



République Algérienne Démocratique et  
Populaire



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de  
la Recherche Scientifique

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de  
MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

## Thème

*Etude et commande d'une génératrice  
asynchrone à double alimentation pour  
utilisation en système éolienne*

Réalisé par:

*Dhequir abdelhafidh*

*Lachraf laid*

*Nezli fares*

Encadré par :

*M. Tria Fatma*

année universitaire : 2018 / 2019



## ***Remercîment***

*Tout d'abord, nous voudrions remercier Dieu Tout-Puissant*

*Donne-nous force et courage à cette humilité*

*Travail, merci pour tout le monde*

*Encouragez-nous et aidez-nous à atteindre ce stade de notre formation.*

*Nous voulons remercier tous ceux qui ont contribué*

*Finalisez ce travail modeste.*

*Merci Dr. Tariya Fatima pour la mise en œuvre de ce projet.*

*Merci beaucoup Mr. Bennor cherife*

*Nous voudrions remercier les étudiants de Master commande électrique*

*Aidez-les moralement tout au long de la période de préparation.*

## *Dédicace*

*Nous dédions ce travail qui ne sera pas possible sans soutien*

*Inébranlable et illimité de nos chers parents qui continuent à  
nous donner*

*Avec l'amour est nécessaire pour pouvoir atteindre ce que nous  
.sommes aujourd'hui*

*Que Dieu vous garde et que le succès soit toujours à votre  
portée*

*.Cela peut vous combler de bonheur*

*:Nous donnons ce travail à*

*Nos ancêtres*

*Nos frères et sœurs et leurs familles*

*Nos oncles, nos oncles et leurs familles*

*Tous les fils de nos fidèles*

*Tous nos amis, collègues et tous ceux qui nous apprécient*

ملخص:

هذا العمل يعالج إشكالية التحكم بإستراتيجية النمط الانزلاقي و تطبيقها في نظام تحويل الطاقة الهوائية الذي يحتوي على ماكينة لامتزامنة ذات تغذية مزدوجة ( الساكن موصول مباشرة بالشبكة اما الدوار فبواسطة مقوم على التسلسل مع منوب). هذه التقنية وجدت فعاليتها في تغيير بنية الانظمة باستخدامها لقانون المراقبة غير الخطية. و الهدف من ذلك هو تطبيق هذه الإستراتيجية للتحكم في تبادل القدرة الفعالة و القدرة الرجعية للساكن بتغذية الدوار بواسطة محول ثنائي الاتجاه. نتائج المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها تظهر الاهتمام المتزايد من هذا التحكم في أنظمة الطاقة.

كلمات مفتاحية: ماكينة لامتزامنة ذات تغذية مزدوجة، النمط الانزلاقي، التحكم الشعاعي، التحكم في القدرة.

Résumé :

Ce travail présente une technique de commande par mode glissant appliquée au système de conversion d'énergie éolienne équipée d'une génératrice asynchrone à double alimentation. Cette technique trouve sa plus forte justification aux problèmes d'incertitudes du modèle par l'utilisation d'une loi de commande non linéaire. L'objectif est d'appliquer cette commande pour contrôler l'échange des puissances active et réactive générées par la machine asynchrone avec le réseau en agissant sur les signaux rotoriques via un convertisseur bidirectionnel. Les résultats de simulations numériques obtenus montrent l'intérêt croissant d'une telle commande dans les systèmes électriques.

Mots clés : génératrice asynchrone à double alimentation, mode glissant, commande vectorielle, contrôle des puissances

Abstract:

This work present a technique of sliding mode control applied to the system of wind energy conversion equipped with a doubly-fed induction generator. This technique finds its strongest justification for model uncertainty problems by using a nonlinear control law. The goal is to apply this command to control the exchange of active and reactive power generated by the doubly-fed induction generator with the network acting on the rotor signals via a bidirectional converter. The numerical simulation results obtained show the growing interest of such a control in electrical systems.

Keywords: doubly-fed induction generator, sliding mode, oriented flux control, power control.

## Notation et symbole

---

$V$	: Vitesse du vent
$P(V)$	: Densité de probabilité de la vitesse du vent
$k$	: Facteur de forme de la courbe $P(V)$
$C$	: Facteur d'échelle de la courbe $P(V)$
$V_{moy}$	: Vitesse moyenne du vent
$f_0$	: Fréquence des vents clams
$V_1$	: Vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur
$V_2$	: Vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur
$\rho$	: Masse volumique de l'air
$S$	: Surface balayée par les pâles
$P_m$	: Puissance extraite du vent
$P_{mt}$	: Puissance totale du vent
$C_p$	: Coefficient de puissance
$R$	: Rayon des pales
$\Omega_1$	: Vitesse de rotation avant le multiplicateur
$\Omega_2$	: Vitesse de rotation après multiplicateur
$P_n$	: Puissance nominale
$V_n$	: Vitesse nominale du vent
$V_{est}$	: Vitesse du vent estimée
$\Omega_{t,est}$	: Vitesse de rotation estimée de la turbine
$C_{g,est}$	: Couple estimé de la turbine
$V_{max}$	: Vitesse maximale du vent
$V_{min}$	: Vitesse minimale du vent
$\beta$	: Angle de calage
$\Omega_{opt}$	: Vitesse de rotation optimale de la génératrice
$\Omega_{min}$	: Vitesse de rotation minimale de la génératrice
$\Omega_{max}$	: Vitesse de rotation maximale de la génératrice
$\lambda$	: Vitesse spécifique
$\lambda_{opt}$	: Vitesse spécifique optimale
$\Delta P$	: Variation de puissance
$\Delta V$	: Variation de la vitesse de vent
$C_{em}$	: Couple électromagnétique
$C_{aer}$	: Couple aérodynamique avant multiplicateur
$C_g$	: Couple mécanique après multiplicateur
$C_{em-ref}$	: Couple électromagnétique de référence
$\Omega_{ref}$	: Vitesse de rotation de référence
$\Omega_r$	: Vitesse de rotation de la machine
$\Omega_t$	: Vitesse de rotation de la turbine
$i$	: l'angle d'incidence
$V_{rot}$	: vecteur de la rotation de l'aérogénérateur

## Notation et symbole

---

$F_{res}$	: force de la résistance mécanique
$F_{ax}$	: force axiale
$F_{rot}$	: force de la rotation
$F(s)$	: fonction de transfert du régulateur de vitesse
$J$	: moment d'inertie totale
$J_m$	: moment d'inertie de la machine
$J_t$	: moment d'inertie de la turbine
$\lambda_{cp-max}$	: Vitesse spécifique correspondant à $C_p_{max}$
$C_r$	: Couple résistant dû au frottement
$V_0(t)$	: Vitesse du vent en un point
$V(t)$	: Vitesse du vent lentement variable
$V_t(t)$	: Vitesse du vent turbillonnant
$L_v$	: Echelle de longueur de la turbulence
$\sigma_v$	: Ecart type de la turbulence
$K_\sigma$	: Coefficient d'intensité de la turbulence
$C_t$	: Coefficient de couple
$f_m$	: Coefficient de frottement de la machine
$f_t$	: Coefficient de frottement de la turbine
$V_{s-abc}$	: Tensions simples du stator de la MADA
$V_{r-abc}$	: Tensions simples du rotor de la MADA
$I_{s-abc}$	: Courants du stator de la MADA
$I_{r-abc}$	: Courants du rotor de la MADA
$\phi_{s-abc}$	: Flux statorique de la MADA
$\phi_{r-abc}$	: Flux rotorique de la MADA
$R_s$	: Résistance d'une phase du stator
$R_r$	: Résistance d'une phase du rotor
$L_s$	: Inductance propre d'une phase du stator
$L_r$	: Inductance propre d'une phase du rotor
$M_{ss}$	: Inductance mutuelle entre phases du stator
$M_{sr}$	: Inductance mutuelle entre phase du stator et du rotor
$M_{rr}$	: Inductance mutuelle entre phases du rotor
$M$	: Inductance mutuelle maximale
$np$	: Nombre de paires des pôles
$V_{ds}, V_{qs}$	: Composantes de la tension statorique respectivement suivant l'axe d et q
$V_{dr}, V_{qr}$	: Composantes de la tension rotorique respectivement suivant l'axe d et q
$I_{ds}, I_{qs}$	: Composantes du courant statorique respectivement suivant l'axe d et q
$I_{dr}, I_{qr}$	: Composantes du courant rotorique respectivement suivant l'axe d et q
$\phi_{qs}, \phi_{qs}$	: Composantes du flux statorique respectivement suivant l'axe d et q
$\phi_{dr}, \phi_{qr}$	: Composantes du flux rotorique respectivement suivant l'axe d et q

## Notation et symbole

---

$[P(\theta)]$	: Matrice de transformation directe de PARK
$[P(\theta)]^{-1}$	: Matrice de transformation inverse de PARK
$\omega_{coord}$	: Vitesse de rotation du repère de PARK
$\omega_s$	: Vitesse électrique du champ tournant
$\omega_r$	: Vitesse électrique du rotor
$\omega_{gl}$	: Vitesse angulaire du glissement
$V_{abc}$	: Tensions efficaces de la ligne
$R_l$	: Résistance de la ligne
$L_l$	: Inductance de la ligne
$S_{abc}$	: Etat des interrupteurs de l'onduleur
$U_{dc}$	: Tension aux bornes du bus continu (tension redressée)
$P_s$	: Puissance active statorique
$Q_s$	: Puissance réactive statorique
$P_r$	: Puissance active rotorique
$Q_r$	: Puissance réactive rotorique
$P_{s-ref}$	: Puissance active de référence statorique
$Q_{s-ref}$	: Puissance réactive de référence statorique
$S(x)$	: Surface de glissement d'une variable à réguler
$\dot{S}(x)$	: Dérivé de la surface de glissement d'une variable à réguler
$V(x)$	: Fonction de Lyapunov
$S(P)$	: Surface de glissement pour puissance active
$S(Q)$	: Surface de glissement pour puissance réactive
$e(x)$	: Erreur entre la référence et la variable à réguler
$r$	: Degré relatif de la surface de glissement
$u_n$	: Commande discontinue
$u_{eq}$	: Commande équivalente
$f_s$	: Fréquence statorique
$f_r$	: Fréquence rotorique
$g$	: Glissement
$G$	: Gain du multiplicateur

## Notation et symbole

---

RMG : régulateur à mode glissant

CSV : La commande à structure variable

MC : Le mode de convergence

MG : Le mode de glissement

MRP : Le mode de régime permanent

SCE : Système de Conversion Eolien

MADA : Machine Asynchrone à double alimentation

MS : Machine Synchronne

MSAP : Machine synchronne d'aimants permanents

MRV : Machines à réluctance variable

MRVDS : La machine à réluctance variable à double saillance

## LIST DE FIGURE

<b>Fig.(1.01):</b> gisement éolien de monde .....	<b>04</b>
<b>Fig.(1.02) :</b> gisement éolien de Algérie.....	<b>04</b>
<b>Fig.(1.03) :</b> Répartition continentale de la capacité ajoutée en 2010 .....	<b>05</b>
<b>Fig.(1.04) :</b> carte du potentiel éolien en Algérie .....	<b>06</b>
<b>Fig.(1.05) :</b> 1 <sup>er</sup> ferme éolienne en Algérie .....	<b>06</b>
<b>Fig.(1.06) :</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	<b>07</b>
<b>Fig.(1.07) :</b> Principaux organes du système de conversion éolien .....	<b>07</b>
<b>Fig.(1.08) :</b> Eolienne à axe vertical .....	<b>08</b>
<b>Fig.(1.09) :</b> éoliennes à axe horizontale .....	<b>09</b>
<b>Fig.(1.10) :</b> Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW .....	<b>11</b>
<b>Fig (1.11) :</b> La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles .....	<b>12</b>
<b>Fig.(1.12) :</b> Connexion directe d'un machine asynchrone sur le réseau .....	<b>13</b>
<b>Fig.(1.13) :</b> Machine asynchrone à double stator .....	<b>13</b>
<b>Fig.(1.14) :</b> Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau .....	<b>14</b>
<b>Fig.(1.15) :</b> Machine asynchrone à double alimentation .....	<b>14</b>
<b>Fig.(1.16) :</b> Structure de kramer.....	<b>15</b>
<b>Fig.(1.17) :</b> Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur .....	<b>15</b>
<b>Fig.(1.18) :</b> MADA avec structure back-to-back .....	<b>16</b>
<b>Fig.(1.19) :</b> Machine synchrone à aimants permanents .....	<b>17</b>
<b>Fig.(1.20) :</b> MRV à stator lisse non excitée .....	<b>18</b>
<b>Fig.(2.01) :</b> Tube de courant autour d'une éolienne .....	<b>22</b>
<b>Fig.(2.02) :</b> Coefficient de puissance .....	<b>22</b>
<b>Figure. (2.03) :</b> Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes .....	<b>23</b>
<b>Fig.(2.04) :</b> Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....	<b>24</b>
<b>Fig.(2.05) :</b> Bilan des forces sur une pale .....	<b>24</b>

