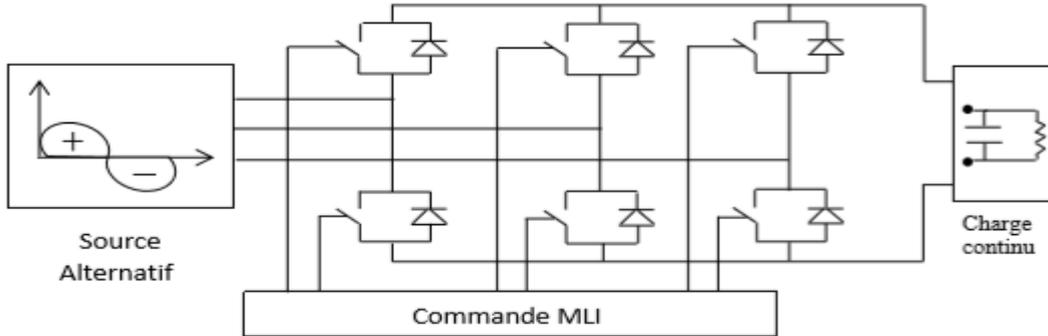


Figure (II.19) : Schéma de principe du redresseur MLI.

Le schéma suivant traduit les équations de tension pour le système triphasé équilibré :

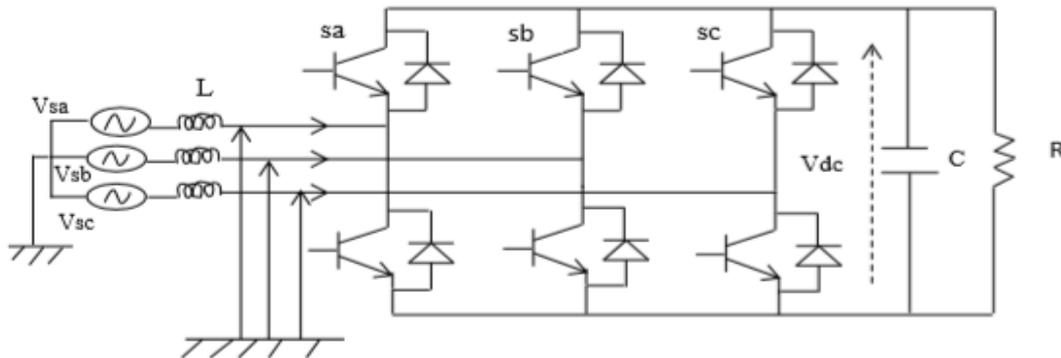


Figure (II.20) : Structure du redresseur triphasé.

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites comme suit :

$$\begin{cases} V_{sab} = (S_a - S_b)v_{dc} \\ V_{sbc} = (S_b - S_c)v_{dc} \\ V_{sca} = (S_c - S_a)v_{dc} \end{cases} \quad \text{II.56}$$

Les équations de tensions pour le système triphasé équilibré sans neutre peuvent être écrites comme :

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{II.57}$$

Avec :

$$v_{sa} = \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} v_{dc} \quad \text{II.58}$$

$$v_{sb} = \frac{S_a - 2S_b - S_c}{3} v_{dc} \quad \text{II.59}$$

$$v_{sc} = \frac{2s_a - s_b - 2s_c}{3} v_{dc}$$

II.60

### II.12.3 La commande MLI :

Le principe de la commande MLI est de faire la comparaison entre deux signaux, un signal sinusoïdale de référence appelé modulatrice et l'autre triangulaire ou en dents de scie appelée porteuse, tel que la fréquence  $f_p$  est très grande devant la fréquence  $f$  de référence, on obtient à la sortie des convertisseurs et des tensions ou des courants en forme de plusieurs créneaux rectangulaires de largeurs convenables. [15]

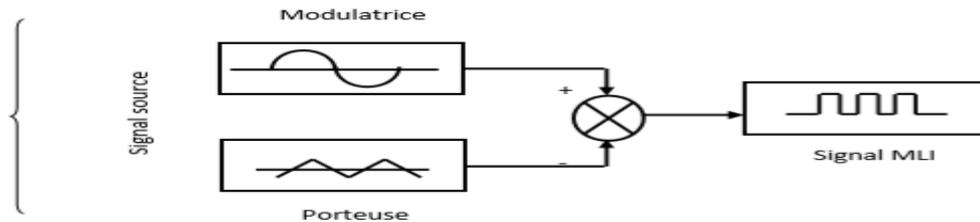


Figure (II.21) : Schéma synoptique d'un MLI

### II.12.5 Modèle de l'onduleur de tension :

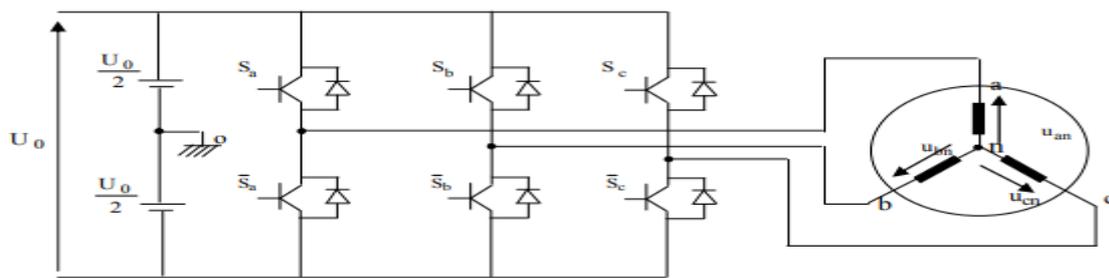


Figure (II.22) : schéma d'un onduleur de tension triphasé [18]

L'onduleur est un convertisseur statique se compose de cellules de commutation généralement à transistors ou des thyristors pour les grandes puissances. [16]

Dans notre cas, l'onduleur triphasé alimente la GSAP par un système de tension triphasé à fréquence et amplitude variable obtenu par un redresseur triphasé suivi d'un filtre. Pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge et éviter le court-circuit de la source il faut que les couples d'interrupteurs des trois bras de l'onduleur soient commandés de manière complémentaire. Les six diodes antiparallèles sont des diodes de roue libre assurant la protection des transistors.

Pour chaque bras, il existe donc deux états indépendants. Ces deux états peuvent être considérés comme une grandeur logique.

Les signaux de commandes de ces interrupteurs sont réalisés de sorte que les tensions de sortie de l'onduleur suivent les tensions de référence.

La modélisation du convertisseur consiste à exprimer les tensions en lignes, en fonction de la tension dans le bus continu et de l'état des commutateurs.[18]

Les tensions composées  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  et  $U_{ca}$  sont obtenues à partir de ces relations :

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{ao} + u_{ob} = u_{ao} - u_{bo} \\ u_{bc} = u_{bo} + u_{oc} = u_{bo} - u_{co} \\ u_{ca} = u_{co} + u_{oa} = u_{co} - u_{ao} \end{cases} \quad \text{II.61}$$

Avec :

$u_{ao}$ ,  $u_{bo}$  et  $u_{co}$  sont les tensions d'entrée de l'onduleur. Elles sont référencées par rapport à un point « o » d'un diviseur fictif d'entrée.

Soit « n » l'indice du point neutre du côté alternatif. On peut écrire les relations de Charles, comme suit : [18]

$$\begin{cases} u_{ao} = u_{an} + u_{no} \\ u_{bo} = u_{bn} + u_{no} \\ u_{co} = u_{cn} + u_{no} \end{cases} \quad \text{II.62}$$

$u_{an}$ ,  $u_{bn}$  et  $u_{cn}$  sont les tensions simples de la machines et  $u_{no}$  est la tension fictive entre le neutre de la charge et le point fictif d'indice « o ». [18]

Sachant que la charge est équilibré et le neutre isolé alors :

$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad \text{II.63}$$

En remplaçant l'équation (II.63) dans l'équation (II.62) :

$$u_{no} = \frac{1}{3}(u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad \text{II.64}$$

La substitution de (II.64) dans (II.61), on aboutit à :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{bn} = \frac{-1}{3}u_{ao} + \frac{2}{3}u_{bo} - \frac{1}{3}u_{co} \\ u_{cn} = \frac{-1}{3}u_{ao} - \frac{1}{3}u_{bo} + \frac{2}{3}u_{co} \end{cases} \quad \text{II.65}$$

Alors :

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{U_0}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ u_{bn} = \frac{U_0}{3}(-S_a + 2S_b - S_c) \\ u_{cn} = \frac{U_0}{3}(-S_a - S_b + 2S_c) \end{cases} \quad \text{II.66}$$

## II.13 La commande vectorielle :

### II.13.1 Principe de la commande vectorielle :

Le principe de la commande vectorielle permet de modéliser la machine synchrone comme une machine à courant continu. Il faut cependant se placer dans un repère particulier où le couple électromagnétique s'exprime simplement en fonction des composantes des courants suivant les deux axes (axe d et axe q). Habituellement, la composante d'axe 'd' du

courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe 'q' joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple. [17]

Pour réaliser un contrôle similaire à celui des machines à courant continu à excitation séparée, il faut maintenir le courant  $I_d$  nul et de réguler la vitesse ou la position par le courant  $I_q$  via la tension  $V_q$ .

$$I_d = 0 \quad \text{II.67}$$

$$I_q = I_s \quad \text{II.68}$$

Donc :

$$\Phi_d = \Phi_f \quad \text{II.69}$$

La forme du couple électromagnétique à flux constant :

$$C_{em} = k_t I_q \quad \text{II.70}$$

Le couple est directement proportionnel à  $i_q$  :

$$k_t = \frac{3}{2} p \Phi_f \quad \text{II.71}$$

### II.13.2 La commande vectorielle de la GSAP :

La structure de la commande est composée de l'association d'une machine synchrone à aimant permanent dans le repère (d, q). La référence du courant direct  $I_{d\_ref}$  est fixé à zéro et la sortie du régulateur de la tension du bus continu constitue la consigne du couple. Le couple dépend seulement du courant  $I_q$ . Alors, on peut contrôler le couple uniquement par la composante  $I_q$ . Les références des courant direct  $I_{d\_ref}$  et  $I_{q\_ref}$  sont comparées séparément aux courant réelle de la machine  $i_d$  et  $i_q$  les erreurs des courants sont appliqués à l'entrée des régulateurs classiques de type PI. Un bloc de découplage génère les tensions de références  $V_d^*$  et  $V_q^*$ . Le système est muni d'une boucle de régulation de tension, qui permet de générer la référence de courant  $I_{q\_ref}$ . Par contre, le courant  $I_{d\_ref}$  est nul dans ce cas. Les sorties du bloc de découplage  $V_d^*$  et  $V_q^*$  passent par une transformation biphasé vers triphasé ce qui nous donne les trois tensions de référence  $V_a^*$ ,  $V_b^*$ ,  $V_c^*$  de la commande MLI, et qui doivent être comparés avec porteuse triangulaire alternative pour générer les signaux logiques destinés à attaquer les semi-conducteurs du redresseur. [14]

La Figure (II.23) Représente le schéma bloc de la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimant permanent :

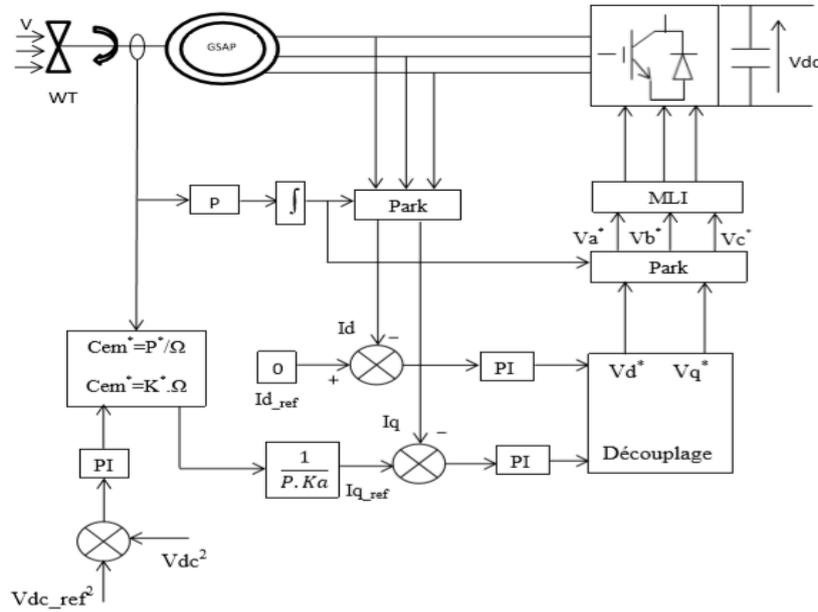


Figure (II.23) : système global [18]

#### II.13.4 découplage :

On impose des tensions de référence à l'entrée de la commande du redresseur. Ces tensions permettent de définir les rapports cycliques sur les bras de redresseur. [18]