<b>Fig.(2.06) : Flux d'air sur un profil de pale " stall "</b> .....	<b>25</b>
<b>Fig.(2.07) : Variation de l'angle de calage d'une pale</b> .....	<b>26</b>
<b>Fig.2.08 : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe).</b> .....	<b>27</b>
<b>Fig.(2.09) : les zones de fonctionnement avec contrôle de l'angle de calage (pitch control)</b> .....	<b>28</b>
<b>Fig.(2.10) : Construction d'une série temporelle de la vitesse du vent</b> .....	<b>31</b>
<b>Fig.(2.11) : Profil du vent duré de 300s</b> .....	<b>32</b>
<b>Fig.(2.12) : Définition de 3 niveaux du vent avant et après le filtre spatial</b> .....	<b>32</b>
<b>Fig.(2.13) :(a) Coefficient de la puissance et (b) puissance mécanique de la turbine</b> .....	<b>34</b>
<b>Fig.(2.14) : Schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine éolienne</b> .....	<b>35</b>
<b>Fig.2.15 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA</b> .....	<b>35</b>
<b>Fig.(2.16) : Représentation schématique d'une MADA</b> .....	<b>36</b>
<b>Fig.(2.17) : Représentation de la MADA dans le repère de Park</b> .....	<b>39</b>
<b>Fig.(2.18) : Composantes du flux statorique</b> .....	<b>43</b>
<b>Fig.(2.19) : Composantes du courant statorique</b> .....	<b>43</b>
<b>Fig.(2.20) : Vitesse et couple électromagnétique <math>C_{em}</math></b> .....	<b>44</b>
<b>Fig.(2.21) : Puissance active et réactive du stator</b> .....	<b>44</b>
<b>Fig.(2.22) : Vitesse et couple électromagnétique</b> .....	<b>45</b>
<b>Fig.(2.23) : Courants statorique et rotorique</b> .....	<b>45</b>
<b>Fig.(2.24) Structure d'alimentation de la MADA par une cascade onduleur- redresseur à MLI</b>	<b>46</b>
<b>Fig. 2.25 : signal de porteuse et signaux de référence</b> .....	<b>46</b>
<b>Fig.(2.26) : Modulateur MLI à bande d'hystérésis</b> .....	<b>47</b>
<b>Fig.(2.27) : Schéma de principe d'un redresseur MLI</b> .....	<b>47</b>
<b>Fig.(2.28) : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI</b> .....	<b>50</b>
<b>Fig.(2.29) : Redresseur MLI triphasé et sa commande</b> .....	<b>50</b>
<b>Fig.(2.30) : Allure de la tension du bus continu <math>U_{dc}</math> et du courant de charge <math>i_{ch}</math></b> .....	<b>51</b>

<b>Fig.(2.31) : Tension de sortie d'une phase de l'onduleur</b> .....	<b>52</b>
<b>Fig.(3.01) : Orientation du flux statorique</b> .....	<b>56</b>
<b>Fig. (3.02) : Schéma bloc de la commande directe</b> .....	<b>57</b>
<b>Fig. (3.03) : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte</b> .....	<b>58</b>
<b>Fig. (3.04) : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée</b> .....	<b>59</b>
<b>Fig.(3.05) : Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA alimentée en tension</b> .....	<b>60</b>
<b>Fig (3.06) : vitesse de vent et puissance active statorique</b> .....	<b>61</b>
<b>Fig (3.07) : couple électromagnétique et puissance réactive statorique</b> .....	<b>61</b>
<b>Fig (3.08) : courant rotorique et courant statorique</b> .....	<b>62</b>
<b>Fig (3.09) : courant rotorique selon l'axe d et q</b> .....	<b>62</b>
<b>Fig (3.10) : vitesse de vent et puissance active statorique</b> .....	<b>63</b>
<b>Fig (3.11) : puissance réactive statorique et couple électromagnétique</b> .....	<b>63</b>
<b>Fig (3.12) : courant statorique et courant rotorique</b> .....	<b>64</b>
<b>Fig (3.13) : courant rotorique selon l'axe d et q</b> .....	<b>64</b>
<b>Fig (4.01) : Modes de fonctionnement dans le plan de phase</b> .....	<b>67</b>
<b>Fig(4.02) : mode trajectoire dans le plan de phase</b> .....	<b>67</b>
<b>Fig.(4.03) : Trajectoire de l'état vis-à-vis de la surface</b> .....	<b>69</b>
<b>Fig (4.04): La valeur continue <math>U_{eq}</math> prise par la commande lors de la commutation entre <math>U_{max}</math> et <math>U_{min}</math></b> .....	<b>70</b>
<b>Fig.(4.05) : Fonction « <i>sign</i> »</b> .....	<b>71</b>
<b>Fig.(4.06) : Commande adoucie « <i>sat</i> »</b> .....	<b>72</b>
<b>Fig.(4.07) : Commande intégrale</b> .....	<b>72</b>
<b>Fig.(4.08): Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant</b> .....	<b>75</b>
<b>Fig (4.09) : vitesse de vent et puissance active statorique</b> .....	<b>77</b>
<b>Fig (4.10) : couple électromagnétique puissance réactive statorique</b> .....	<b>78</b>
<b>Fig (4.11) : courant statorique et Zome</b> .....	<b>78</b>
<b>Fig (4.12) : courant rotorique</b> .....	<b>79</b>

<b>Fig (4.13) : courant rotorique selon l'axe d et q .....</b>	<b>79</b>
<b>Fig(4.14) : vitesse de vent et puissance active statorique .....</b>	<b>80</b>
<b>Fig (4.15) : couple électromagnétique et puissance réactive statorique .....</b>	<b>81</b>
<b>Fig (4.16) : courant statorique et courant rotorique .....</b>	<b>81</b>
<b>Fig (4.17) : courant rotorique selon l'axe d et q .....</b>	<b>82</b>
<b>Fig (4.18) : puissance active selon régulateur MG et PI .....</b>	<b>83</b>
<b>Fig (4.19) : puissance réactive selon régulateur MG et PI .....</b>	<b>84</b>
<b>Fig (4. 20) : puissance active selon régulateur MG et PI .....</b>	<b>85</b>
<b>Fig (4.21) : puissance réactive selon régulateur MG et PI .....</b>	<b>86</b>

# Sommaire

Introduction générale.....	01
<b>Chapitre 01 La Généralité sur l'énergie éolien</b>	
<b>1. Introduction.....</b>	<b>03</b>
<b>2. Historique.....</b>	<b>03</b>
<b>3. Gisement éolien de monde.....</b>	<b>03</b>
<b>4. gisement éolien de Algérie.....</b>	<b>04</b>
<b>5. Répartition International.....</b>	<b>05</b>
<b>6. Répartition National.....</b>	<b>05</b>
<b>7. Conversion de l'énergie éolien.....</b>	<b>07</b>
<b>8. Les différents types des éoliennes.....</b>	<b>08</b>
<b>8.1.Eolienne à axe vertical.....</b>	<b>08</b>
<b>8.1.1. les Avantages.....</b>	<b>08</b>
<b>8.1.2. Inconvénient.....</b>	<b>08</b>
<b>8.2. Les éoliennes à axe horizontale.....</b>	<b>09</b>
<b>8.2.1. Axe horizontal perpendiculaire à la direction du vent.....</b>	<b>09</b>
<b>8.2.2. Axe horizontal parallèle à la direct vent.....</b>	<b>09</b>
<b>8.2.3. Les Avantages.....</b>	<b>10</b>
<b>8.2.4. Inconvénient.....</b>	<b>10</b>
<b>9. Principaux composants d'une éolienne.....</b>	<b>10</b>
<b>10. Différents types de générateurs utilisés pour générer de l'énergie éolienne.....</b>	<b>11</b>
<b>10.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone.....</b>	<b>12</b>
<b>10.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil.....</b>	<b>12</b>
<b>10.1.2. Machine asynchrone à double stator.....</b>	<b>13</b>
<b>10.1.3. Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless » .....</b>	<b>13</b>
<b>10.1.4. la génératrice asynchrone à double alimentation.....</b>	<b>14</b>
<b>10.1.5. La structure d'alimentation de Kramer.....</b>	<b>15</b>
<b>10.1.6.Machine asynchrone à double alimentation– structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.....</b>	<b>15</b>
<b>10.1.7.Structure Back-to-back.....</b>	<b>16</b>
<b>10.2. La génératrice synchrone.....</b>	<b>16</b>
<b>10.2.1. Génératrice à aimants permanents.....</b>	<b>17</b>
<b>10.2.2. Génératrice synchrone à électroaimants.....</b>	<b>17</b>
<b>10.3. Génératrice à réluctance variable.....</b>	<b>18</b>
<b>10.3.1. MRV à stator lisse non excitée.....</b>	<b>18</b>
<b>10.4. Autres générateurs.....</b>	<b>19</b>
<b>10.4.1. dynamo.....</b>	<b>19</b>
<b>11. Les Avantages de l'éolien.....</b>	<b>19</b>
<b>12. Les Inconvénients.....</b>	<b>20</b>
<b>13.Conclusion.....</b>	<b>20</b>

## Sommaire

<b>Chapitre 02 : Modélisation d'un système éolien</b>	
<b>1. Introduction.....</b>	<b>21</b>
<b>2. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....</b>	<b>21</b>
<b>2.1. Loi de betz.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2. Production d'énergie mécanique.....</b>	<b>23</b>
<b>3. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne.....</b>	<b>24</b>
<b>3.1. Bilan des forces sur une pale.....</b>	<b>25</b>
<b>4. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne.....</b>	<b>25</b>
<b>4.1. Système à décrochage aérodynamique "stall".....</b>	<b>25</b>
<b>4.2. Système d'orientation des pales "pitch".....</b>	<b>26</b>
<b>5. Systèmes de régulation mécanique de la vitesse de rotation d'une éolienne.....</b>	<b>26</b>
<b>6. Différentes phases (zones) de fonctionnement d'éolienne à vitesse variable .....</b>	<b>27</b>
<b>7. Les différents types d'MPPT éoliens.....</b>	<b>28</b>
<b>7.1 Maximisation de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure.....</b>	<b>28</b>
<b>7.2. Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la Voilure.....</b>	<b>29</b>
<b>7.3. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse .....</b>	<b>29</b>
<b>7.4. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse.....</b>	<b>30</b>
<b>8. Modélisation de la turbine.....</b>	<b>30</b>
<b>8.1. Source primaire : le vent.....</b>	<b>30</b>
<b>8.2. Expression du vent en un point fixe.....</b>	<b>30</b>
<b>8.3. Filtre spatial.....</b>	<b>32</b>
<b>9 . Modèle de la turbine.....</b>	<b>33</b>
<b>9.1. Modélisation de l'arbre de la machine .....</b>	<b>34</b>
<b>9.2. Modélisation du multiplicateur.....</b>	<b>34</b>
<b>10. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation.....</b>	<b>35</b>
<b>10.1. Structure de la machine.....</b>	<b>35</b>
<b>10.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation.....</b>	<b>35</b>
<b>10.3. Modélisation de la machine à double alimentation.....</b>	<b>36</b>
<b>10.4. Hypothèses simplificatrices.....</b>	<b>36</b>
<b>10.5. Modèle de la MADA dans le repère abc.....</b>	<b>37</b>
<b>10.6. Changement de repère.....</b>	<b>39</b>
<b>10.6.1. La transformation de Park.....</b>	<b>39</b>
<b>10.6.2. Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes (d, q)...</b>	<b>40</b>
<b>10.6.3. Choix du référentiel.....</b>	<b>41</b>
<b>10.6.4. Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant .....</b>	<b>41</b>
<b>10.6.5. Mise sous forme d'équation d'état.....</b>	<b>42</b>
<b>11. Simulation de la machine asynchrone a double alimentation.....</b>	<b>43</b>
<b>12. Modélisation de l'alimentation de la MADA commandée par le rotor.....</b>	<b>45</b>
<b>a. MLI à porteuse triangulaire.....</b>	<b>46</b>
<b>b. MLI à bande hystérésis.....</b>	<b>46</b>
<b>12.1. Structure générale du redresseur MLI.....</b>	<b>47</b>
<b>12.1.1. Principe de fonctionnement en redresseur MLI.....</b>	<b>47</b>
<b>12.1.2. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphas.....</b>	<b>49</b>

## Sommaire

12.1.3. Résultats de simulation.....	51
12.2. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI.....	51
13. Conclusion.....	52
<b>Chapitre 03 : commande vectorielle</b>	
1. Introduction.....	53
2. Principe de la commande vectoriel a flux oriente.....	53
3. Objectifs du contrôle.....	54
4. Modèle de la MADA avec orientation du flux.....	54
4.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé.....	55
5. Commande vectorielle directe.....	57
6. Commande vectorielle indirecte.....	57
6.1. Commande en boucle ouverte.....	57
6.2. Commande en boucle fermée.....	58
7. Résultats de simulation.....	60
7.1 . Essai 01 : fonctionnement à vitesse fixe.....	60
7.1.1. Interprétation des resultants.....	62
7.2. Essai 02 : Fonctionnement avec vitesse variable.....	63
7.2.1. Interprétation des résultats.....	64
8. Conclusion.....	65
<b>Chapitre 04 : commande par mode glissant</b>	
1. Introduction.....	66
2. Généralités sur la théorie de la régulation par mode de glissement.....	66
3. Principe de la commande à structure variable par régime glissant.....	66
a. Le mode de convergence (MC).....	67
b. Le mode de glissement (MG).....	67
c. Le mode de régime permanent (MRP).....	67
4. Conception de la commande par mode de glissement.....	67
4.1. Choix des surfaces de glissement.....	68
4.2. Condition de convergence.....	68
4.3. Détermination la loi de commande.....	69
4.3.1. La commande équivalente.....	70
4.3.2. La commande discontinue de base.....	71
5. Utilisation du RMG pour le contrôle de la puissance active et réactive de la MADA.....	73
5.1. Contrôle de la puissance active.....	73
5.2 . Contrôle de la puissance réactive.....	74
5.3 . Calcul des paramètres $K_{vqr}$ et $K_{vdr}$ :.....	75
6. Résultats de simulation.....	77
6.1 . Essai 01 : fonctionnement avec Echelon de vitesse.....	77
6.1.1. Interprétation des resultants.....	79
6.2. Essai 02 : Fonctionnement avec vitesse variable.....	80
6.2.1. Interprétation des resultants.....	82
7. Comparaison entre les commandes par régulateur PI et RMG.....	82
7.1 Variation de la résistance rotorique.....	86
8. Conclusion.....	87
Conclusion générale.....	88

# Sommaire

---

<b>Bibliographique .....</b>	
<b>Annexe .....</b>	

# Introduction générale

---

L'énergie électrique est essentielle à tout développement social et économique. Dans la vie quotidienne de la population, en particulier dans les pays développés, nous sommes devenus une forme d'énergie dont nous ne pouvons plus nous passer. Compte tenu de l'ampleur de la fabrication au cours des dernières décennies, de la prolifération des appareils électroménagers de plus en plus gourmande en consommation d'énergie électrique, la demande en énergie électrique est devenue extrêmement importante. Face à cela et à la diminution des stocks mondiaux d'hydrocarbures, en particulier de la peur d'une pollution de plus en plus envahissante et destructrice pour l'environnement, les pays industrialisés ont eu recours à de grandes centrales d'énergie renouvelable où ils ont l'avantage de polluer l'environnement sans fin.

Dans ce contexte, notre étude se concentre sur le secteur éolien, qui semble être l'un des secteurs les plus prometteurs avec un taux de croissance mondial très élevé. Si le secteur des "grandes éoliennes" (fermes à haute énergie, sites marins, ...) est en expansion, l'idée de décentralisation de l'énergie en produisant de petites quantités de produits localisés (proches des besoins) est devenue de plus en plus présente. Les applications potentielles des "petits vents" (jusqu'à 100 kW) comprennent l'électrification rurale pour la consommation d'électricité locale ou pour la conversion à d'autres secteurs énergétiques: pompage, traitement de l'eau, électrolyse de l'eau et stockage de l'hydrogène à long terme ... Aujourd'hui, ces réseaux isolés parlent également de l'intégration des énergies renouvelables dans les zones urbaines. En fait, à la suite des récents événements survenus sur les réseaux nationaux et internationaux et dans le contexte "subtil" de la libéralisation du secteur de l'énergie, l'idée d'une énergie partiellement ou totalement sans énergie "fait son chemin. Le principe est moins efficace que les sites "nettoyés" et nécessite une gestion totalement améliorée (systèmes à fréquence variable, etc.) tout en restant bon marché. [1]

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes par les chercheurs en génie électrique ont conduit à des recherches pour améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce contexte, notre étude actuelle porte sur l'utilisation des machines asynchrones dans le système éolien. Où la plupart des éoliennes installées aujourd'hui sont équipées de la machine Double alimentation asynchrone . Cela permet un travail généralisé réglez la vitesse du vent et utilisez le plus d'énergie possible pour chacun de ses enroulements, le circuit est du stator est directement connecté au réseau électrique alors que le circuit rotatif (rotorique) est connecté au réseau via des adaptateurs d'alimentation (cascade convertisseur de puissance et un transformateur). Le temps que l'énergie transférée entre le rotor et la réseaux est faible, le coût Les transformateurs sont réduits par rapport aux éoliennes à vitesse variable, c'est la raison principale de l'existence de ce générateur en production Forces puissance.

Cette mémoire a pour but d'étudier une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation dont le stator est connecté directement au réseau et la commande est assurée par le circuit du rotor via un cascade onduleur/ redresseur. Et se fait notre mémoire est composée des quatre chapitres où:

## Introduction générale

---

Dans le premier chapitre de ce mémoire .Un état de l'art de l'énergie éolienne sera présenté Dans ce cadre, la technologie éolienne est alors abordée. Les méthodes de description du gisement éolien sont données, ce qui est un des facteurs du choix de la configuration de la chaîne éolienne. L'architecture des chaînes de conversion d'énergie sont donnés en association avec différents types de génératrices.

Dans le deuxième chapitre nous avons donné un modèle de la partie mécanique de la chaîne de conversion utilisée (vent et turbine éolienne). on présentera la modélisation de la MADA, sa mise en équation permettra de simuler sont modèle dans le mode moteur et générateur. On terminera cette partie par la modélisation de l'alimentation de la machine qui se compose d'un redresseur et d'un onduleur séparé par un bus continu.

Le troisième chapitre sera consacré à la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation qui est entraînée par la turbine éolienne.

Dans le chapitre quatre, nous introduisons un régulateur à mode glissant pour contrôler la puissance active et réactive du stator. Ensuite, une étude comparative des réponses données par ce régulateur à ceux données par le régulateur PI , sera effectuée.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche futures.

# Chapitre 01:

## La Généralité sur l'énergie éolien

## 1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Les sources d'énergies renouvelables présentent l'avantage d'être disponibles en quantité illimitée, leur exploitation est un moyen de répondre aux besoins en énergie, tout en préservant l'environnement, parmi ces énergies, on trouve **l'énergie éolienne**. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. [2]

Dans ce chapitre, comprend une étude technique complète sur l'énergie éolienne histoire, et le développement de son exploitation dans le monde et en Algérie sous quelques formes. Description de différentes éoliennes Il sera également soumis et un aperçu des différents types de machines électriques utilisées dans les éoliennes avec un accent mis sur leurs avantages et inconvénients.

## 2. Historique

Pour la première fois depuis 3000 ans en Égypte, il était utilisé pour le transport de voiliers, comme en Irak, où il était utilisé pour le recyclage des moulins et se développait rapidement au Moyen-Orient et en Europe.

La génération d'énergie électrique par le vent a débute à la fin du 19eme siècle. Parmi les pionniers on peut citer **Paul La Cour** au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950. **Johannes Juul** (élève de **Paul La Cour**) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif. La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération a grande échelle au début des années 1980 en passant de 7 MW en 1981 a 386 MW en 1985. Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaine de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'électronique entre la génératrice et le réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant a basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse. [1]

Actuellement, l'énergie éolienne est en augmentation dans le monde **La Chine** est le pays le plus économe en énergie au monde avec une capacité de production 91.4 GW en 2013

## 3. Gisement éolien de monde

Le vent est réparti de manière beaucoup plus compliquée que le soleil. Son principal avantage qui lui favorise par rapport à l'énergie solaire, est de souffler aussi la nuit. Figure.(1.01) présente une carte du gisement éolien mondial sur une année. [3]

Les vents sont tempérés. Les zones tempérées naturelles sont situées entre les pôles, les zones froides et les zones chaudes et désertiques. [3]

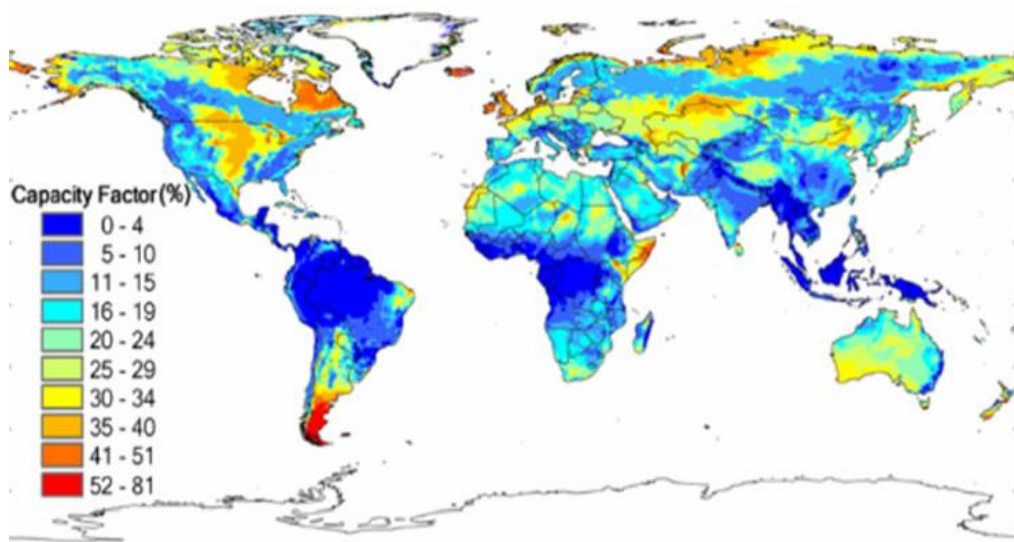


Fig.(1.01): gisement éolien de monde [3]

#### 4. gisement éolien de Algérie

La carte apparaît en dessous- gisement éolien de Algérie où le site d'Adrar, dans le Sud-Ouest est caractérisé, quant à lui, par des vitesses moyennes atteignant 6,3 m/s. Ces deux sites avec Timimoun, délimitent approximativement 60000 km<sup>2</sup> d'espaces ventés ouverts. Dans l'extrême Sud-Ouest, le site de Tindouf affiche des vitesses autour de 6 m/s.[4]

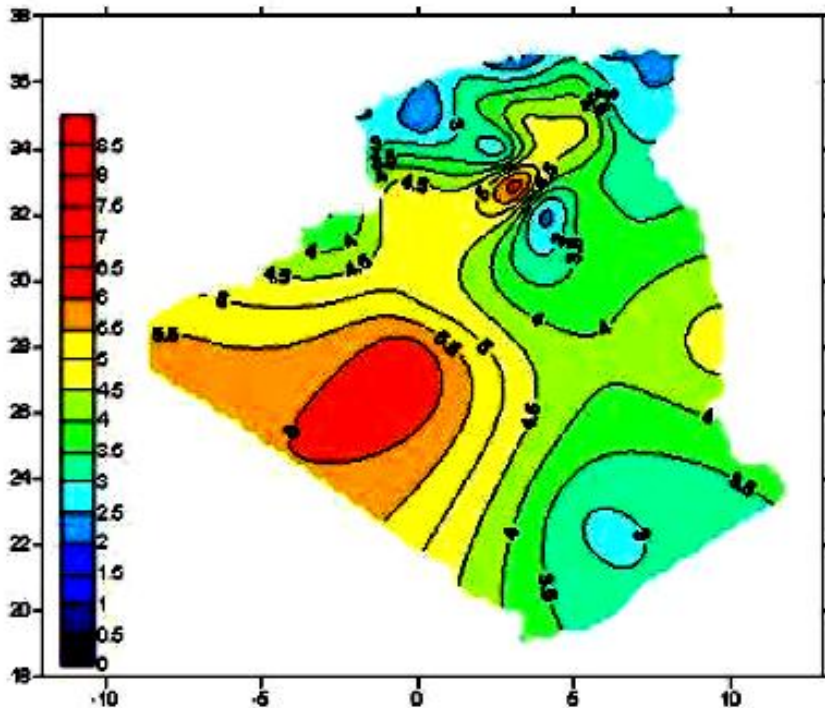
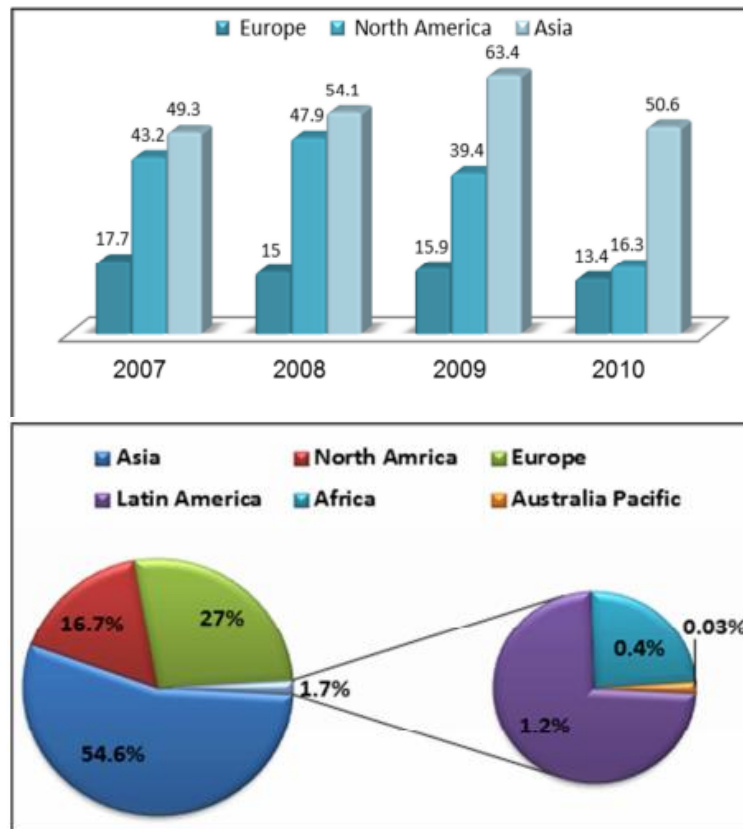