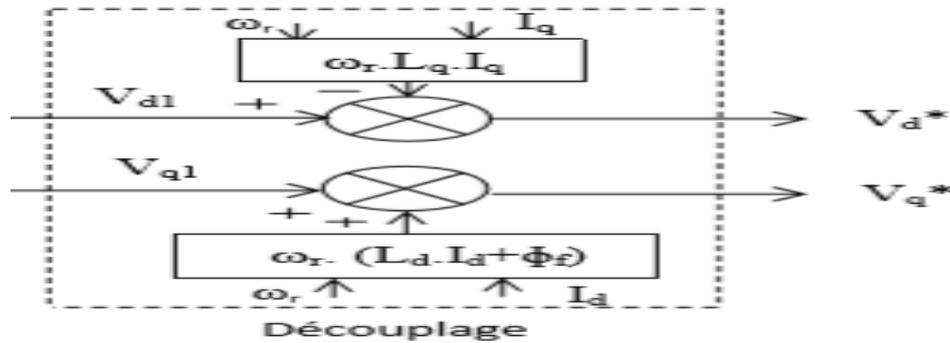


Figure (II.24) : schéma de découplage [18]

Dans le schéma précédent, les tensions  $V_{d1}$  et  $V_{q1}$  représentent les sorties des régulateurs de courant  $I_d$  et  $I_q$  :

$$\begin{cases} -v_d = (R_s + L_d S)I_d - w_r L_q I_q \\ -v_q = (R_s + L_q S)I_q + w_r (L_d I_d + \phi_f) \end{cases} \quad \text{II.72}$$

A partir de l'équation (II.72), Les termes de découplage sont considérés comme suit :

$$\begin{cases} v_d = v_d^* + e_d \\ e_d = -w_r L_q I_q \end{cases} \quad \text{II.73}$$

Avec :

$$v_d^* = (R_s + L_d S) I_d \quad \text{II.74}$$

Donc :

$$\frac{I_d}{v_d^*} = \frac{1}{(R_s + L_d S)} \quad \text{II.75}$$

Le même principe pour  $V_q$  :

$$\begin{cases} v_q = v_q^* + e_q \\ e_q = \omega_r (L_d I_d + \Phi_f) \end{cases} \quad \text{II.76}$$

Avec :

$$v_d^* = (R_s + L_q S) I_q \quad \text{II.77}$$

Donc :

$$\frac{I_q}{v_q^*} = \frac{1}{(R_s + L_q S)} \quad \text{II.78}$$

### II.13.5 Synthèse des Contrôleurs PI du convertisseur de puissance :

Dans la plupart des processus industriels, en particulier les moteurs électriques, il est indispensable de maîtriser certains paramètres physiques (vitesse, position, angle...etc.), il est donc très souvent nécessaire d'avoir recours à une commande. La commande Proportionnelle Intégrale (PI) est une méthode qui a fait ses preuves et qui donne de bons résultats grâce à l'action proportionnelle qui améliore la rapidité, l'intégrale pour la précision. [17]

Le schéma général d'un correcteur PI est donné par la figure suivante :

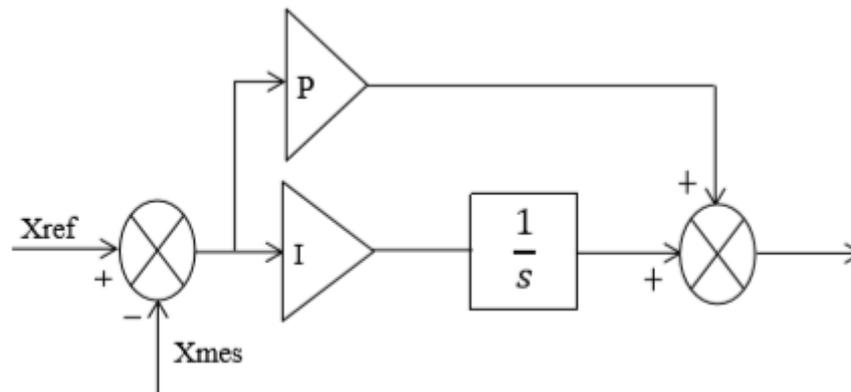


Figure (II.25) : Schéma bloc du correcteur PI [18]

#### II.13.5.1 Régulateur de courant :

La fonction de transfert de la machine peut s'écrire sous la forme :

$$G_s(p) = \frac{1}{R_s + L_s p} = \frac{1}{R_s} \cdot \frac{1}{1 + T_e p} \quad \text{II.79}$$

Avec la constante du temps électrique :

$$T_e = \frac{L_s}{R_s} \quad \text{II.80}$$

Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné sur la Figure (II.26), (Le schéma est identique pour la boucle de courant dans l'axe d). [18]

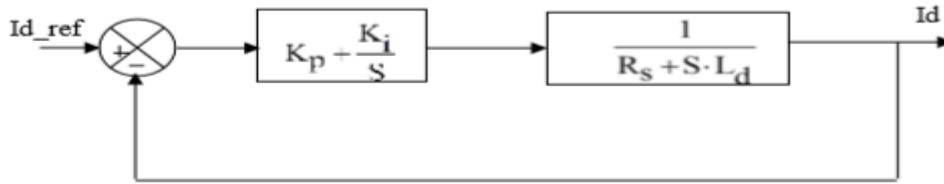


Figure (II.26) : Boucle de régulation du courant id [18]

Le calcul des régulateurs est effectué à l'aide du principe d'imposition des pôles. On constate bien que les variables à régler " $I_d$  et  $I_q$ " sont liées avec les commandes " $V_d^*$ " et " $V_q^*$ " par la même relation. Donc les paramètres des deux correcteur seront les mêmes. [14]

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée comme suit :

$$H_{BO}(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left( \frac{1}{R_s + sL_s} \right) \quad \text{II.81}$$

La fonction de transfert en boucle fermée est :

$$H_{BF} = \frac{1 + K_p s}{1 + (K_p + K_i R) s + K_i L_s s^2} \quad \text{II.82}$$

Les pôles à imposer sont complexe conjugués à partie réelle négative pour avoir une réponse à amortissement relatif optimal.

$$s_{1,2} = \rho \pm \rho j \quad \text{II.83}$$

D'où :

$$\left( 1 - \frac{1}{s_1} \right) \left( 1 - \frac{1}{s_2} \right) = \frac{1}{2\rho^2} s^2 + \frac{1}{\rho} s + 1 \quad \text{II.84}$$

Par identification entre les deux dénominateurs, on aura :

$$K_i = \frac{1}{2\rho^2 L_s} \quad \text{II.79} \quad \text{Et} \quad K_p = \frac{1}{\rho} - K_i R \quad \text{II.85}$$

Le paramètre " $\rho$ " est choisi selon le cahier de charge. [14]

### II.13.5.2 Régulation de tension $V_{dc}$ :

Les boucles de régulation se présentent alors sous la forme du schéma donné sur la Figure (II. 27) :

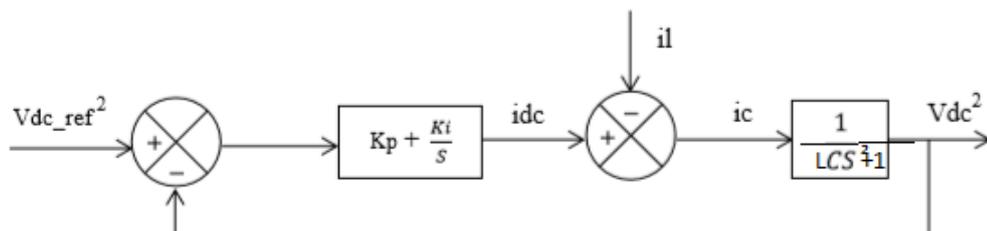


Figure (II.27) : Régulation de tension  $V_{dc}$  [15]

La fonction de transfert de la machine peut s'écrire sous la forme :

$$H_{BO}(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left( \frac{1}{1 + L_f C_f s^2} \right) \quad \text{II.86}$$

Il existe plusieurs méthodes pour calculer les paramètres du régulateur  $K_p$  et  $K_i$ . [15]

## II.14 Modélisation de la liaison au réseau

Le système de contrôle doit répondre aux objectifs suivants:

- maintenir une tension de bus continu constante.
- Assurer un contrôle indépendant de la puissance active et réactive circulant entre l'onduleur et le réseau.
- Assurez-vous d'injecter un courant sinusoïdal en phase avec la tension, sinon le facteur de puissance doit être proche de l'unité. [18]

### II.14.1 Modélisation et régulation du bus continu :

Le but de l'ajustement de la tension du bus continu est de la maintenir à une valeur de référence constante pour contrôler le processus de charge et de décharge du condensat. Le schéma électrique du bus continu représenté sur la figure (II.28) nous montre que le courant de condensation provient d'un nœud et que deux courants modulés par chaque convertisseur transitent par ce nœud. [18]

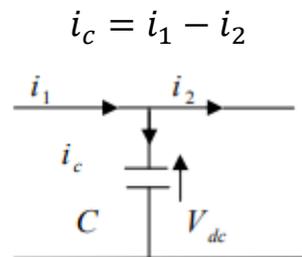


Figure (II.28) : Schéma électrique du bus continu. [18]

En modélisant le bus continu en comprenant la tension aux bornes du condensateur obtenue en intégrant l'équation différentielle suivante : [19]

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} * i_c \quad \text{II.87}$$

$$V_{dc} = \int \frac{dV_{dc}}{dt} + V_{dc}(t_0) \quad \text{II.88}$$

$V_{dc}(t_0)$  : La valeur initiale de la tension à l'instant  $t_0$

$i_c$  : Courant dans le condensateur

$V_{dc}$  : Tension du bus continu

$C$  : Valeur de la capacité

$i_1$  : Courant modulé par le convertisseur du côté de la machine.

$i_2$  : Courant modulé par le convertisseur du côté du réseau.

Dans le domaine de Laplace, l'équation précédente devient :

$$V_{dc} = \frac{1}{C.S} * i_c \quad \text{II.89}$$

Par conséquent, la boucle de régulation Vdc équipée du correcteur PI est représentée sur la figure (II.29) :

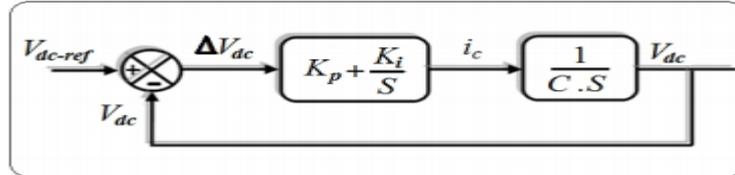


Figure (II.29): Boucle d'asservissement de la tension du bus continu.

Le calcul des paramètres du régulateur sera dérivé de FTBF Gcl:

$$G_{cl} = \frac{K_p*S + K_i}{C*S^2 + K_p*S + K_i} = \frac{K_i}{C*S^2 + K_p*S + K_i} + \frac{K_p*S}{C*S^2 + K_p*S + K_i} \approx \frac{K_i}{C*S^2 + K_p*S + K_i} \quad \text{II.90}$$

Pour  $t \gg$

$$\frac{K_p*S}{C*S^2 + K_p*S + K_i} = 0 \quad \text{II.91}$$

La réponse indicielle du second terme a tendance à s'annuler après le mode transitoire, car la décomposition partielle de ce polynôme est la somme de deux polynômes du premier ordre, qui s'annulent souvent avec une constante de temps égale à la valeur du pôle (doit être négative)  $\ll \tau_i = P_i \gg$

$$\frac{A*S}{C*S^2 + K_p*S + K_i} = \frac{A_1}{S + P_1} + \frac{A_2}{S + P_2} \quad \text{II.92}$$

Le calcul des paramètres du régulateur sera effectué en comparant le FTBF avec le FTBF de second ordre sans zéro.

### II.14.2 Injection de la puissance au réseau :

L'onduleur de tension triphasé aide à l'injection de l'énergie électromagnétique extraite du vent et garantit la phase d'injection à travers les deux tâches suivantes:

- Maintenir la tension du bus continu constante en surveillant en permanence la puissance fournie par l'onduleur de tension à l'alimentation.
- Vérifiez l'interrupteur statique pour injecter la puissance de référence (en soustrayant la puissance électromagnétique du condensateur) dans le réseau, le facteur de puissance est proche de 1.

Par conséquent, sans tenir compte des pertes dans le stator GSAP et le redresseur MLI1, la puissance à l'entrée du bus continu est égale à la puissance électromagnétique au niveau de l'entrefer GSAP. La puissance de référence injectée dans le réseau est calculée en soustrayant la puissance électromagnétique de la puissance électromagnétique du condensateur:

$$P_g = P_{ref} P_{em} - P_{dc} C_{em} * \Omega - V_{dc} * i_{moy-ref} \quad \text{II.93}$$

La puissance injectée est le produit du courant et de la tension. Du fait que la tension est appliquée par le réseau, le droit de commande de la puissance électromagnétique se résume au droit de commande du courant injecté dans le réseau.

Les puissances active et réactive dans le repère de Park sont données par [20], [21], [22] :

$$\begin{cases} P_{ref} = V_{g-d} * I_{d-ref} + V_{g-q} * I_{q-ref} \\ Q_{ref} = V_{g-q} * I_{d-ref} + V_{g-d} * I_{q-ref} \end{cases} \quad \text{II.94}$$

Lors de l'inversion de ces relations, il est alors possible d'imposer des références pour la puissance active et la puissance réactive en imposant les courants de références suivants:

$$\begin{cases} I_{d-ref} = \frac{P_{ref} * V_{g-d} + Q_{ref} * V_{g-q}}{V_{g-d}^2 + V_{g-q}^2} \\ I_{q-ref} = \frac{P_{ref} * V_{g-q} - Q_{ref} * V_{g-d}}{V_{g-d}^2 + V_{g-q}^2} \end{cases} \quad \text{II.95}$$

En injectant de la puissance électromagnétique uniquement sous forme de puissance active, les courants de référence seront:

$$Q=0 \quad \rightarrow \quad \begin{cases} I_{d-ref} = \frac{P_{ref} * V_{g-d}}{V_{g-d}^2 + V_{g-q}^2} \\ I_{q-ref} = \frac{P_{ref} * V_{g-q}}{V_{g-d}^2 + V_{g-q}^2} \end{cases} \quad \text{II.96}$$

En transformant les courants de référence :  $I_{d-ref}$  et  $I_{q-ref}$  au courants réels  $I_{a-ref}$ ,  $I_{b-ref}$ ,  $I_{c-ref}$  par la transformation inverse de Park, nous aboutirons à générer les signaux de commande de l'onduleur de tension par la commande MLI2. Le schéma suivant illustre la commande du système global d'injection.

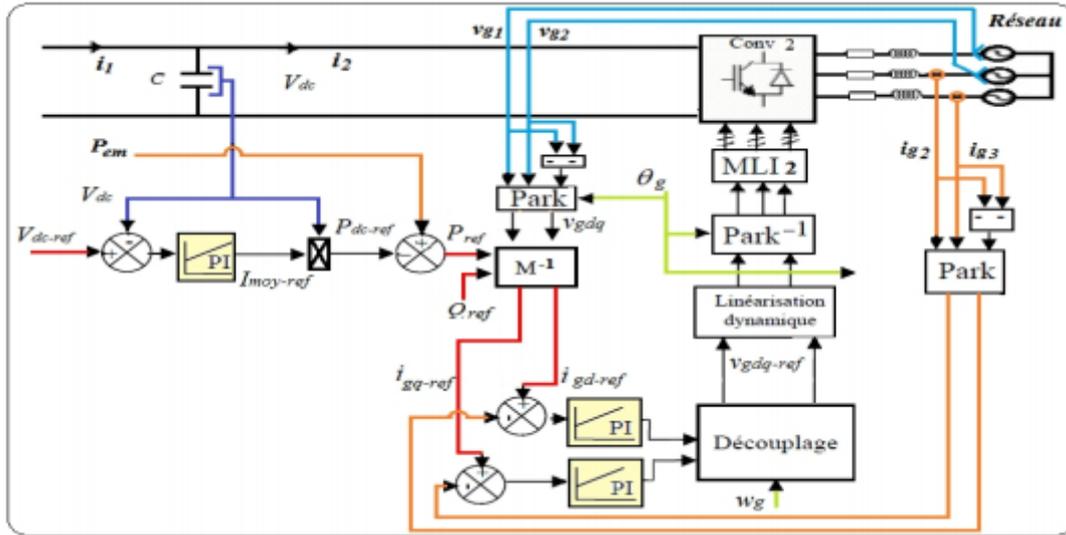


Figure (II.30) : Schéma bloc de commande du processus d'injection

La valeur de tension du bus continu, du condensateur (condensateur du bus continu) et de l'inductance de couplage doit être soigneusement sélectionnée.

### II.14.3 Modélisation du filtre :

#### II.14.3.1 Modélisation du filtre dans le repère naturel :

Il s'agit d'un filtre passif en série ( $R_f$ ,  $L_f$ ), connecté entre le convertisseur de puissance et le réseau (Figure II.31) pour réduire la propagation des harmoniques dans l'alimentation.

[23]

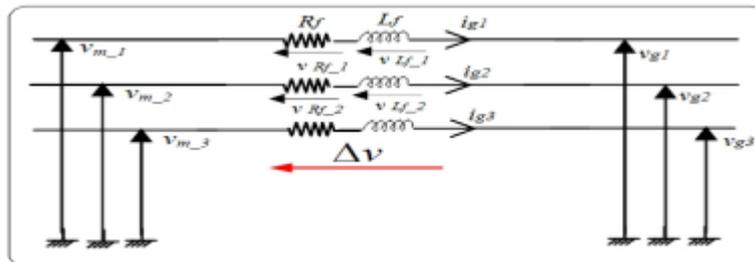


Figure (II.31) : Schéma électrique du filtre

Les courants traversant le filtre est obtenu en intégrant la tension aux bornes de la bobine:

$$\begin{aligned} i_{g1} &= \int_L^1 v_{L-1} + i_{g1}(t_0) \\ i_{g2} &= \int_L^1 v_{L-2} + i_{g2}(t_0) \end{aligned} \quad \text{II.97}$$

$i_{g1}(t_0)$ ,  $i_{g2}(t_0)$  sont respectivement les courants  $i_{g1}$  et  $i_{g2}$  à l'instant initial. Le courant dans la troisième phase est déduit à partir des deux premiers :

$$i_{g3} = -(i_{g1} + i_{g2}) \quad \text{II.98}$$

Les tensions aux bornes des résistances sont données par :

$$\begin{aligned} v_{R1} &= R_f \cdot i_{g1} \\ v_{R2} &= R_f \cdot i_{g2} \end{aligned} \quad \text{II.99}$$

Les tensions aux bornes des inductances sont données par :

$$\begin{aligned} v_{L1} &= \Delta v_1 - v_{R1} \\ v_{L2} &= \Delta v_2 - v_{R2} \end{aligned} \quad \text{II.100}$$

Les tensions aux bornes des bobines peuvent se donner en appliquant la loi des mailles:

$$\begin{aligned} \Delta v_1 &= v_{m-1} - v_{g1} \\ \Delta v_2 &= v_{m-2} - v_{g2} \end{aligned} \quad \text{II.101}$$

Avec :  $v_{m-1}$ ,  $v_{g1}$ : respectivement tension de coté moteur et coté réseau.

### II.14.3.2 Modélisation du filtre dans le repère de Park :

L'équation différentielle qui définit le filtre peut être obtenue en regroupant les équations précédentes:

$$\begin{bmatrix} v_{m-1} \\ v_{m-2} \\ v_{m-3} \end{bmatrix} = R_f \begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{g1} \\ i_{g2} \\ i_{g3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{g1} \\ v_{g2} \\ v_{g3} \end{bmatrix} \quad \text{II.102}$$

L'application de la transformation de Park sur le système d'équations (II.102) nous donne [24]:

$$\begin{cases} v_{md} = R_f * i_{gd} + L_f \frac{di_{gd}}{dt} - L_f \cdot \omega_s \cdot i_{gq} + v_{gd} \\ v_{mq} = R_f * i_{gq} + L_f \frac{di_{gq}}{dt} + L_f \cdot \omega_s \cdot i_{gd} + v_{gq} \end{cases} \quad \text{II.103}$$

$e_d$  et  $e_q$  sont les tensions de couplage et sont données par :

$$\begin{cases} e_d = L_f \cdot \omega_s \cdot i_{gd} \\ e_q = -L_f \cdot \omega_s \cdot i_{gq} \end{cases} \quad \text{II.104}$$

La figure (II.32) résume le schéma général de l'ensemble de la commande de la chaîne éolienne.

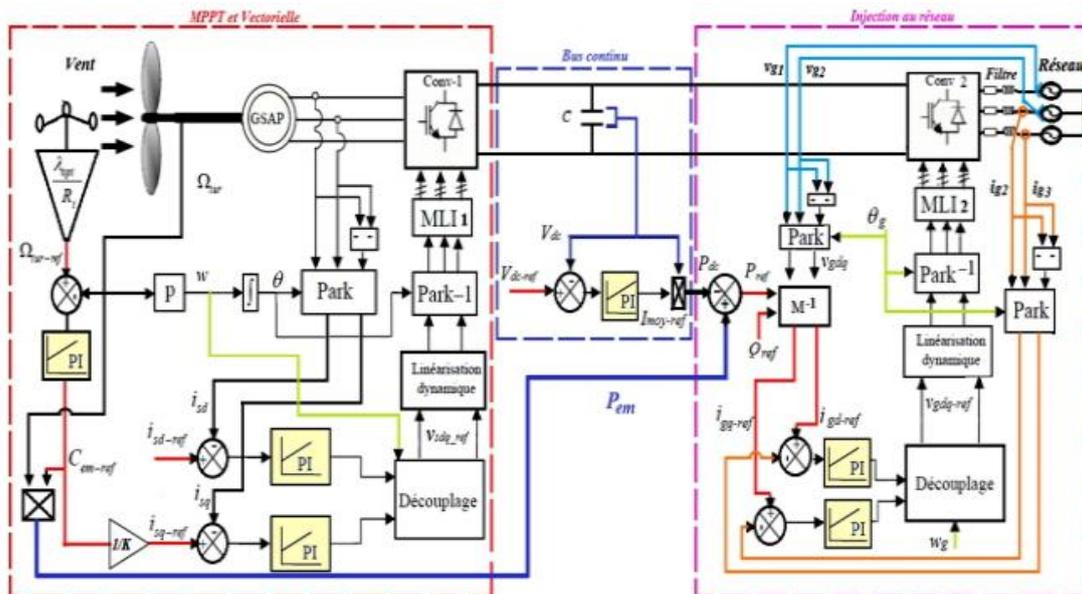


Figure (II.32) : Schéma global de la commande de l'aérogénérateur à base du GSAP. [18]

Il y a deux parties principales, le côté redresseur assure le contrôle vectoriel et le côté onduleur régule le bus continu et assure l'injection de puissance active (facteur unitaire).

## **II.15 Conclusion :**

Dans ce chapitre une modélisation de la turbine éolienne est effectuée avec une description de ces différentes zones de fonctionnement, principalement les zones de maximisation et de limitation de la puissance captée par la turbine.

Ensuite, on a présenté la modélisation de la chaîne de conversion éolienne sous forme d'équations mathématiques.

Enfin nous avons fait une description de la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents et l'injection du système au réseau.

## Références :

- [1] B.Sabri «Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone/asynchrone », mémoire de master ,ESSA Tlemcen ,(2019)
- [2] <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89olienne>
- [3] F.Mazouz et M.Korichi « modélisation et commande d'un aérogénérateur à aimant permanent », mémoire de master, Université A.MIRA-BEJAIA, (2018/2019)
- [4] <https://eolienne.f4jr.org>; 30/03/2020
- [5] Mayouf Mesaoud, Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent », thèse de magister de l'université de Batna,( 13-02-2008).
- [6] Hamecha samira «Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent», Thèse de Magister, université de Tizi ouzou, (2013).
- [7] A. MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de L'institut national polytechnique de Toulouse ( 5 avril 2005)
- [8] T. GHENNAM, Thèse de Doctorat, «Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation», Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, (2012).
- [9] N.BOUKHARI et L.STITI Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE « Commande d'un redresseur triphasé à MLI », Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, (2014)
- [10] B.SABRI « Modélisation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base d'une génératrice synchrone/asynchrone» , mémoire d'ingénieur, ESSA Tlemcen, (2019)
- [11] M.addour, « étude et maximisation d'un système éolien » mémoire de master, université Abderahmane-Mira Bejaia, (2013)
- [12] A.TABTI et Z.AHMEDI« Commande et modélisation d'une éolienne à base d'une MSAP couplé au réseau », mémoire de master, université de Bejaia, (2013)
- [13] O.TOUNSI et Z.LASAKRI« Etude et commande d'une turbine éolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation », mémoire de master, université BADJI MOKHTAR ANNABA, (2017/2018)
- [14] A.Kerboua, « cour machine électrique à courant continu », cours machine électrique, école supérieur en sciences appliquées-Tlemcen,(2019)

- [15] L.Allali, MEMOIRE DE FIN D'ETUDES en vue de l'obtention du DIPLOME DE MASTER, « Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents », UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI D'OUM EL BOUAGHI, (2016)
- [16] A.TEBBAL et M.SEKHRI , mémoire de MASTER « Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent » université Jijel, (2019)
- [17] G.Boukerche, MEMOIRE DE MASTER, « Etude et Synthèse d'un Contrôleur PI et Application », université BADJI MOKHTAR ANNABA, (2017)
- [18] A.Dahbi, « Étude des performances et commande d'une machine synchrone à aimants permanents utilisée dans les éoliennes », mémoire de magister, université Ferhet Abbas sétif ;(2012)
- [19] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed, H. Benalla ; « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation ». Revue des Energies Renouvelables, vol. 14 N°1, pp\_109 – 120, Laboratoire d'Electrotechnique de Constantine, (2011)
- [20] F. Poitiers ; « Etude Et Commande De Génératrices Asynchrones Pour L'utilisation De L'énergie Eolienne ». Thèse de doctorat, Université de NANTES, France, (2003)
- [21] S. M. DEHGHAN, M. MOHAMADIAN, A.Y. VARJANI, « A New Variable-Speed Wind Energy Conversion System Using Permanent-Magnet Synchronous Generator and Z-Source Inverter », IEEE transactions on energy conversion, vol. 24, no. 3, (2009)
- [22] X GUO, He. GUO, « Simulation and Control Strategy of a Micro-Turbine Generation System for Grid Connected and Islanding Operations », Energy Procedia, vol N°12, (2011).
- [23] D.H. Tran ; « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive » : Analyse de robustesse, validation expérimentale», Thèse de doctorat, L'Université de Toulouse, France, (2010)
- [24] A.BELAMRI « Simulation d'une turbine éolienne à axe horizontal», mémoire de master, UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, (2018)

# **Chapitre3 :**

## **Simulation et résultats**

### III.1 Introduction :

Ce chapitre concerne la simulation du système complet sur le plan électrique et énergétique de la chaîne de conversion éolienne

A l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schéma bloc.