Fig.(1.02) : gisement éolien de Algérie [4]

**5. Répartition International**

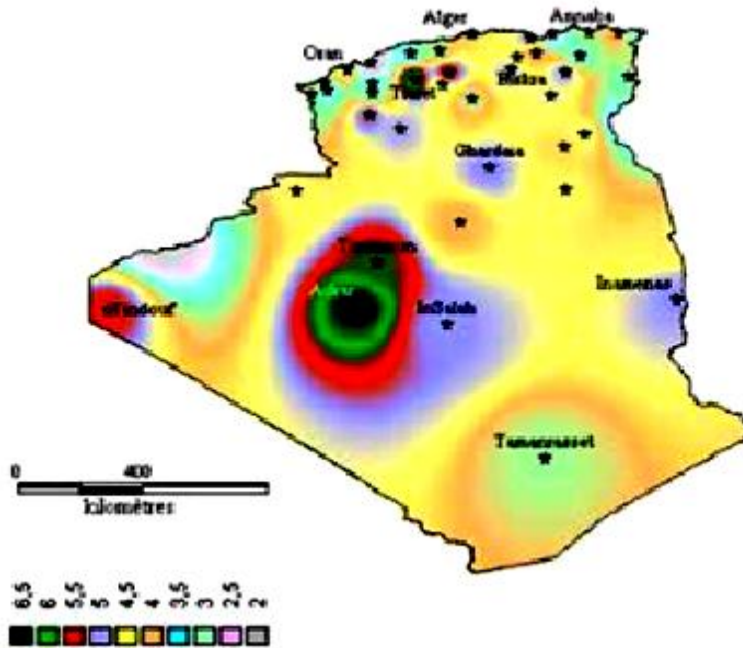
En termes de répartition continentale, la plus forte progression de l'industrie éolienne se situe en Asie, et le centre de gravité de l'éolien mondial s'est encore éloigné de l'Europe et de l'Amérique du Nord [5]. L'Asie représente la plus forte part des nouvelles installations (54.6%), suivie de l'Europe (27.0%) et de l'Amérique du Nord (16.7%), L'Amérique Latine (1.2%), et l'Afrique (0.4%) n'occupent toujours qu'un rôle marginal pour les nouvelles installations [5].



**Fig.(1.03) :** Répartition continentale de la capacité ajoutée en 2010 [5]

**6. Répartition National :**

La carte suivante permet de cibler les zones à forts vents pour installer des parcs éoliens afin de fournir aux zones isolées une indépendance énergétique par rapport au réseau national déjà installé. Des projets de ce type sont à l'étude et d'autres Commencez dès aujourd'hui à voir le premier parc éolien d'Adrar d'une puissance de 10 MW.



**Fig.(1.04) :** carte du potentiel éolien en Algérie [4]

Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de 10 mégawatts qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024[6]. Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de 32 mois travaux pour un coût global de 2,8 milliards de dinars .



**Fig.(1.05) :** 1<sup>er</sup> ferme éolienne en Algérie [6]

Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien.

### 7. Conversion de l'énergie éolien

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice Figure.(1.06) [7].

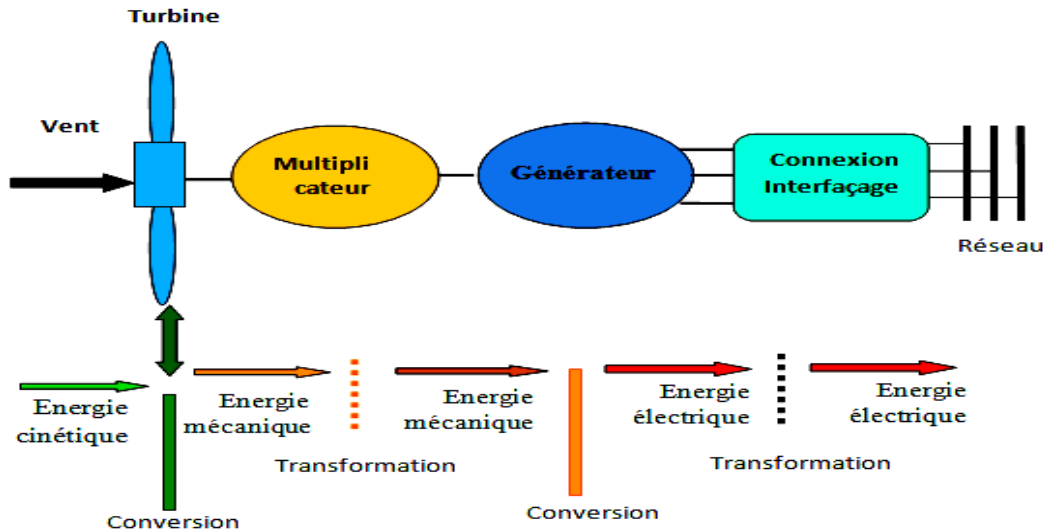


Fig.(1.06) : Conversion de l'énergie cinétique du vent [7].

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, 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. Selon la Figure.(1.07) [8].

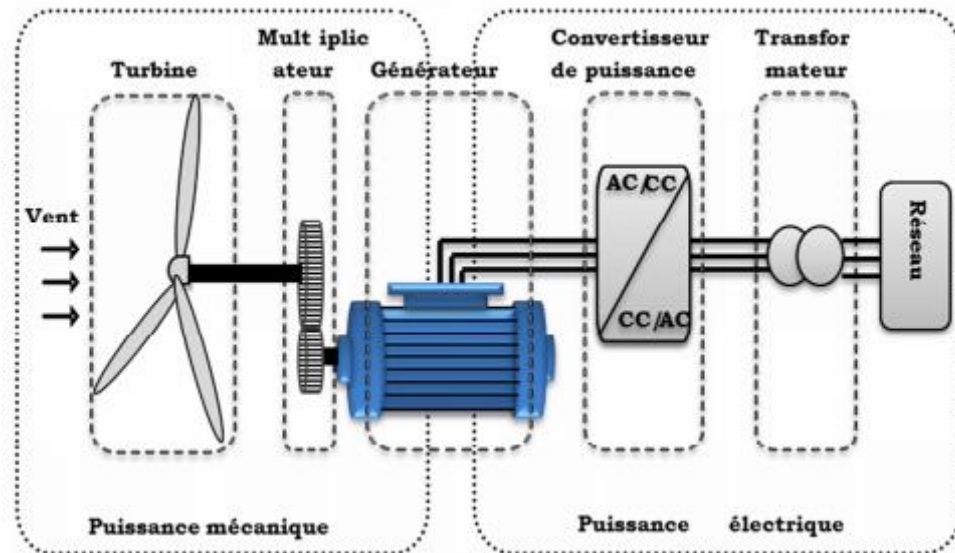


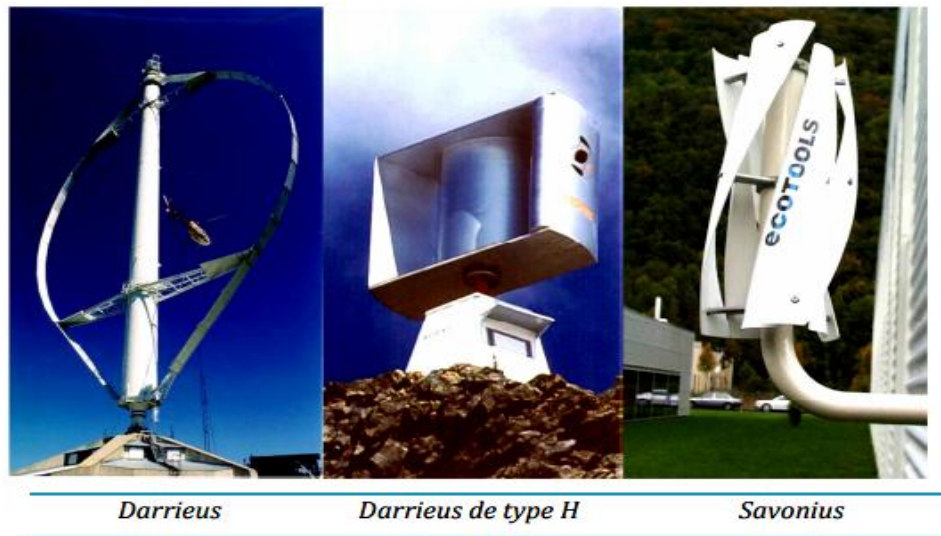
Fig.(1.07) : Principaux organes du système de conversion éolien [8].

## 8. Les différents types des éoliennes

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux grandes familles : celle à axe vertical et celles à axe horizontal. [9]

### 8.1. Eolienne à axe vertical

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation ; le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. [4] Ce type est montré à la Figure .(1.08)



**Fig.(1.08) :** Eolienne à axe vertical

#### 8.1.1. les Avantages :

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.[10]

#### 8.1.2. Inconvénient :

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour . [10]

## 8.2. Les éoliennes à axe horizontale :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un cout moins important. [4] Ce type est montré à la Figure.(1.09)

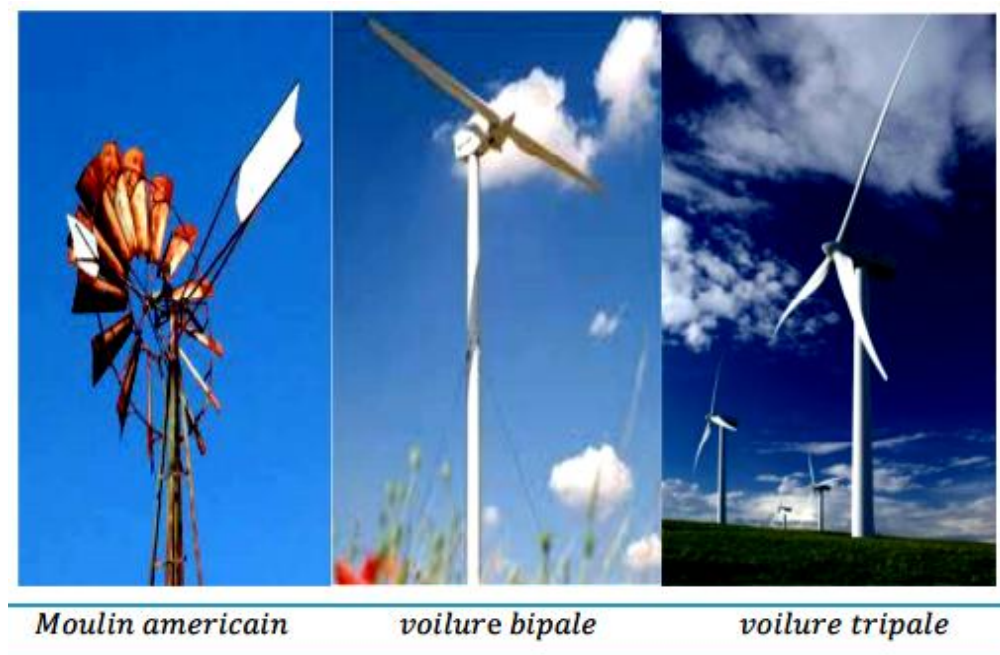


Fig.(1.09) : éoliennes à axe horizontale

### 8.2.1. Axe horizontal perpendiculaire à la direction du vent

Les deux principaux aéromoteurs à axe horizontal perpendiculaire à la direction du vent sont le rotor de Savonius et le capteur à ailes battante

Ces systèmes sont restés à l'état de prototypes car ils présentent plus d'inconvénients que d'avantages, ils nécessitent tout comme les systèmes à axe horizontal parallèle au vent un dispositif d'orientation. La récupération de l'énergie produite est plus compliquée et se traduit par une perte sensible du rendement global[11]

### 8.2.2. Axe horizontal parallèle à la direction du vent

Ce sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comprennent des rotors à 1,2,3 ou 4 pales .