### III.2 Profil du vent :

En considérant un profil du vent moyen autour de (8.2 m/s). La mise en application du modèle MATLAB/Simulink est représentée par l'équation suivante :

$$V(t) = 8.2 + 2 * \sin wt - 1.75 * \sin 3wt + 1.5 \sin 5wt - 1.25 * \sin 10wt + \sin 30wt + 0.5 \sin 50wt + 0.25 \sin 100wt$$

La figure (III.1) montre le profil de vent qui reflète un vent réel considéré pour la simulation de la turbine avec asservissement de vitesse.

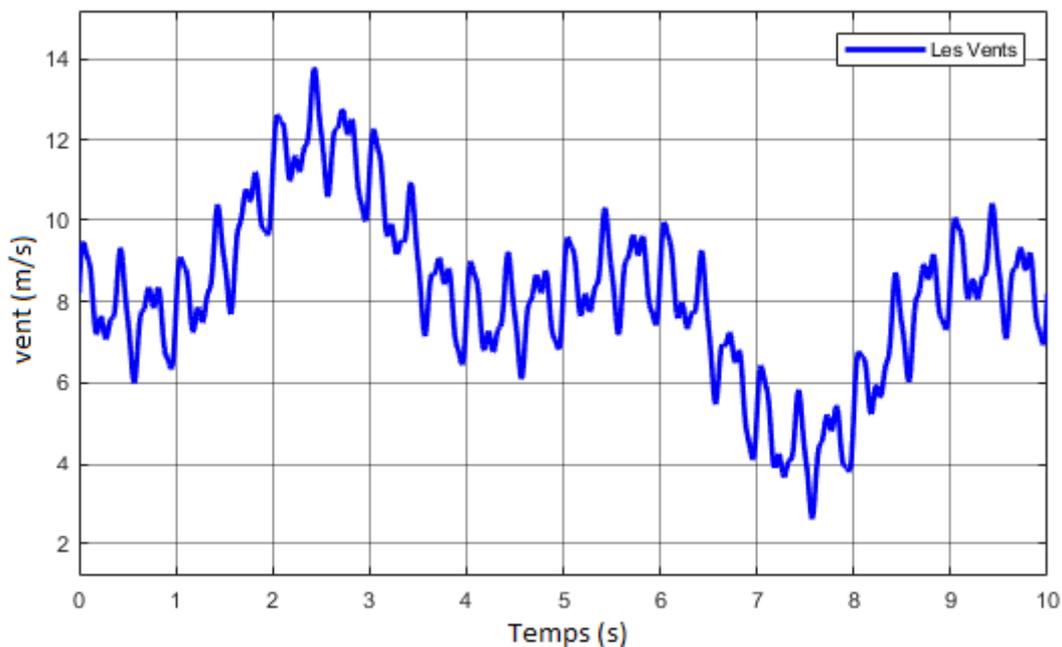


Figure (III.1) : Profil du vent

### III.3. Caractéristique de la turbine éolienne :

La figure (III.2) présente le coefficient de puissance en fonction du ratio de la vitesse. Elle est la superposition de plusieurs courbes. Nous nous sommes intéressés à celles possédant le plus haut sommet ( $\beta=0$ ). En fait, cette courbe a comme vitesse spécifique optimale 8.1 qui correspond à un coefficient de puissance maximale égale à 0.48. Ce point indique qu'on a récupéré un maximum de puissance mécanique et que l'augmentation de l'angle de calage permet de réduire le coefficient de puissance ce qui impose la diminution de la puissance mécanique récupéré.

Quant à la figure (III.3), elle présente la puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation. Nous avons remarqué que pour une vitesse mécanique de vent  $v_1$  et une vitesse de la génératrice, on obtient une puissance  $P_1$ , si cette vitesse de vent varie et la vitesse de la génératrice reste fixe on peut dire que c'est le cas d'une éolienne à vitesse fixe, la deuxième puissance est dans la deuxième courbe caractéristique et ainsi de suite. Si la puissance maximale doit être extraite, la vitesse de la génératrice doit être réglée sur une vitesse supérieure.

D'après la figure (III.4) ; la puissance en fonction de la vitesse mécanique ; on a remarqué que chaque courbe correspond à une vitesse de vent, chaque sommet de ces caractéristiques représente un point optimale recherché ce qui définit une courbe dite de puissance optimale.

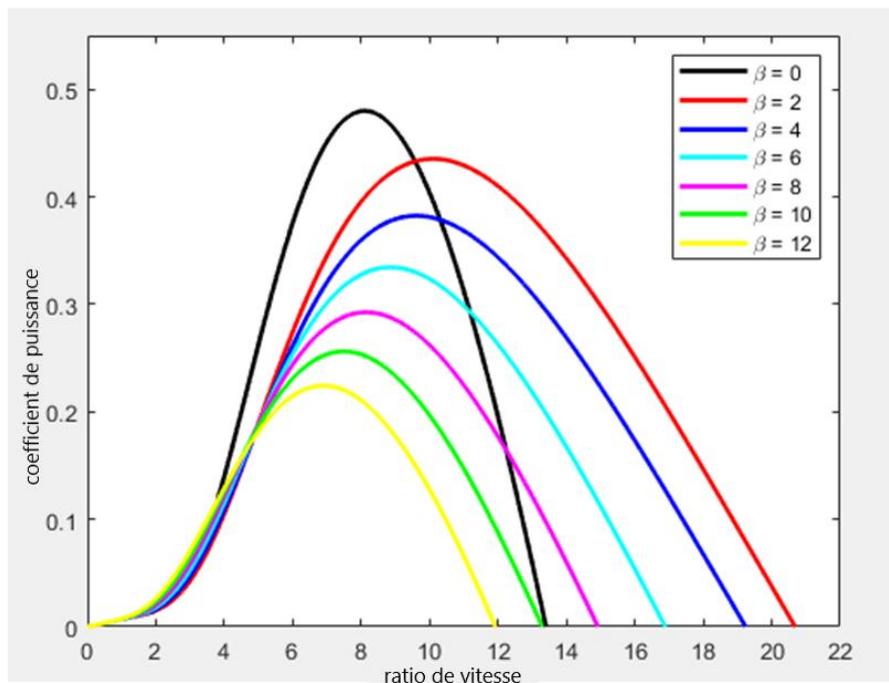


Figure (III.2) : Coefficient de puissance en fonction du ratio de la vitesse.

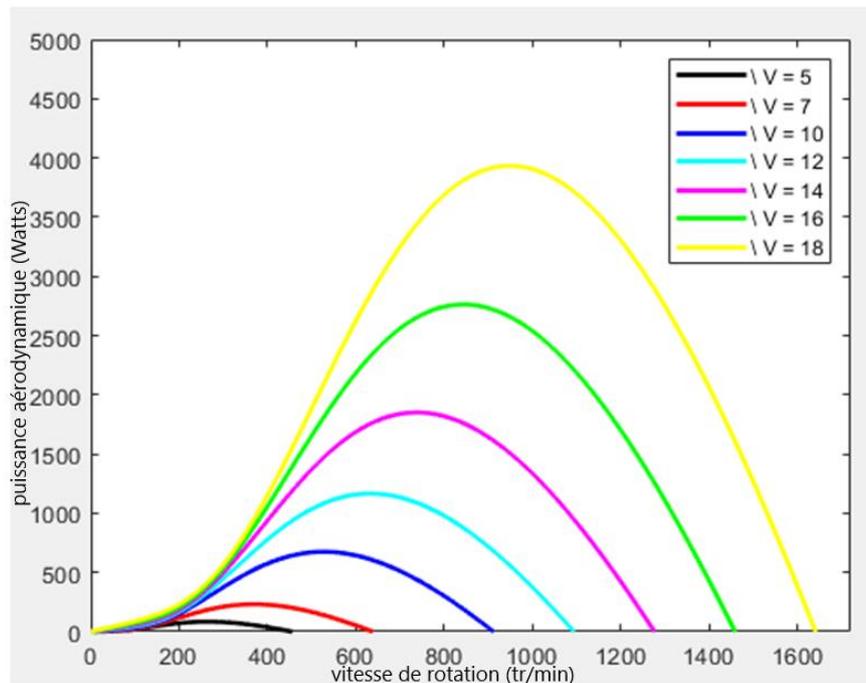


Figure (III.3) : Puissance aérodynamique en fonction de la vitesse de rotation.

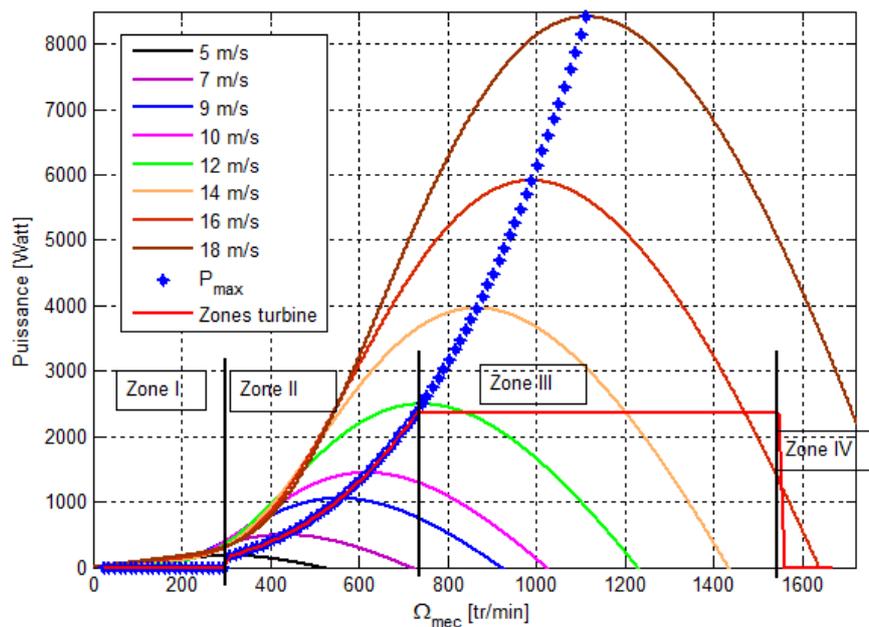


Figure (III.4) : Puissance en fonction de la vitesse mécanique.

Un bon fonctionnement nécessite un bon suivi de cette courbe. Pour s'approcher de ce but une commande spécifique connue sous la terminologie : Maximum Power Point Tracking (MPPT) qui correspond à la deuxième zone est étudiée. Cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique.

### III.4. Maximisation de puissance de la turbine avec asservissement de vitesse :

On a réalisé le modèle mathématique de la turbine (avec MPPT) avec une vitesse variable sous l'environnement Matlab/simulink :

#### III.4.1. Résultats de simulations :

Les figures suivantes montrent les résultats de simulation avec asservissement de vitesse.

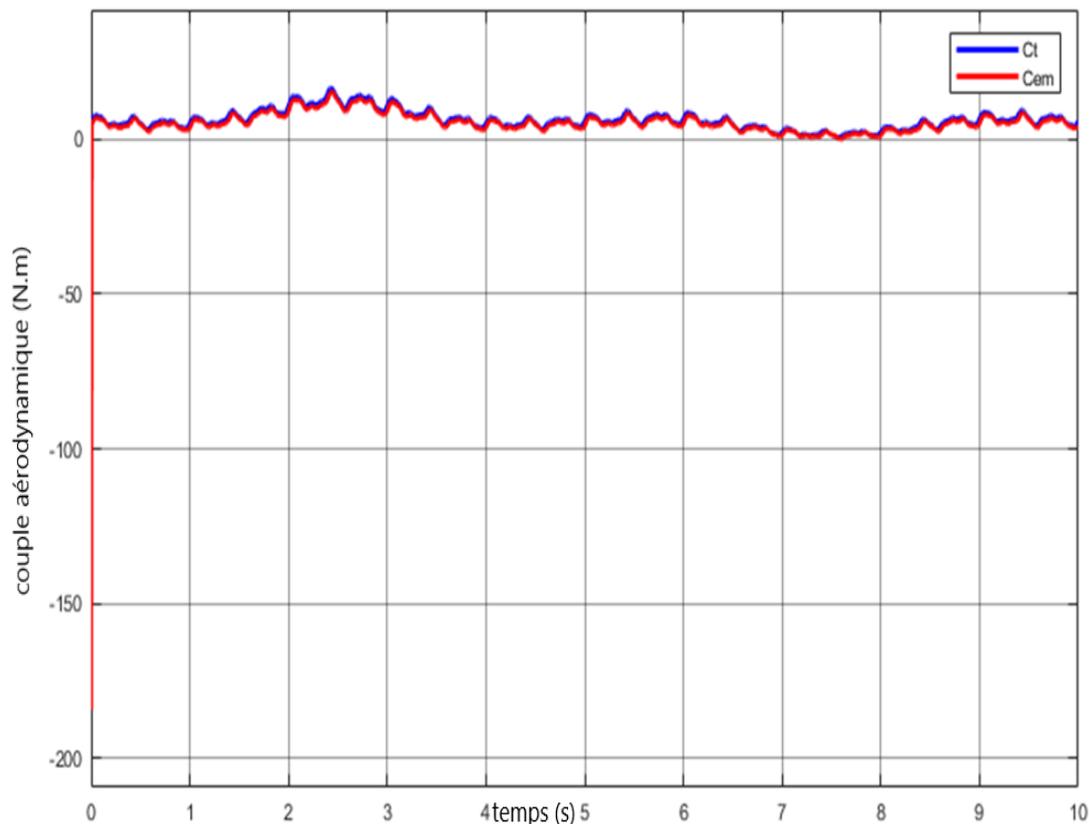


Figure (III.5): Couple aérodynamique

Au démarrage, l'allure du couple aérodynamique accroit, puis elle se met à osciller autour de la valeur ( $C_{aer} = 15$  N.m). Cela est dû aux perturbations créées par le profil du vent sur le couple aérodynamique ce qui a produit des vibrations sur le système.

La figure (III.6) représente la puissance aérodynamique de la turbine.

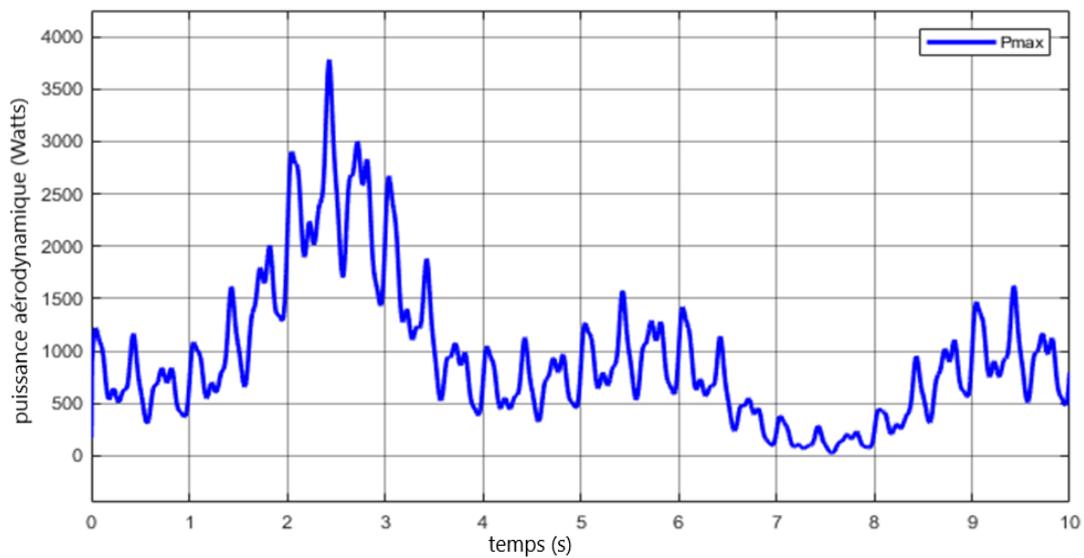


Figure (III.6) : Puissance aérodynamique.

Pendant le temps de démarrage, l'allure de la puissance aérodynamique augmente, puis elle se met à osciller autour de la valeur ( $P_{aer} = 1500 \text{ W}$ ). Cela est dû aux perturbations créées par le profil du vent sur la puissance aérodynamique, ce qui change la qualité d'énergie issue plus tard de la génératrice.

La figure (III.7) représente le coefficient de puissance

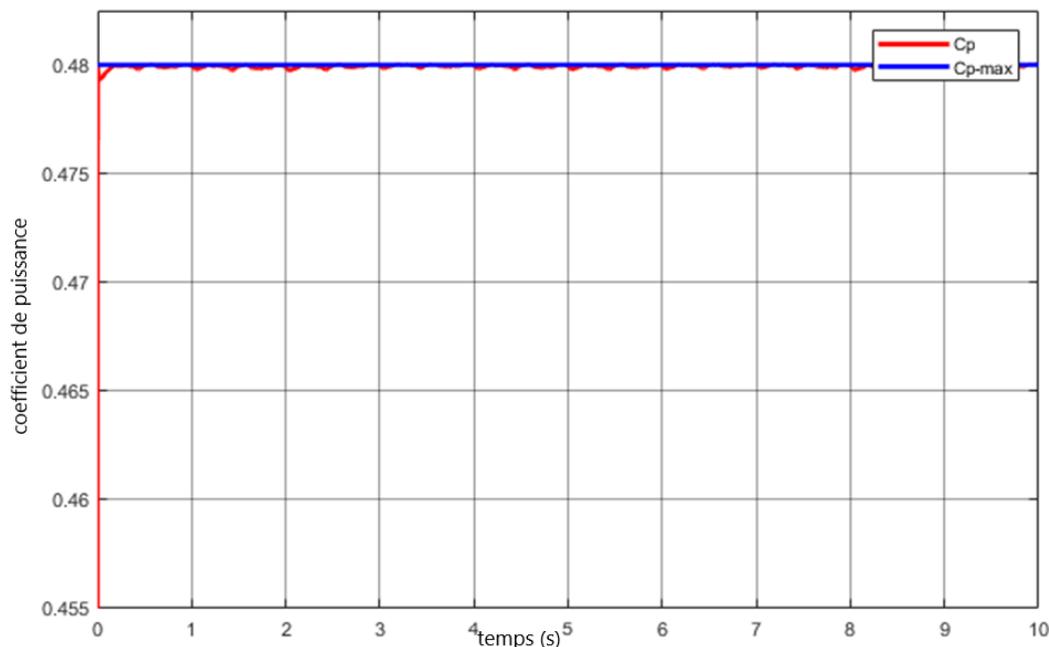


Figure (III.7) : Coefficient de puissance.

Au démarrage, l'allure du coefficient de puissance est sous forme croissante, puis il se stabilise à la valeur ( $C_p = 0.48$ ) et à partir de ça, on peut conclure que la turbine récupère 48% de la puissance du vent.

D'après la figure (III.8) qui représente la vitesse spécifique, nous avons remarqué que l'allure de la vitesse relative suit la référence ( $\lambda_{opt} = 8.152$  d'après la figure (III.2) pour un coefficient de puissance 0.48 on aura une vitesse spécifique égale à 8.152 posé comme référence), avec un léger dépassement au régime transitoire.

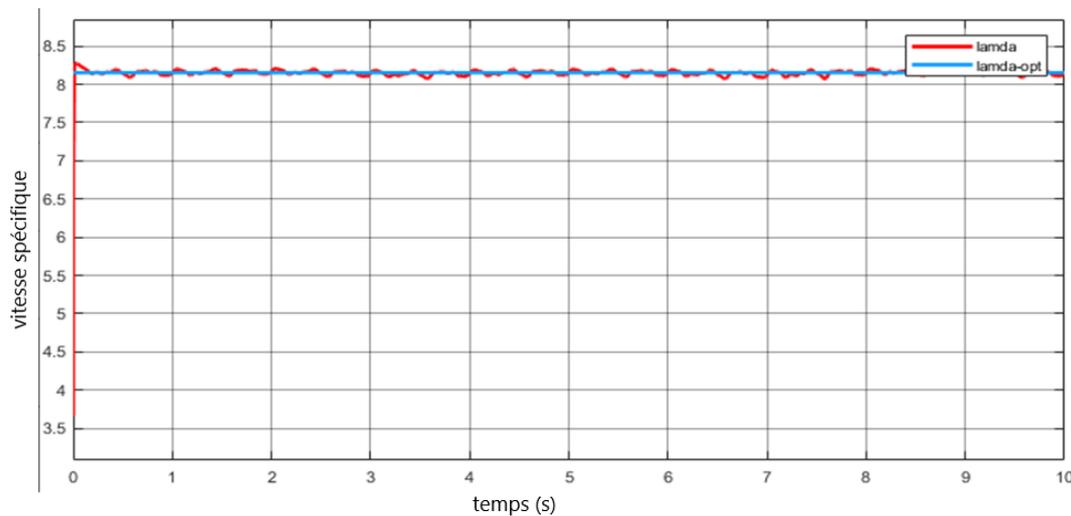


Figure (III.8) : Vitesse spécifique

La figure (III.9) représente la vitesse de rotation mécanique et vitesse de référence.

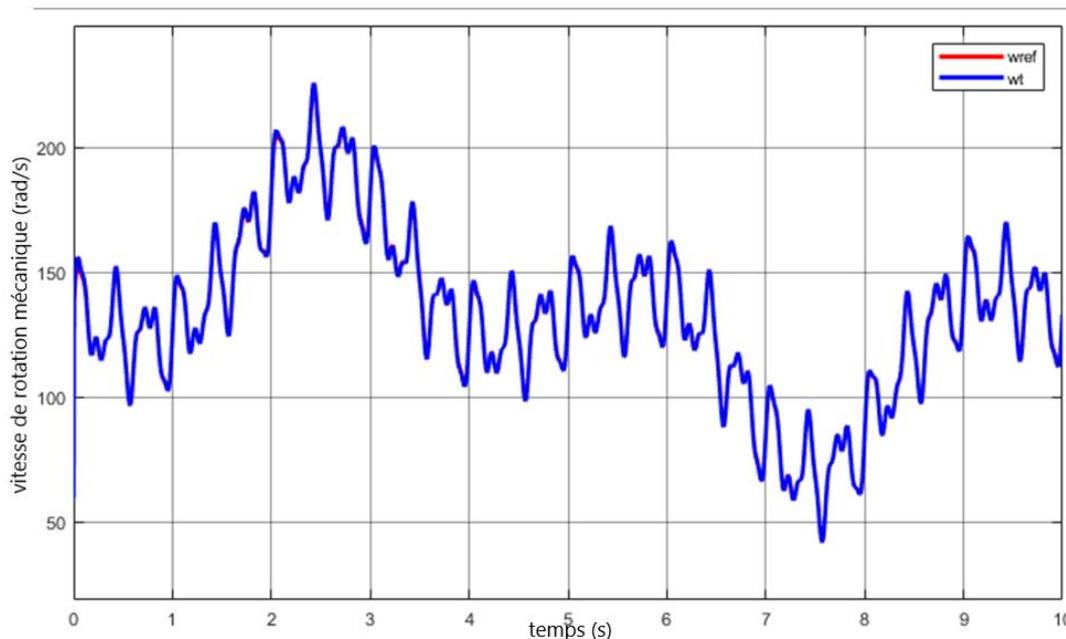


Figure (III.9) : Vitesse de rotation mécanique et vitesse de référence.

On a remarqué que pendant le démarrage, la vitesse de rotation mécanique prend une forme croissante, puis au régime permanent elle se met à osciller autour de la valeur (125

tr/min), elle suit sa référence ce qui montre clairement la perturbation créée par le vent sur la vitesse de rotation, ce qui altère la fréquence de la tension et du courant produite par la génératrice.

On remarque aussi qu'elle suit sa référence avec un dépassement légère au régime transitoire.

### III.5. Simulation de la chaine globale :

#### III.5.1. Simulation de la chaine globale sans commande vectorielle :

Nous avons également effectué la simulation de la chaine éolienne constitué de (turbine éolienne+ MPPT, génératrice, convertisseur coté machine, convertisseur coté réseau).

Le profil de vent est représenté sur la figure (III.10).

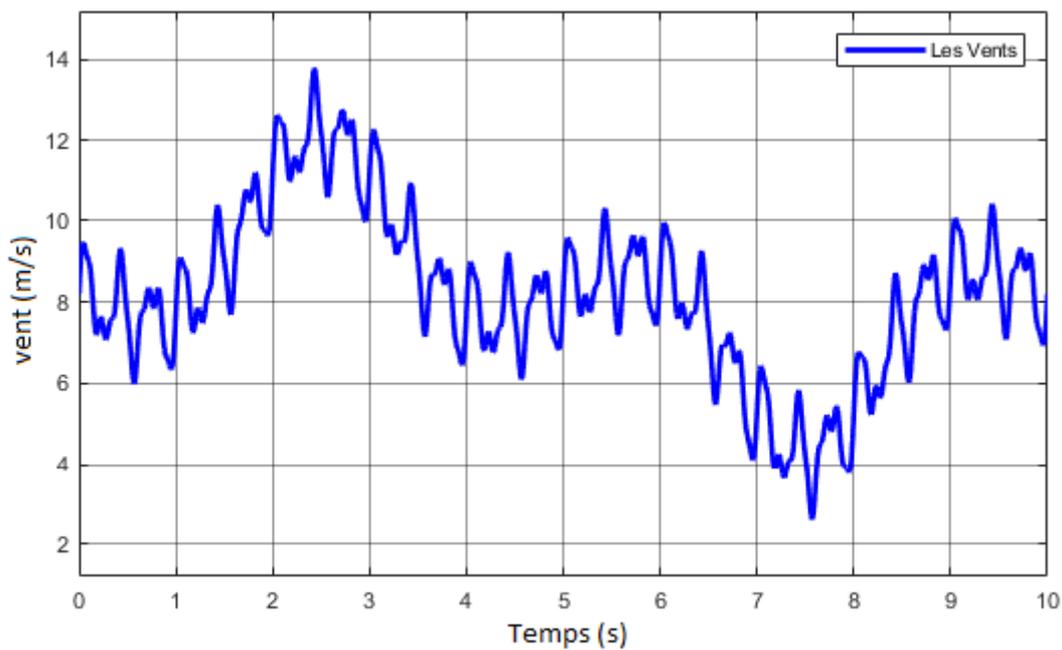


Figure (III.10) : Profil de vent.