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier les aéromoteurs dont le rotor est en aval de la machine par rapport au vent, "hélice sous le vent" et les aéromoteurs dont le rotor est en amont de la machine par rapport au vent, "hélice face au vent"

Les aérogénérateurs sont généralement équipés d'hélices bipales ou tripales "au vent" pour des diamètres inférieurs à 5-7 m et une hélice "sous le vent" pour des diamètres supérieurs à 5-7m. Les grandes machines de dernière génération fonctionnent "au vent" avec une orientation dynamique sans gouvernail [11]

### 8.2.3. Les Avantages :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.[10]

### 8.2.4. Inconvénient :

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. [10]

## 9. Principaux composants d'une éolienne

### Le mât :

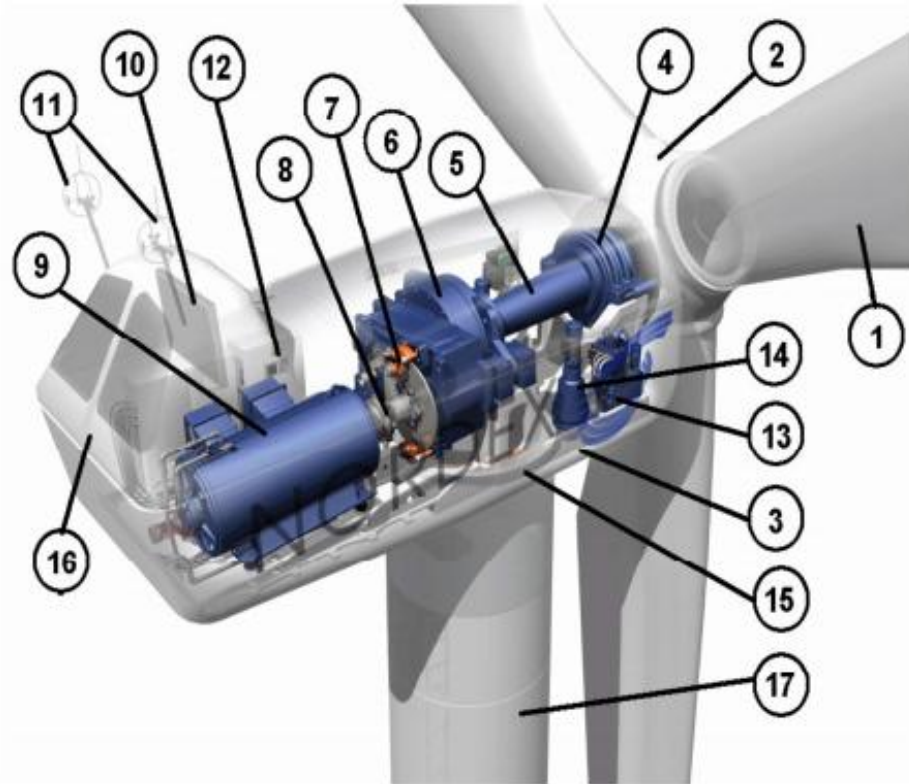
Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte la nacelle est le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. A l'intérieure de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien.

### Les pales :

Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit

### La nacelle :

Elle rassemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone, les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).[4] et la figure.(1.10) montre les différentes composantes de l'énergie éolienne.



**Fig.(1.10) :** Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW[10]

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pales (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales. La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (5) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16). Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent.[10]

Ils existe plusieurs configuration possible d'aérogénérateur qui peuvent avoir des différences importantes néanmoins, une éolienne classique est généralement constituée des trois composants principaux . [9]

### **10. Différents types de générateurs utilisés pour générer de l'énergie éolienne :**

La technologie des aérogénérateurs a énormément évoluée ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne.

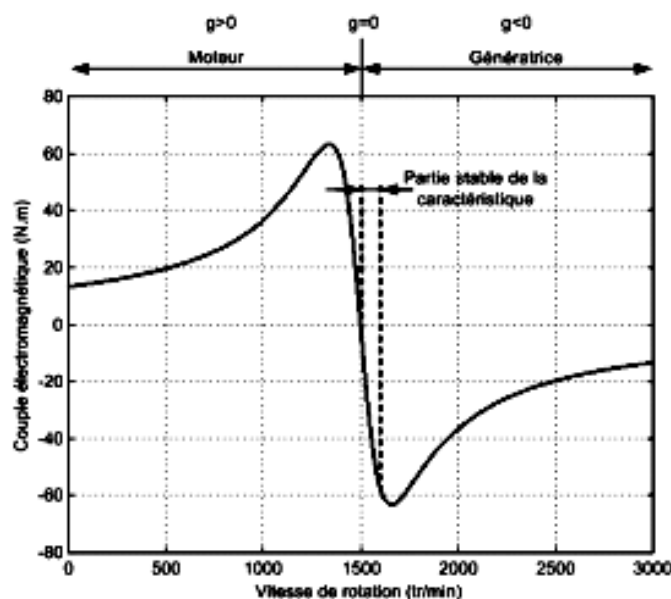
Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances ( $< 20$  kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW le générateur asynchrone est plus courant et économique.[4]

### 10.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator [12].

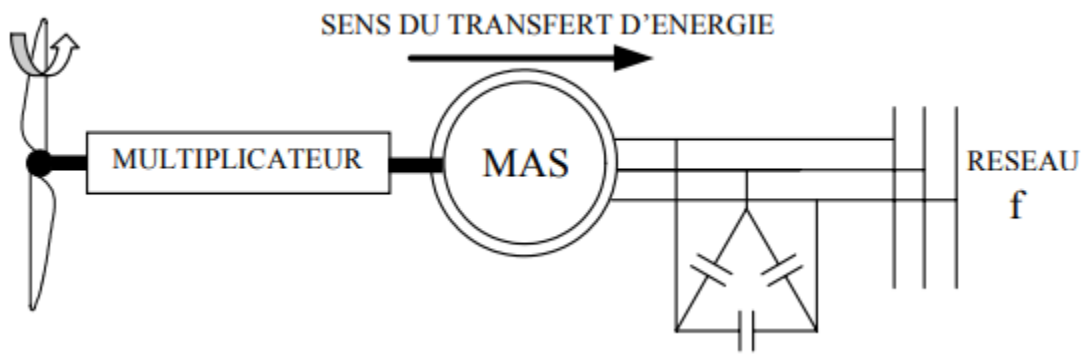
#### 10.1.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure.(1.11) [7].



**Fig (1.11) :** La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g=0$ ), dans le cas de la caractéristique ci dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min .



**Fig.(1.12) :** Connexion directe d'un machine asynchrone sur le réseau

### 10.1.2. Machine asynchrone à double stator

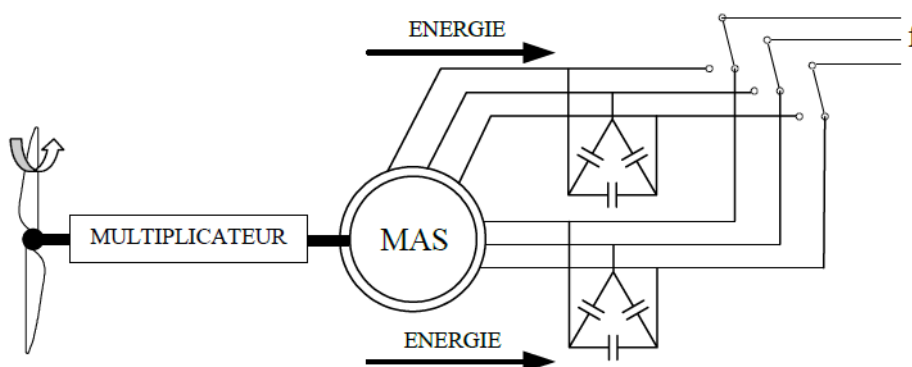
Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator Figure.(1.13)

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [4].

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées.

La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.



**Fig.(1.13) :** Machine asynchrone à double stator

### 10.1.3. Machine asynchrone à double alimentation type « Brushless »

Cette machine est à double stator. Un bobinage de grande section est directement connecté au réseau. L'autre bobinage est de section moins importante. Il est connecté à un onduleur pour contrôler le flux d'excitation.

Le rotor de cette machine est à cage d'écureuil, Cependant, il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques , Cette machine présente l'intérêt de fonctionner à vitesse variable ,Le convertisseur est connecté au bobinage de faible puissance donc moins coûteux , Mais ses inconvénients a un stator plus volumineux , plus complexe à réaliser la figure.(1.14) [13]

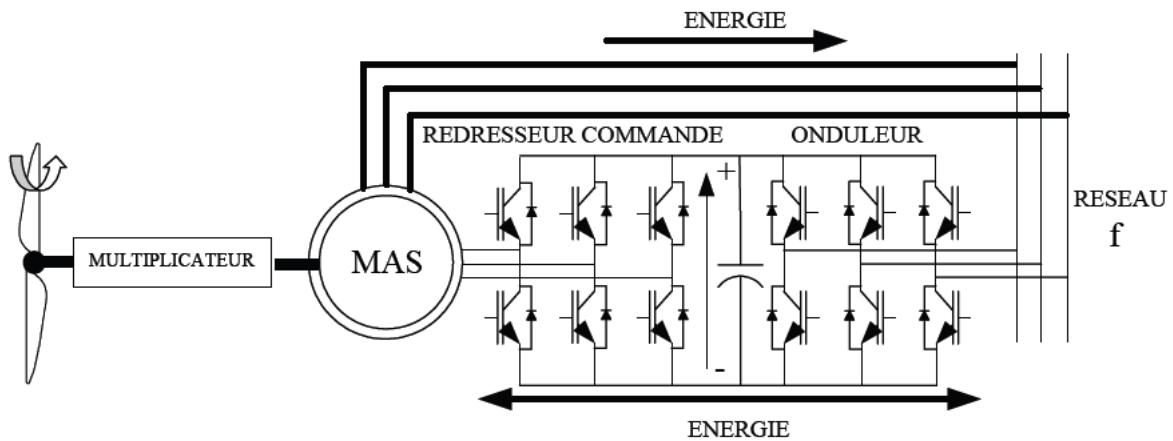


Fig.(1.14) : Machine asynchrone brushless connectée sur le réseau.[13]

**10.1.4. la génératrice asynchrone à double alimentation**

C'est une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes .La structure fig.1.15 dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur électronique qui fait office de variateur de fréquence .La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor . [9]

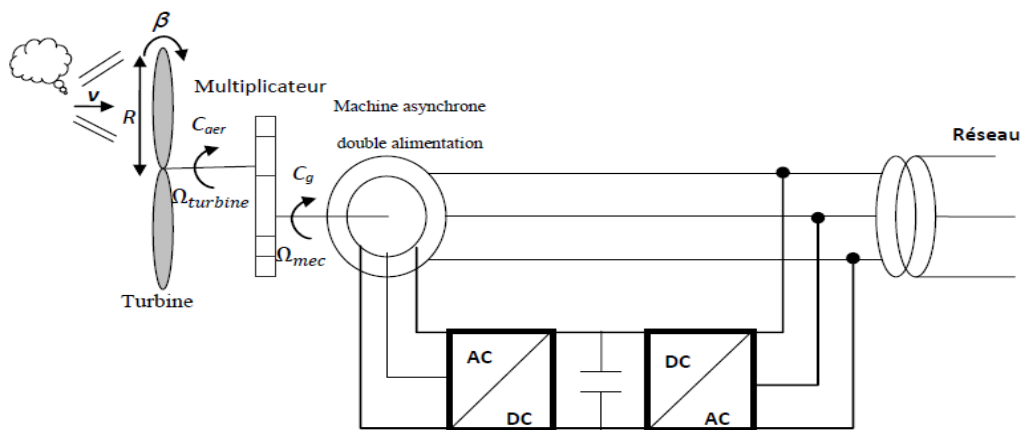


Fig.(1.15) : Machine asynchrone à double alimentation [9]

### 10.1.5. La structure d'alimentation de Kramer

comporte un redresseur à diodes sur le côté du rotor et un onduleur non autonome sur le côté réseau, figure.(1.16) L'onduleur à thyristors non autonome applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone. Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau [1]