Le profil de vent varie de 8 m/s à 14 m/s à l'instant 2.5 s, puis il diminue à la valeur de 3 m/s dans un intervalle de temps de [2.5s à 7.5s]. Il augmente une autre fois pour atteindre une valeur de 10 m/s à l'instant 10s ce qui prouve que c'est un vent aléatoire.

La figure du coefficient de puissance à sa valeur maximale (figure III.11) montre que le coefficient de puissance est ajusté à sa valeur maximale malgré que la vitesse de vent varie. Ce qui prouve que la puissance captée par le vent est maximale.

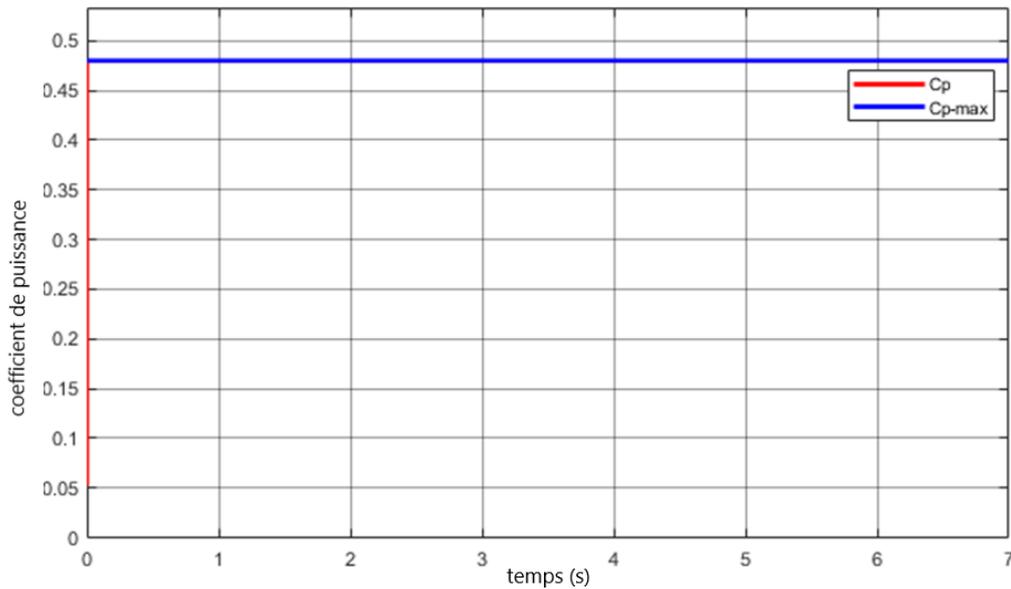


Figure (III.11) : Coefficient de puissance à sa valeur maximale.

On a constaté d'après La figure (III.12) montrant la vitesse de rotation et la vitesse de rotation optimale, que la vitesse de rotation est analogue à la vitesse optimale de référence, la vitesse de la génératrice synchrone à aimants permanents subit les différentes variations du vent car il n'y a pas de bobinage au niveau du rotor. Ce qui lui rend plus efficace.

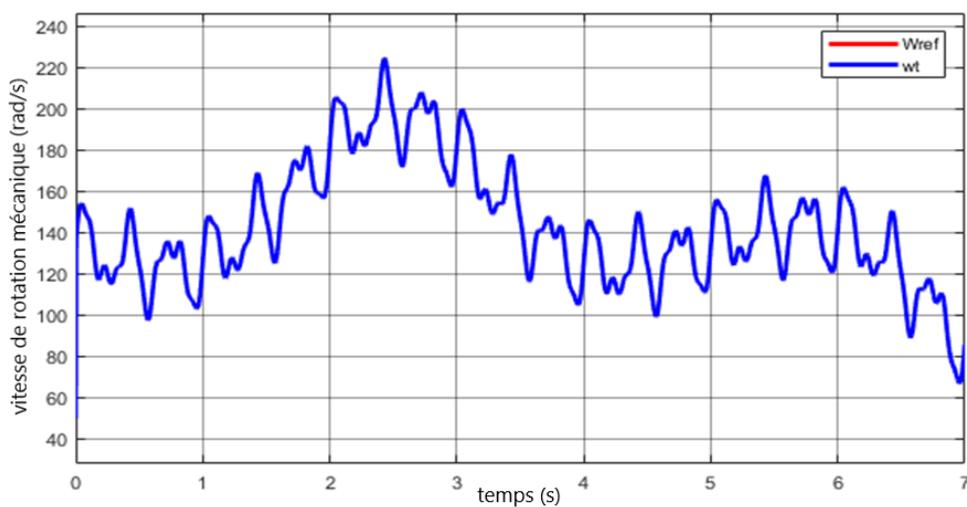


Figure (III.12) : Vitesse de rotation et vitesse de rotation optimale.

D'après la figure (III.13) : la vitesse spécifique et la vitesse spécifique optimale) on a observé que la vitesse spécifique est identique à la vitesse spécifique optimale.

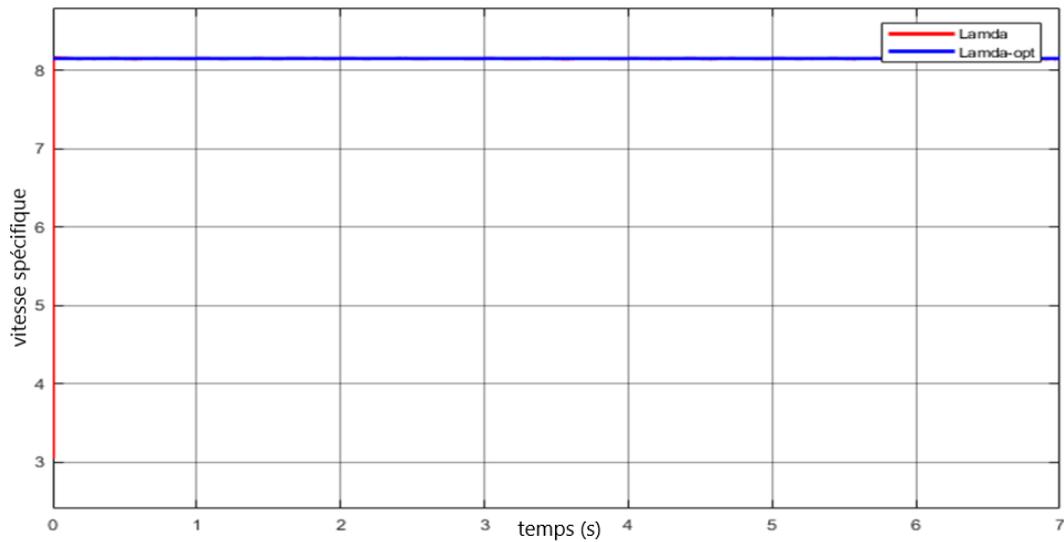


Figure (III.13) : Vitesse spécifique et vitesse spécifique optimale.

Selon la figure (III.14) qui représente les tensions statoriques générées par la génératrice synchrone à aimants permanents, on a remarqué que les tensions statoriques générées par la GSAP ont une forme sinusoïdale et elles sont adaptées à la variation de la vitesse du vent. Donc, le vent influence sur l'amplitude et la fréquence des tensions des phases.

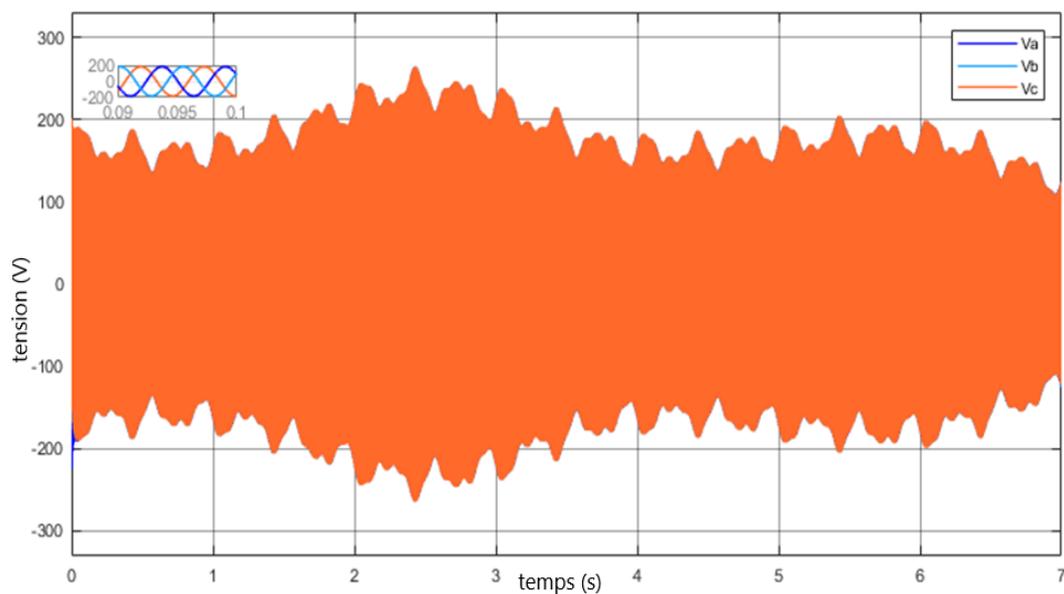


Figure (III.14) : Tensions statoriques  $V_{abc}$

La figure suivante présente les courants statoriques  $I_{abc}$ . Le courant a une forme sinusoïdale. Sa valeur est comprise entre -5 et 5 Ampère ces résultats sont bien entendu influés par la vitesse de vent.

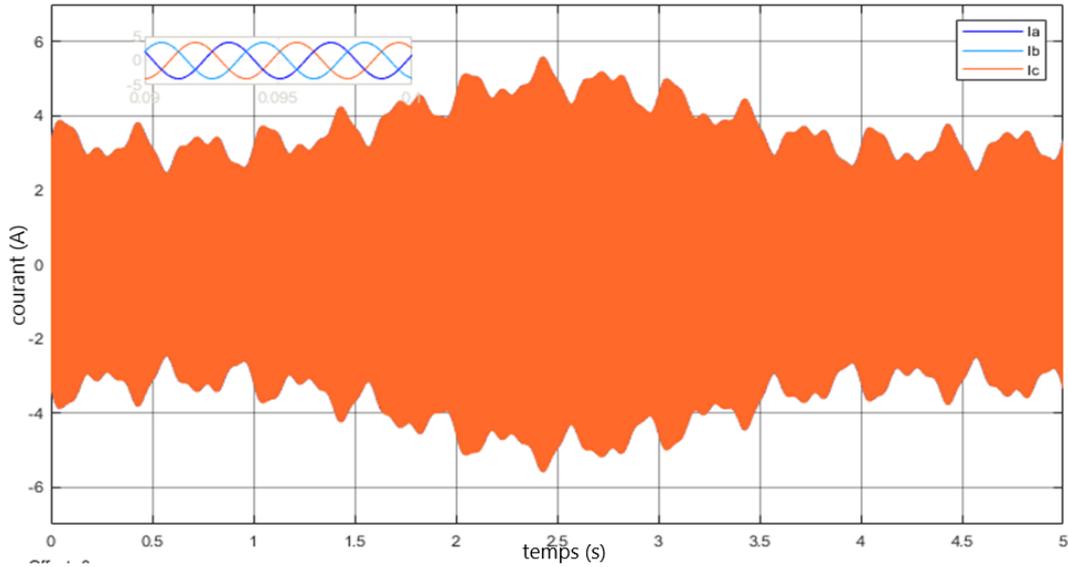


Figure (III.15) : Courants statoriques  $I_{abc}$ .

Les figures (III.16), (III.17) représentent la tension redressée et la tension filtrée.