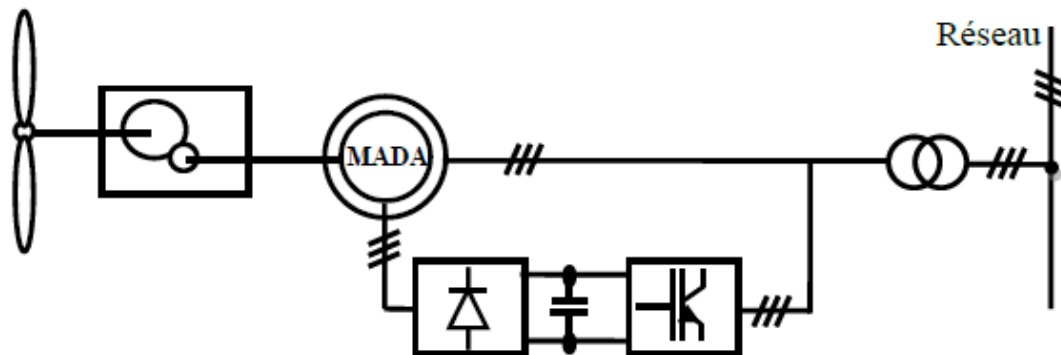


Fig.(1.16) : Structure de kramer [1]

### 10.1.6. Machine asynchrone à double alimentation– structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Quand on remplace l'association redresseur - onduleur par un cyclo-convertisseur Figure (1.17) pour autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé « structure de Scherbius ». La plage de variation de vitesse est doublée par rapport à la structure de la Figure.(1.17) [14]

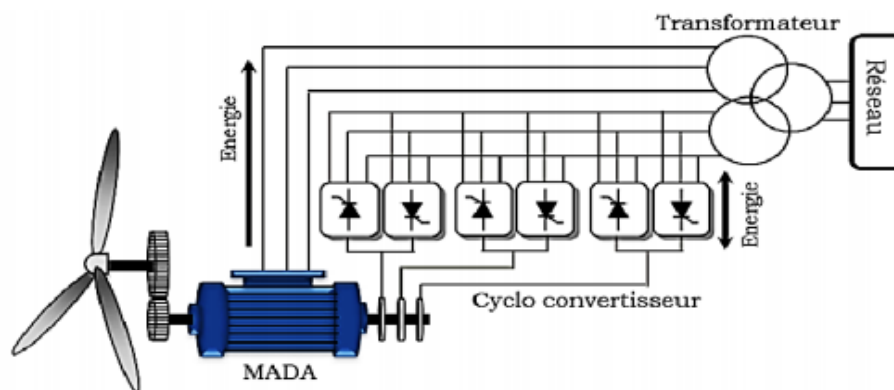
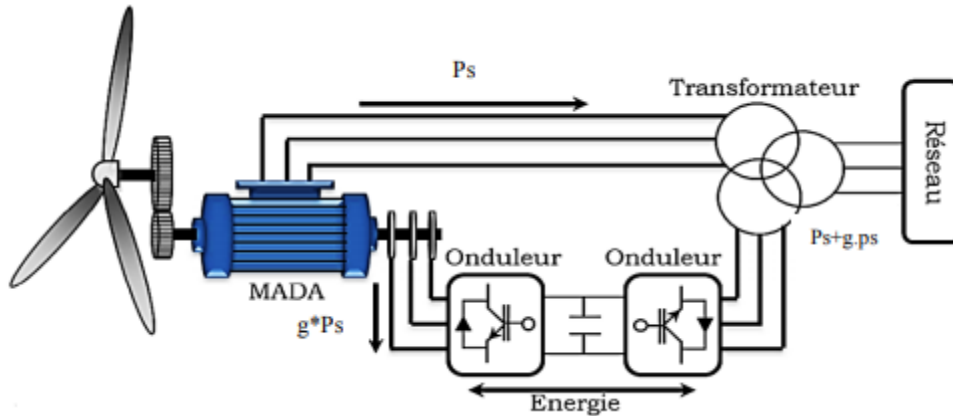


Fig.(1.17) :Structure de Scherbius avec cyclo-convertisseur.[14]

### 10.1.7. Structure Back-to-back

Ce choix de structure permet d'agir sur deux degrés de liberté pour chaque convertisseur : un contrôle du flux magnétique et de la vitesse de la MADA du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitées du côté du réseau.



**Fig.(1.18) :** MADA avec structure back-to-back.[14]

Les avantages de cette cascade de convertisseurs sont les suivants :

- Le flux d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel. Les limites de ce flux reposent sur la marge de variation de la vitesse de rotation. Celle-ci est imposée par les limites électriques et mécaniques du système.
- Le fonctionnement autour de la vitesse de synchronisme est adéquat.
- Il y a une faible distorsion des tensions et courants rotoriques et des courants statoriques.
- Le contrôle du couple de la génératrice est indépendant de celui de la puissance réactive injectée par le rotor.
- Cette configuration permet une variation de 100% de la vitesse du vent en utilisant des pâles orientables. Les convertisseurs ne sont dimensionnés que pour seulement 30% de la puissance nominale de la génératrice donc les pertes dans les convertisseurs sont peu importantes [14]

### 10.2. La génératrice synchrone

La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'un entraînement direct lorsque la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que la génératrice soit raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure.

Le rotor est l'inducteur et le stator est l'induit. Le stator est constitué d'enroulements qui vont être le siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux du champ magnétique due au

mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit. Cette technologie est privilégiée dans le cas des éoliennes offshore car la maintenance est réduite par rapport à une technologie utilisant une boîte de vitesse.

### 10.2.1. Génératrice à aimants permanents

Le rotor est constitué d'aimants permanents ou MSAP (générant donc un champ constant), dans ce cas la tension délivrée par la machine n'est pas réglable (si on ne tient pas compte des pertes dans les conducteurs). Les alternateurs à aimants permanents produisent un courant et une tension de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation donc à la vitesse du vent. La source d'excitation du rotor est indépendante du réseau contrairement à la machine synchrone à électroaimant. Ce type de machine tend à être de plus en plus utilisé par les constructeurs d'éoliennes car elle peut fonctionner en mode autonome et sont beaucoup plus légères que les autres types de générateurs. Les coûts de ce type de génératrice sont les plus faibles. Ce type de génératrice est très fréquemment utilisé dans le petit éolien.

Les génératrices à aimants permanents ont l'inconvénient de toujours produire la même densité de flux magnétique quelle que soit la vitesse de rotation du rotor. Le rotor est donc difficile à démarrer car la résistance au mouvement est importante, son démarrage nécessite un vent relativement important.[15]

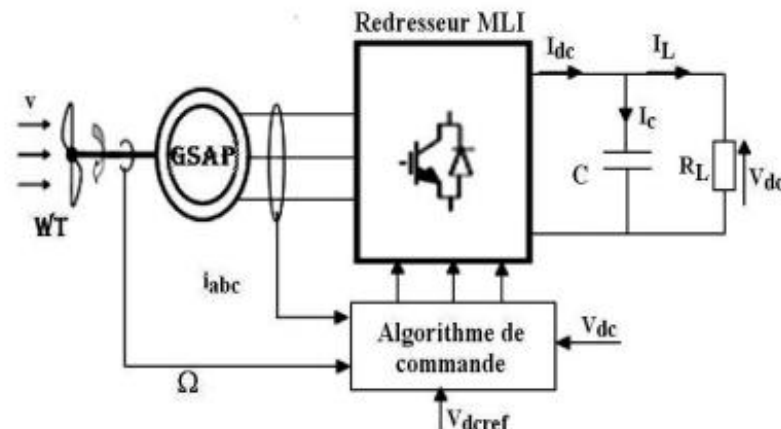


Fig.(1.19) : Machine synchrone à aimants permanents[16]

### 10.2.2. Génératrice synchrone à électroaimants

Dans le rotor d'une éolienne avec une génératrice synchrone, on installe normalement des électroaimants alimentés par courant continu du réseau électrique. Comme le réseau électrique fournit du courant alternatif, il faut le convertir en courant continu avant qu'il soit envoyé aux bobines roulées autour des électroaimants du rotor.

Les électroaimants du rotor sont branchés au courant au moyen de brosses et de bagues collectrices fixées à l'arbre de la génératrice.[11]

### 10.3. Génératrice à réductance variable

Le principe des machines à réductance variable (MRV) est basé sur celui de l'électroaimant. En fait, il s'agit de la plus ancienne méthode de conversion électromécanique. Toute machine à réductance variable est constituée de deux parties en mouvement relatif dont l'une est électriquement active (stator) et l'autre passive (rotor). La première comprend un circuit magnétique denté muni de bobinages, la seconde est simplement un circuit ferromagnétique, lui aussi denté, mais sans aucun conducteur ni aimant.

La machine à réductance variable à double saillance (MRVDS) dont les phases sont alimentées en courants unidirectionnels par des convertisseurs à demi-ponts asymétriques, constitue certainement la solution la plus économique grâce aux matériaux utilisés (tôles fer-silicium et cuivre) et à sa simplicité de fabrication (empilage de tôles, bobines préfabriquées, rotor passif naturellement équilibré...). Ses performances peuvent être comparables à celles des machines à aimants permanents. Elle peut aussi fonctionner à puissance maximale constante. Mais elle produit un couple très pulsatoire à haute vitesse et génère un bruit acoustique supérieur à tous ses concurrents. [17]

#### 10.3.1. MRV à stator lisse non excitée

Dans ces structures, le stator est identique à celui d'une « machine alternative » classique. Le champ magnétique est produit par le seul bobinage d'induit logé au stator figure.(1.20). Le rotor tourne à la vitesse du champ, en offrant, à tout instant, une réductance d'entrefer minimale au passage des lignes de champ.

Le fonctionnement synchrone est assuré par la condition  $Nr=2p$ .

En régime permanent, les dents rotoriques sont traversées par un flux constant, ce qui implique une absence des courants induits au rotor. Par conséquent, ce dernier peut être réalisé en fer massif, ce qui rend ces structures particulièrement adaptées aux applications à grande vitesse. D'autre part, la simplicité de leur commande les rend attractives pour des applications à vitesse variable.

Pour améliorer les performances de ce type de machines (facteur de puissance, rendement, couple) plusieurs travaux ont été entrepris. Les résultats ont montré que les performances sont nettement meilleures en utilisant des structures à guides de flux [17]



Fig.(1.20) : MRV à stator lisse non excitée

### 10.4. Autres générateurs

Il y a beaucoup de générateurs qui peuvent être utilisés dans les systèmes éoliens, mais ils n'ont pas de retour élevé :

#### 10.4.1. dynamo

Aussi appelée génératrice de courant continu, se compose de 2 parties :

- l'inducteur est un circuit magnétique (bobine magnétisante) dont le but est de créer un champ magnétique dans l'entrefer
- l'enroulement d'induit dans lequel on récupère l'énergie électrique produite par la rotation du rotor

Afin de récupérer l'énergie produite, l'induit comporte un collecteur.

Le courant de sortie est proportionnel à la fréquence de rotation et est directement utilisable pour charger une batterie mais nécessite une conversion continu → alternatif pour une injection du courant dans le réseau électrique. L'entretien d'une génératrice à courant continu est plus fréquent car il faut changer régulièrement les balais assurant la liaison avec le collecteur rotatif.[11]

### 11. Les Avantages de l'éolien

- 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.
- Énergie renouvelable dont le gisement n'est pas épuisable à l'échelle de temps des civilisations humaines
- 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 (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes 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
  - L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.
  - 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.
  - Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.
  - Le prix de revient d'une éolienne va probablement diminuer dans les années à venir suite aux économies d'échelle qui pourront être réalisées sur leur fabrication.

- Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original.[11]

### 12. Les Inconvénients

- Impact sur le paysage :  
Installée sur des parties élevées collines etc. hauteur du mat de 120 m mais subjectif selon les personnes, bien accepté actuellement par les populations (selon les sondages) non riveraines,
- Bruit :  
Une éolienne de 500 kW produit un bruit d'environ 50 dB à 150 m (faible) et au-delà de 400 m pratiquement inaudible par rapport au bruit du vent lui-même.
- Production intermittente : une éolienne ne fournit sa puissance nominale que dans une fourchette de vitesse de vent assez restreinte ; trop lent, le vent n'entraîne pas les pales assez vite, trop rapide, il les entraînerait trop vite et il faut réduire la vitesse de rotation en faisant pivoter les pales.
- Nécessité d'une installation de substitution (actuellement thermique donc avec rejet de CO<sub>2</sub>) pour couvrir la puissance installée en situation d'absence de vent.
- Emprise au sol :

Pour un champ d'éoliennes la puissance délivrée par unité de surface est à peu près indépendante de la taille de l'éolienne car les éoliennes plus puissantes doivent être plus espacées pour que le vent soit efficace sur toutes les éoliennes. Concrètement la densité de puissance nominale d'un champ d'éolien, dans une zone favorable, est de l'ordre de 10 MW par km<sup>2</sup> soit une production annuelle de l'ordre de 20 GWh par km<sup>2</sup>.