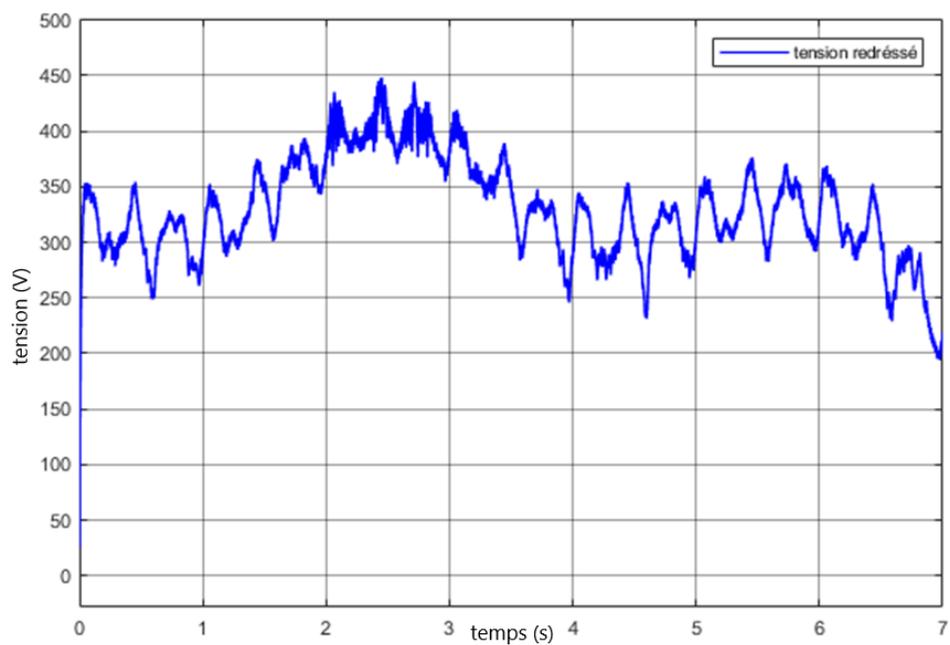


Figure (III.16) : Tension redressée.

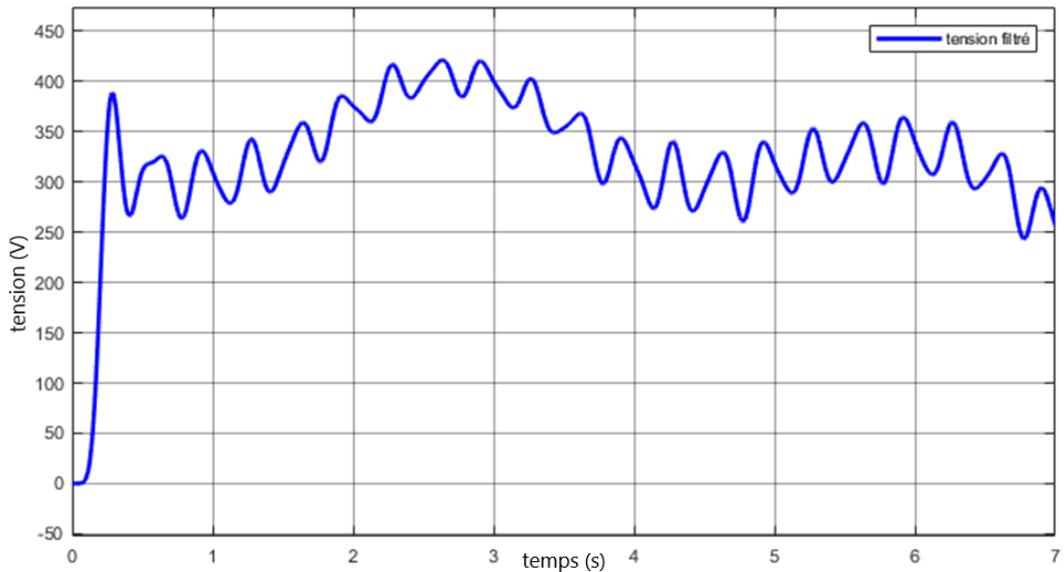


Figure (III.17) : Tension filtré.

On a remarqué qu'après l'application du filtre passe bas, les ondulations présentes au niveau de la tension redressée deviennent bien filtrées car le filtre passe bas laisse passer les basses fréquences et atténue les hautes fréquences, c'est-à-dire les fréquences supérieures à la fréquence de coupure.

En simulant également, les tensions ondulées à la sortie de l'onduleur (La figure (III.18), on a constaté que l'onduleur délivre une tension MLI d'amplitude variable. La conclusion est donc, ces tensions sont en fonction de la variation du vent.

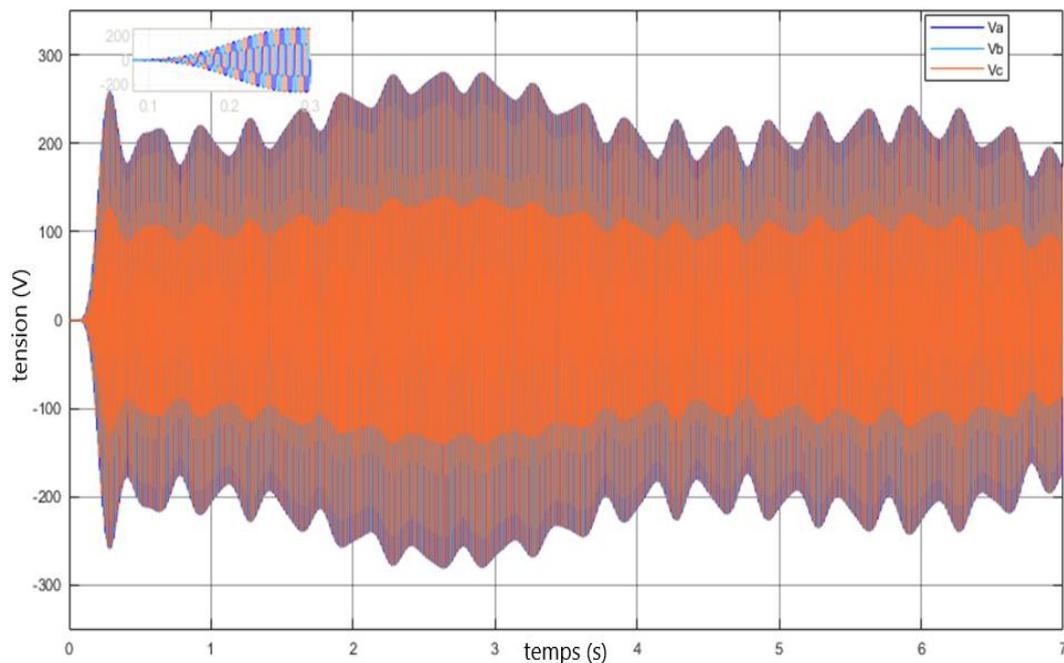


Figure (III.18) : Tensions ondulées.

### III.5.2. Simulation de la chaine globale avec commande vectorielle :

Notre travail a consisté aussi à effectuer la simulation du système globale avec commande vectorielle.

Les figures (III.19), (III.20), (III.21), (III.22), représentent respectivement les tensions générées par la GSAP, les courants de la GSAP, le courant direct avec sa référence et le courant quadratique avec sa référence.

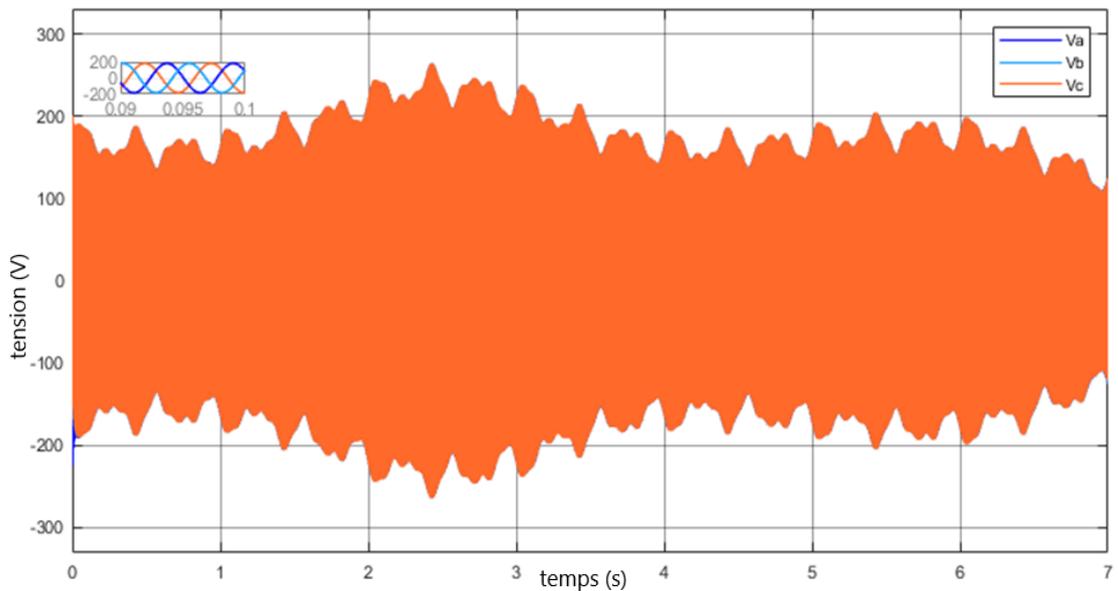


Figure (III.19) : Tensions statoriques  $V_{abc}$ .

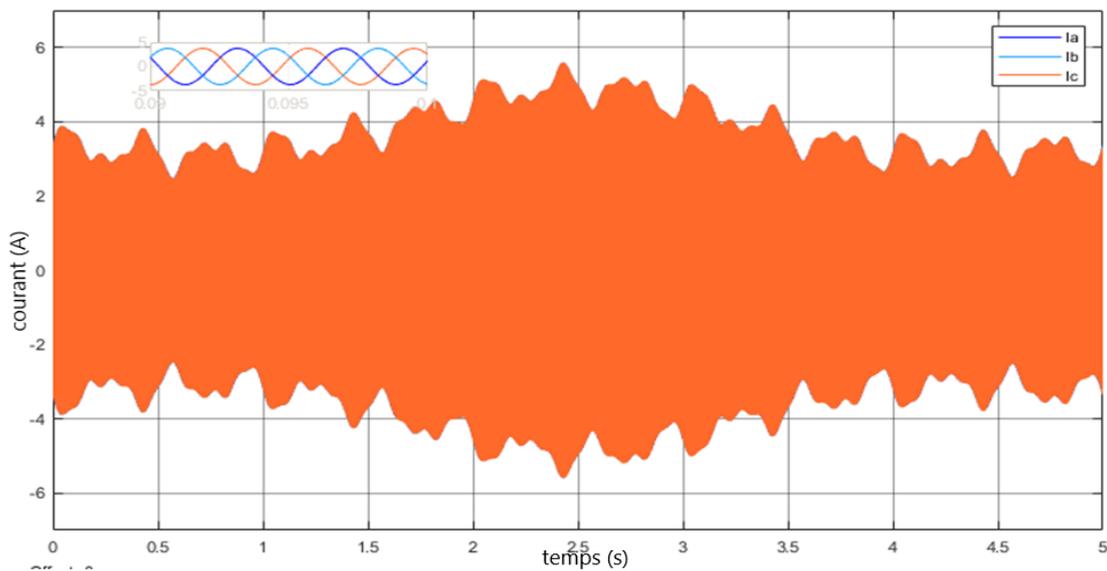


Figure (III.20) : Courants statoriques  $I_{abc}$ .

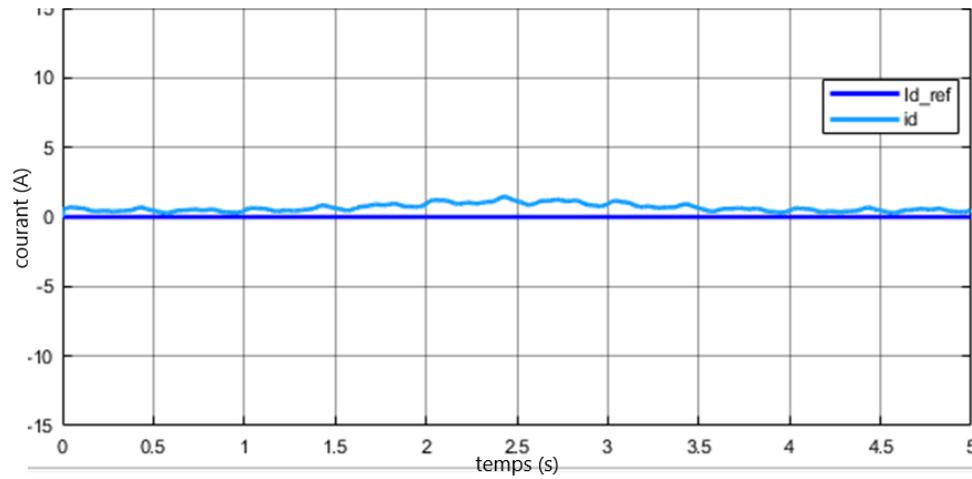


Figure (III.21) : Courant direct et sa référence.