- Il faudrait couvrir une bande de terrain de presque 400 Km de long sur 1 Km de large pour produire la même quantité d'électricité qu'un réacteur nucléaire
- Mort d'oiseaux : 0,8 mort d'oiseaux /an/éolienne, ce qui est faible.

### 13. Conclusion:

Dans ce chapitre, un état de l'art sur l'énergie éolienne et une étude descriptive de l'ensemble des éléments constituant la chaîne de conversion d'énergie éolienne ont été présentés où nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. En plus les avantages et les inconvénients de chaque type, Nous avons choisi le type de turbine horizontale à appliquer à l'étude pour ses avantages.

Nous avons également étudié les générateurs les plus couramment utilisés pour convertir l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique, y compris les générateurs asynchrones à doubles alimentatio

# Chapitre 02:

## Modélisation d'un système éolien

## 1. Introduction

Le système de conversion de la vitesse du vent variable comprend Double machine d'alimentation asynchrone, turbine entraînée par le vent connecté à deux convertisseur bidirectionnels MLI, est le système le plus largement utilisé pour convertir l'énergie éolienne a cause des avantages qu'il apporte. Dans ce chapitre, nous allons nous concentrer sur la modélisation Pour chacun de ces éléments de chaîne de conversion.

- La première partie est dédiée à la modélisation La partie mécanique de l'éolienne, où le modèle de la turbine a étudié en détail. Après cela, nous allons calculer l'énergie maximale peut être extrait en utilisant la limite de Betz.

-La deuxième partie est consacrée à la modélisation et à la simulation. Machine asynchrone à Double alimentation et son alimentation

## 2. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

L'éolienne est un système complet permettant de convertir l'énergie (mécanique) du vent en énergie électrique.

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.

### 2.1. Loi debetz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (2.01) sur lequel on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne  $V_1$  et la vitesse du vent après passage à travers le rotor  $V_2$  soit  $\frac{V_1 + V_2}{2}$ , la masse d'air en mouvement de densité  $\rho$  traversant la surface  $S$  des pales en une seconde est :

$$m = \rho * S * \frac{V_1 + V_2}{2} \tag{2.1}$$

La puissance  $P_m$  alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{1}{2} * m * V^2 \tag{2.2}$$

Soit en remplaçant  $m$  par son expression dans (2.1) :

$$P_m = \frac{\rho * S * (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \tag{2.3}$$

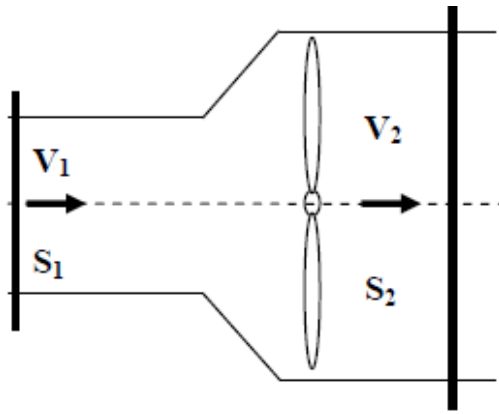


Fig.(2.01) : Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface  $S$  sans diminution de vitesse, soit à la vitesse  $V_1$ , la puissance  $P_{mt}$  correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho * S * V_1^3}{2} \tag{1.4}$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \tag{1.5}$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus figure (2.02), on s'aperçoit que le ratio  $P_m/P_{mt}$  appelé aussi coefficient de puissance  $C_p$  présente un maximum de  $16/27$  soit  $0.59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de **Betz** qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

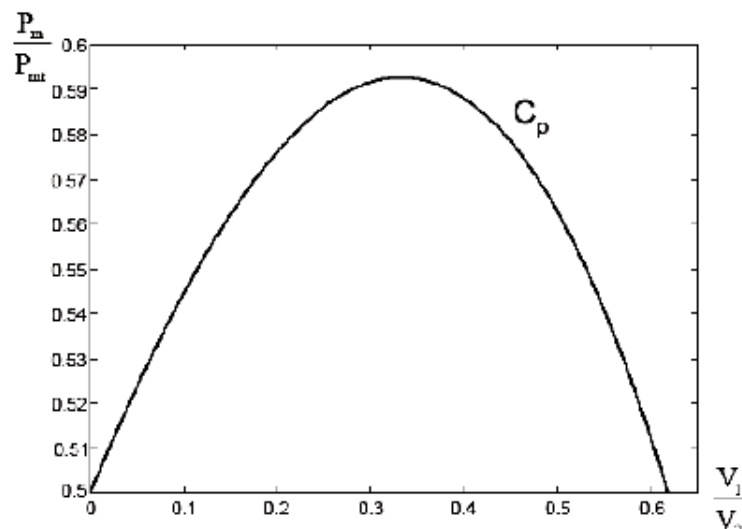


Fig.(2.02): Coefficient de puissance

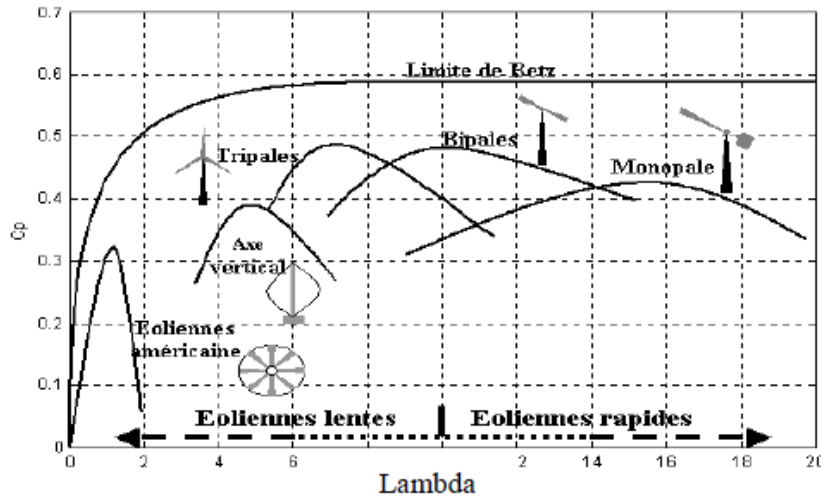


Figure. (2.03) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance Figure (2.03) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance Figure (2.02) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s[18].

**2.2. Production d'énergie mécanique :**

En combinant les équations (2.1), (2.4) et (2.5), la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) * \rho * \pi * R^2 * V_1^3 \tag{2.6}$$

Avec :  $\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1}$

$\Omega_1$  : vitesse de rotation avant multiplicateur et  $R$ : rayon de l'aérogénérateur.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse  $G$  , la puissance mécanique  $P_m$  disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left( \frac{\Omega_2 R}{k V_1} \right) \rho . \pi . R^2 V_1^3 \tag{2.7}$$

Avec

$\Omega_2$ : vitesse de rotation avant multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent figure (2.04)

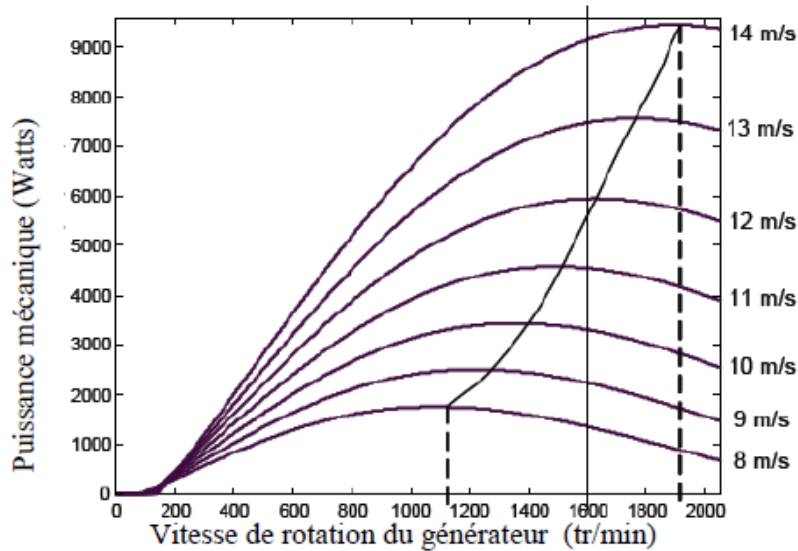


Fig.(2.04) : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Selon ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la figure (2.04) les maximum théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple

### 3. Stratégies de fonctionnement d'une éolienne

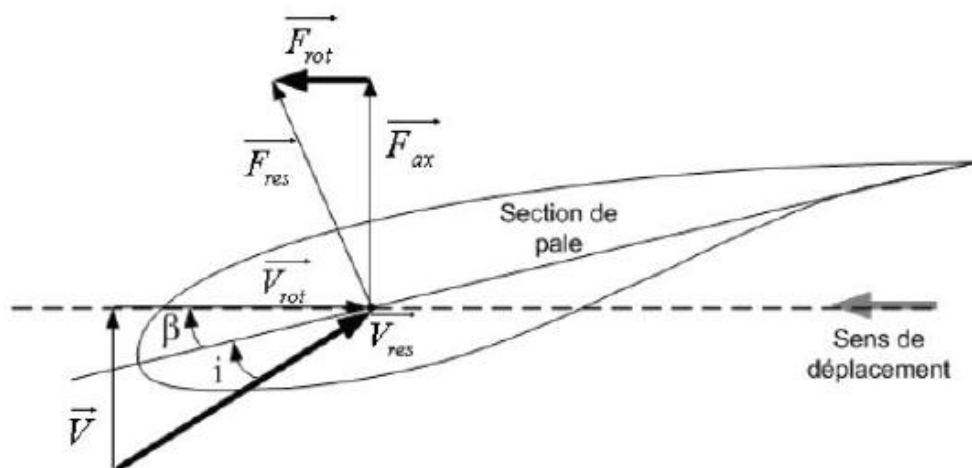


Fig.(2.05) : Bilan des forces sur une pale

### 3.1. Bilan des forces sur une pale

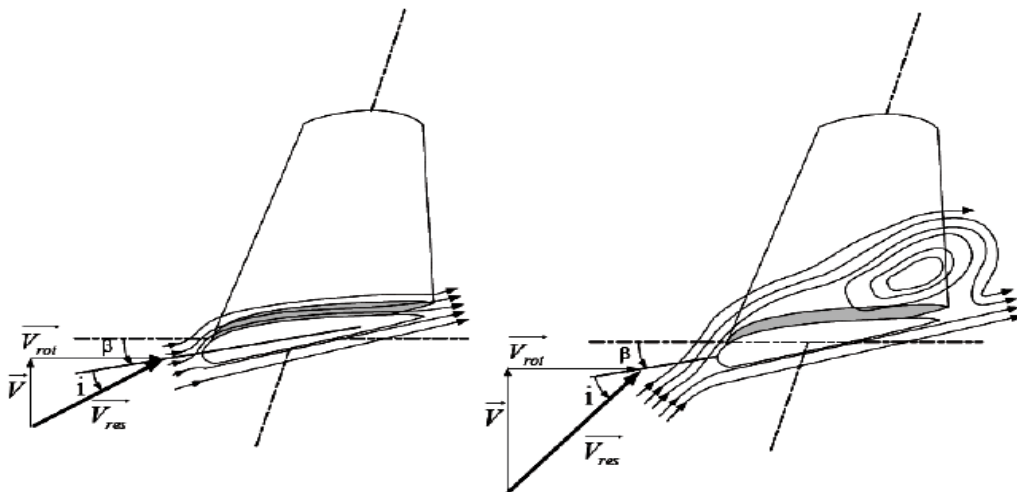
La Figure (2-05) représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur [19]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représentée par le vecteur  $V$ . Le vecteur  $V_{rot}$  représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée  $V_{res}$ .

L'action du vent sur la pale produit une force  $F_{res}$  qui se décompose en une poussée axiale  $F_{ax}$  directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation  $F_{rot}$  qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

## 4. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :

### 4.1. Système à décrochage aérodynamique "stall" :



**Fig.(2.06):** Flux d'air sur un profil de pale " stall "

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence  $i$  devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale Figure(2.05) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas,

être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent.

Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage  $\beta$  et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante [20].