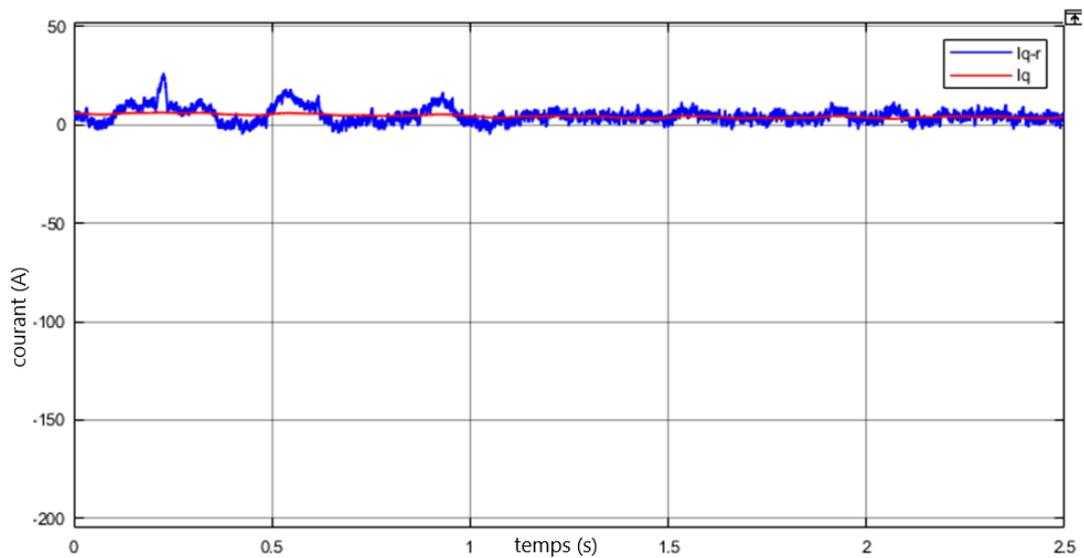


Figure (III.22) : Courant quadratique et sa référence.

D'après ces figures, on a remarqué que le courant généré par la GSAP a diminué et les courants Id et Iq sont trouvés découplés et suivent leur référence donc on peut dire qu'on a un bon fonctionnement de la commande vectorielle.

La figure (III.23) représente la tension à la sortie du redresseur (la tension redressée) et la valeur de la tension de référence (qui est égale à 310V). Ainsi l'allure de la tension redressée reprend la valeur de la tension de référence après les perturbations du vent grâce à la commande appliquée sur l'onduleur. La tension du redresseur est établie à (310V). Le temps de réponse dépend de la commande du redresseur et le niveau de perturbation.

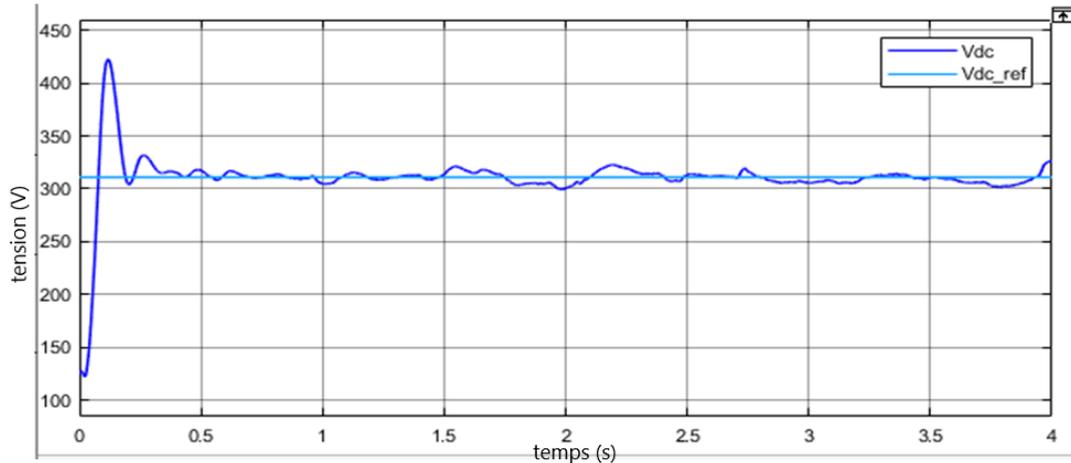


Figure (III.23) : Tension du bus continu.

La figure (III.24) représente les tensions et les courants injectés au réseau.

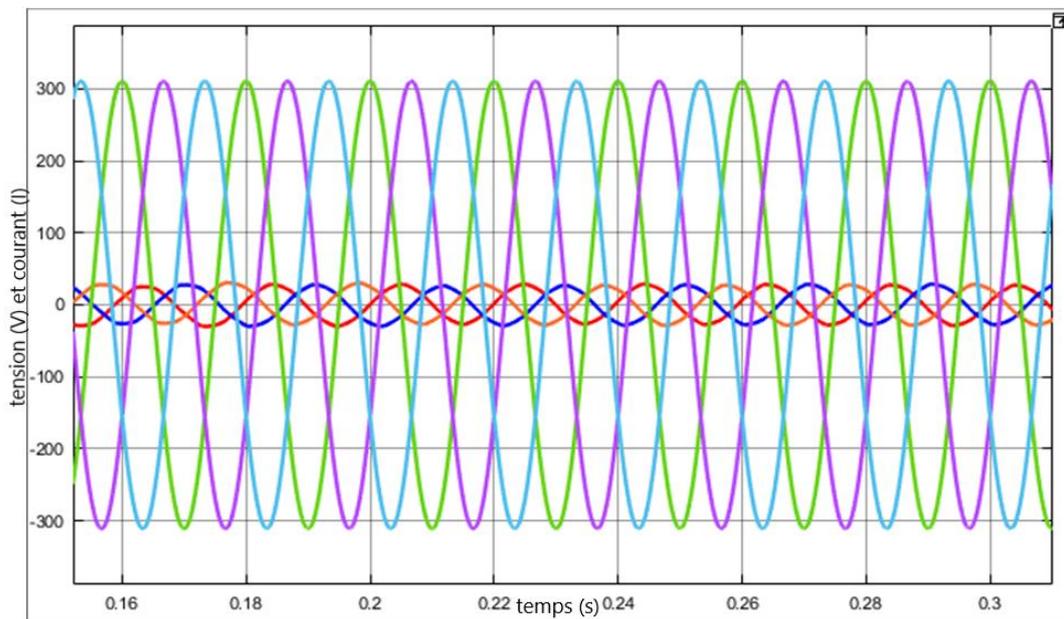


Figure (III.24) : Tensions de réseau et courants injectés au réseau.

La figure (III.24) représente les trois courants et tensions injectés au réseau, on constate que ces courants et tensions sont sinusoïdaux grâce à la commande de l'onduleur MLI2, avec une amplitude proportionnelle à la vitesse du vent, et une fréquence constante et adéquate à la fréquence du réseau 50Hz.

### **III.6. Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques de la turbine éolienne et le fonctionnement avec une puissance maximale à l'aide de la commande MPPT. Ce qui permet d'extraire un maximum de puissance. Ensuite, nous avons effectué des essais sur le fonctionnement de la génératrice synchrone à aimants permanents pour voir son comportement à vide et en charge. Par la suite, nous avons présenté la simulation du système globale sans commande vectorielle et avec commande vectorielle. Cette dernière permet de régler la tension du bus continu à la sortie du redresseur qui garantit une tension constante et stable quelques soit les perturbations créés par le vent.

## Conclusion générale

L'objectif de notre travail intitulé « modélisation et contrôle des aérogénérateurs connectés au réseau » était d'effectuer la modélisation et la commande d'une chaîne éolienne dédiée pour la production d'énergie électrique. Pour cela, on a réalisé une simulation d'une chaîne de conversion éolienne composée d'une turbine de grande puissance (2500 watts) connecté à une génératrice synchrone à aimant permanent. Cet ensemble de conversion d'énergie éolienne est équipé d'un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau ou la charge à alimenter.

Le premier chapitre concernait une brève description sur les systèmes éoliens. Les différents types d'éoliennes existant avec leurs différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal avec les diverses machines électriques utilisées dans cette conversion de d'énergie ont été également présentés. Notre choix s'est porté sur la machine synchrone à aimant permanent vu ses qualités de fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, on a modélisé la turbine éolienne. On a déduit les caractéristiques aérodynamiques principales de la turbine et les différentes zones de fonctionnement et on a présenté les stratégies de contrôle utilisées. la zone particulière où la maximisation de l'énergie extraite du vent a été détaillée.

La modélisation d'un système de génération d'énergie éolienne basé sur une machine synchrone à aimant permanent a été effectuée. On a établi les différentes équations de la machine électrique triphasé dans sa structure générale, avant d'arriver à un modèle définitif de la génératrice synchrone à aimant permanent.

Ensuite, nous avons étudié le redresseur MLI, sa structure, son fonctionnement, ainsi que sa commande MLI.

Le dernier chapitre a été réservé aux résultats de simulations de la chaîne de conversion éolienne. En effectuant la simulation du système globale sans commande vectorielle et avec commande vectorielle, nous avons conclu que le système avec commande vectorielle permet de régler la tension du bus continu à la sortie du redresseur qui garantit une tension constante et stable quelques soit les perturbations créés par le vent.

## Annexe :

- Paramètres de la turbine éolienne :

paramètre	symbole	valeur
<b>Rayon</b>	R	1.25 m
<b>Masse volumique de l'air</b>	$\rho$	1.2 kg/m <sup>3</sup>
<b>Gain de multiplication</b>	G	1
<b>L'inertie de la turbine</b>	J <sub>t</sub>	0.001 kg.m <sup>3</sup>
<b>Coefficient de frottement</b>	f <sub>t</sub>	0.0001 N.m.s/rad

- Paramètre de la GSAP :

paramètre	symbole	valeur
<b>Puissance nominale</b>	P <sub>n</sub>	2500 Watts
<b>Moment d'inertie</b>	J	0.125 kg.m <sup>3</sup>
<b>Nombre de paires de pôles</b>	P	8
<b>Inductances statoriques</b>	L <sub>d</sub> , L <sub>q</sub>	2.3*10 <sup>-3</sup> H
<b>Résistances statoriques</b>	R <sub>s</sub>	0.27 Ω
<b>Flux d'excitation efficace</b>	Φ <sub>f</sub>	0.14 N.m
<b>Coefficient de frottement</b>	F	0.001 N.m.s/rad

- Paramètres du redresseur :

paramètre	symbole	valeur
<b>Résistance</b>	R	50 Ω
<b>Inductance</b>	L	0.025 H
<b>Capacité</b>	C	500 μF

## ملخص :

تقدم هذه المذكرة دراسة لنظام طاقة الرياح يعتمد على مولد متزامن بمغناطيس دائم مدفوع بواسطة توربين متغير السرعة. أولاً ، تم تقديم لمحة عامة عن طاقة الرياح وأنواع المولدات المختلفة. في الخطوة الثانية ، قمنا بنمذجة الجزء الأول من سلسلة الرياح ، أي توربينات الرياح عالية الطاقة وتحدثنا عن استراتيجية التحكم MPPT التي تسمح بالحفاظ على معامل الطاقة عند القيمة المثلى بغض النظر عن الاختلافات في سرعة الرياح. بعد ذلك ، قمنا بنمذجة المولد المتزامن ذو المغناطيس الدائم مع دراسة مقوم PWM من خلال عرض هيكله وتشغيله بالإضافة إلى التحكم فيه وأخيراً العاكس ثلاثي الطور الذي يسمح بالحقن في الشبكة. يتيح التحكم في القوة الموجهة المطبق على المولد المتزامن للمغناطيس الدائم إمكانية جعل سلوكه مشابهاً لسلوك آلة التيار المستمر بإثارة منفصلة. أخيراً ، حصلنا على نتائج المحاكاة التي تسمح لنا بتحليل سلوك نظام توليد طاقة الرياح.

## الكلمات المفتاحية :

توربين ، طاقة الرياح ، المولد المتزامن للمغناطيس الدائم ، ماتلاب ، محاكاة ، نمذجة ، الشبكة ، التحكم الشعاعي ...

## Abstract :

This work deals with a study of a wind power system based on a synchronous generator with permanent magnets driven by a variable speed turbine. First, a general overview on wind energy and the different types of generators are given. In a second step, the first part of the wind chain, is modeled namely the high power wind turbine and the MPPT control strategy. This one allows to the power coefficient to be maintained at an optimal value regardless in the variations in the power and wind speed. Then, the permanent magnet synchronous generator, the PWM rectifier by the its operation, its control and the three-phase inverter (which allows injection into the network) are studied with matlab program. The vector control applied to the permanent magnet synchronous generator makes it possible to have a similar behavior of the DC machine with separate excitation. In the end, simulation results permit to analyze the behavior of the wind power generation system.

## Key words :

Wind power, turbine, permanent magnet synchronous generator, vector control, grid, modeling , simulation, Matlab

## Résumé :

Ce travail présente une étude d'un système éolien à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents entraînée par une turbine à vitesses variables. Dans un premier temps, un aperçu général sur l'énergie éolienne et les différents types des génératrices est abordé. Dans un second temps, la première partie de la chaîne éolienne, à savoir la turbine éolienne de grande puissance, est modélisée. La stratégie de commande MPPT qui permet de maintenir le coefficient de puissance à une valeur optimale quelques soient les variations de la vitesse du vent est exposée. La génératrice synchrone à aimant permanent, ainsi que le redresseur à MLI, sa structure, son fonctionnement et l'onduleur triphasé (qui permet l'injection au réseau) sont ensuite simulés par le langage MATLAB. La commande vectorielle appliquée à la génératrice synchrone à aimant permanent permet de rendre son comportement similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée. Enfin, les résultats obtenus de simulation permettent d'analyser le comportement du système de génération éolienne.

## Mots clés :

Aérogénérateur, énergie éolienne, turbine, machine synchrone à aimant permanent, réseau, commande vectorielle, Matlab, modélisation, simulation..