#### 4.2. Système d'orientation des pales "pitch" :

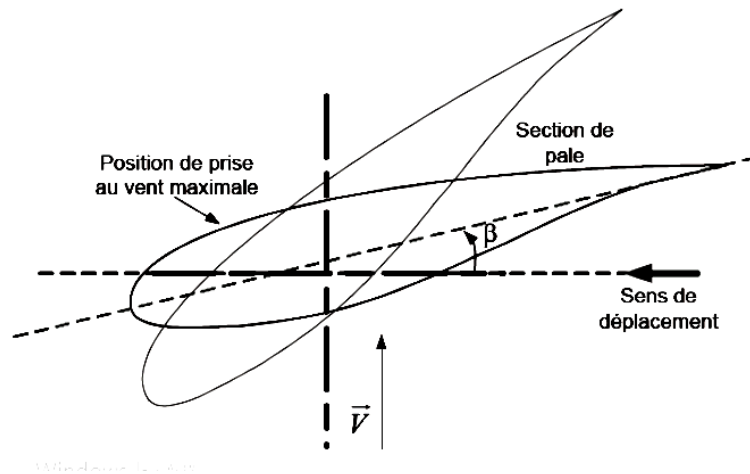


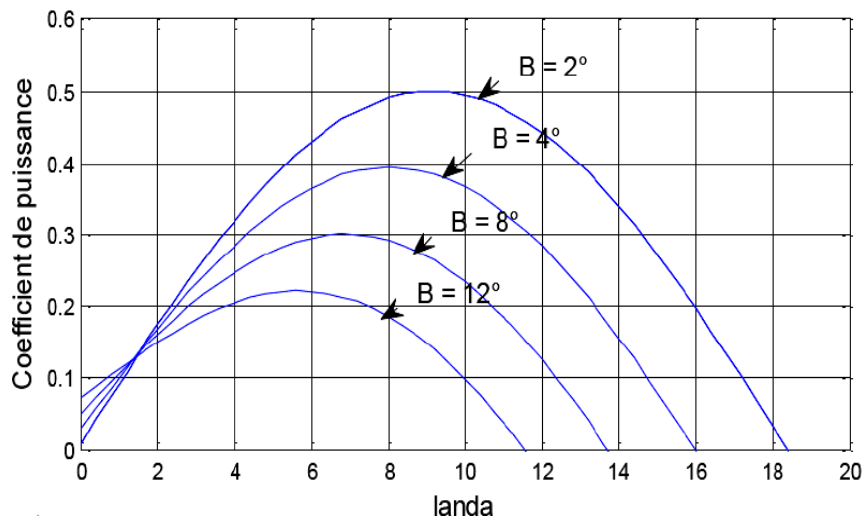
Fig.(2.07): Variation de l'angle de calage d'une pale

Ce système de régulation utilise l'angle des pales face au vent pour maintenir une vitesse de rotation constante. Il dévie la pale jusqu'à ce qu'elle prenne une position angulaire opportune à chaque variation de vent spécialement pour profiter au maximum du vent instantané ainsi mettre en contrôle la puissance en cas des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.

#### 5. Systèmes de régulation mécanique de la vitesse de rotation d'une éolienne

Si le vent est trop faible, la turbine n'est pas entraînée. Les pales sont immobiles. Un anémomètre mesure la vitesse du vent et dès qu'elle est assez élevée, supérieure à la vitesse qui permettra à l'éolienne pour démarrer, l'angle des pales va se fixer sur une valeur pour laquelle la puissance extraite est maximale. Puis, si le vent est trop élevé, on fait varier l'angle des pales pour ralentir la machine puisque le coefficient de puissance  $C_p$  se dégrade pour limiter la puissance à sa valeur nominale.

Dans les cas plus généralisés la variation de ce coefficient est représenté en fonction du ratio  $\lambda$  de vitesse et l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ .



**Fig.2.08** : Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe)

### 6. Différentes phases (zones) de fonctionnement d'éolienne à vitesse variable :

Il y a quatre zones de fonctionnement d'une éolienne intégrant une MADA, d'après [21] et , dont les deux sont à la plage de la production d'éolienne qui sont le fonctionnement à charge partielle et à pleine charge. Les deux zones qui restent sont alors hors de cette plage.

**-ZONE (I), ( $N < N_{dém}, P = 0$ )** : pour des vitesses du vent plus petites que la vitesse de Démarrage  $V_{dém}$ , l'énergie contenue dans le vent n'est pas suffisante pour entraîner la turbine et la puissance captée est nulle.

**-ZONE (II), ( $\lambda_{opt}, C_{pmax}, \beta = 1^\circ$ )** : pour des vitesses supérieures à celle de démarrage  $V_{dém}$ , et inférieures à celle nominale  $V_{nom}$ , dans cette zone que l'on nomme partial load, on cherche à extraire le maximum de puissance du vent. Le contrôle vise à faire varier la vitesse de rotation de l'éolienne de manière à rester aux alentours de  $\lambda_{opt}$ . Comme l'angle de calage est fixe, le coefficient de puissance de l'éolienne est alors égal à sa valeur maximale  $C_{pmax}$ .

**-ZONE (III), ( $N_{max}, P = P_{nom}$ )** : pour des vitesses du vent supérieures à celle nominale  $V_{nom}$  et plus petites que celle maximale  $V_{max}$ , la puissance captée est limitée à celle nominale  $P_{nom}$ . Cette zone correspond au régime de charge complète (*full load*). Le contrôle à pleine charge vise à conserver la puissance produite constante à cette valeur nominale en modifiant l'angle de calage des pales.

**-ZONE (IV), ( $N=0, P = 0$ )** : pour des vitesses supérieures à la vitesse extrême d'opération  $V_{max}$ , la turbine éolienne s'arrête, la puissance fournie s'annule.

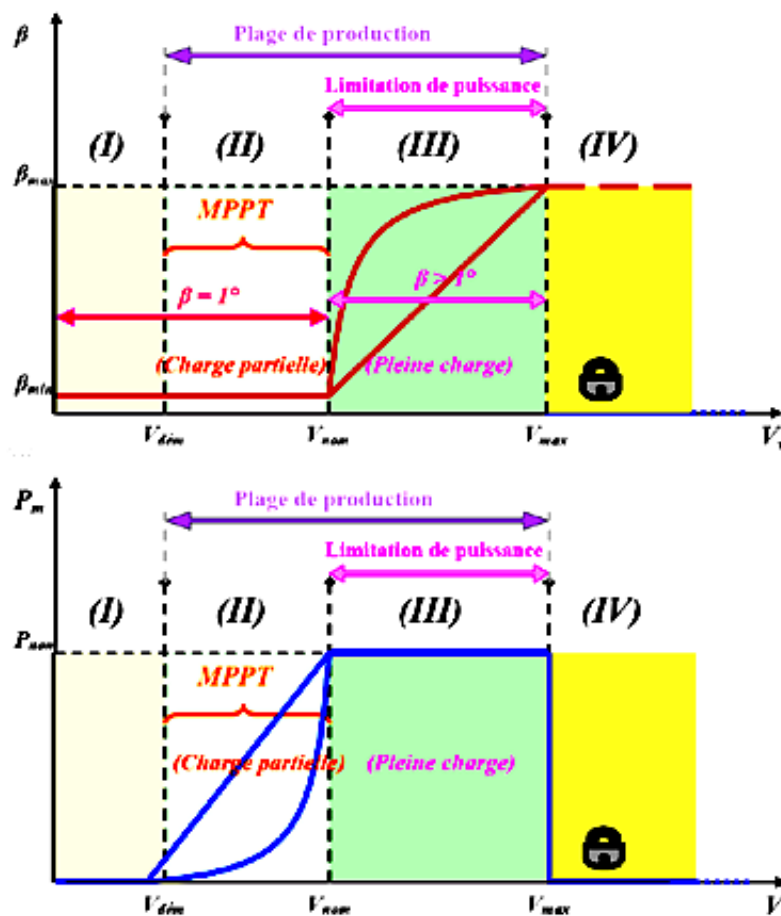


Fig.(2.09) : les zones de fonctionnement avec contrôle de l'angle de calage (pitch control)

7. Les différents types d'MPPT éoliens :

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient  $C_p$ . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. Pour cela, on peut distinguer deux approches (types) possibles [22] :

- La première, la moins classique, considère que la caractéristique  $C_p$  n'est pas connue;
- La seconde façon d'agir, plus répandue, suppose que cette caractéristique de voilure est connue. Il suffit de suivre la courbe de puissance optimale comme caractéristique de charge pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

7.1 Maximisation de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique de la voilure :

Pour l'étude de la commande permettant d'effectuer une recherche du point maximal de la puissance sans la connaissance de la courbe caractéristique  $C_p$ , une structure avec redresseur MLI triphasé peut être utilisée. Cette structure assure un contrôle dynamique en vitesse ou en couple de la génératrice asynchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de Fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation et ainsi d'effectuer par ce biais une

recherche de la puissance maximale souhaitée. En l'absence de toute connaissance des caractéristiques de voilure, des algorithmes de comportement sont à tenir afin de converger vers le point optimal. Ces algorithmes dépendent des variations de puissance  $\Delta P$  et de vitesse  $\Delta V$

Par exemple :

Si on mesure une augmentation de puissance  $\Delta P > 0$  suite à un incrément positif de vitesse, on doit continuer à accélérer la voilure ( $\Delta > 0 V_{ref}$ ). On se situe alors sur la partie gauche de la cloche

$P(\Omega)$ .

**7.2. Maximisation de la puissance avec connaissance de la courbe caractéristique de la voilure :**

Une autre façon de procéder consiste en un pseudo recherche du point maximal de puissance en connaissant la courbe caractéristique de la voilure éolienne à piloter. Ces méthodes permettent de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano-électrique, c'est-à-dire sans obligation de capture de la vitesse du vent.

Cette façon de procéder exige au constructeur de la voilure des essais de caractérisation(extérieur, soufflerie) ou des simulations du profil de pales.

**7.3. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :**

Si on suppose que la génératrice est idéale, donc quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique  $C_{em}$  développé est à tout instant égal à sa valeur de référence  $C_{em-ref}$ , (c.-à-d:  $C_{em} = C_{em-ref}$ ). Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine  $\Omega_t$  qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée .La vitesse de la génératrice  $\Omega_r$  égale à  $\Omega_t$  (pas de multiplicateur) est influencée par L'application de trois couples : le couple éolien  $C_g$ , le couple électromagnétique  $C_{em}$  et le couple résistant  $C_r$ . En regroupant l'action de ces trois couples on peut écrire [19]:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - C_{em} - C_r) \tag{2.8}$$

Avec

$J$  : l'inertie de la turbine plus l'inertie de la génératrice.

Cette structure de commande consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine  $C_{aer}$  de manière à fixer sa vitesse à une référence. Pour réaliser ceci, l'utilisation d'un asservissement de vitesse est indispensable. Alors le couple électromagnétique de référence  $C_{em-ref}$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique égale à la vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  est basé sur la relation suivante :

$$C_{em-ref} = F(s)(\Omega_{ref} - \Omega) \tag{2.9}$$

$F(s)$ : Fonction de transfert du régulateur de vitesse.

Cette vitesse de référence  $\Omega_{ref}$  dépend de la vitesse de la turbine à fixer  $\Omega_t$  pour maximiser la puissance extraite. La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle de la valeur optimale du ratio de vitesse  $\lambda_{cpmax}$  ( $\beta$  constant) permettant d'obtenir la valeur maximale de  $C_p$ . Alors on peut écrire [19] :

$$\Omega_{ref} = \frac{R.V}{\lambda_{opt}} \tag{2.10}$$

**7.4. Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :**

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J}(C_g - C_{em} - C_r) = 0 \tag{2.11}$$

**8. Modélisation de la turbine**

La modélisation de la turbine consiste à exprimer la puissance extractible en fonction de la vitesse du vent et des conditions de fonctionnement, cela permettra de connaître le couple éolien appliqué sur l'arbre lent de l'éolienne. Cette modélisation s'appuie sur des recoupements bibliographiques ou des informations extraites de brochures des différents constructeurs.[2]

**8.1. Source primaire : le vent**

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour.

Ces phénomènes modélisables correspondent à la partie déterministe des variations partiales du champ des vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont (bâtiments, arbres, autre éoliennes...) correspondent à la partie stochastique des variations partiales du champ des vitesses.

Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques. De nombreux travaux sur la modélisation du vent ont été réalisés, L'un des principes retenus consiste à générer l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert à déterminer. Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent[2]

**8.2. Expression du vent en un point fixe**

La vitesse du vent en un point  $V_0(t)$  peut-être décomposée en une somme : la composante moyenne  $V(t)$  (lentement variable) et la composante variable représentant les fluctuations  $V_i(t)$

$$V_0(t) = V(t) + V_i(t) \tag{2.12}$$

La composante  $V(t)$  est donnée par [1]:

$$V(t) = V_{moy} + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2665t) + \sin(1.293t) + 0.2 \sin(3.6645t) \tag{2.13}$$

La composante représentant la turbulence  $V_i(t)$  est caractérisée par l'échelle de longueur  $L_v$ , et l'écart type  $\sigma_v$  de cette turbulence. L'échelle de longueur de la turbulence est associée à la taille moyenne des tourbillons. La définition de la composante turbulente se fait en 2 étapes[1]:

- 1<sup>ère</sup> étape : reconstitution du spectre de la turbulence à partir d'un bruit filtré. Il est possible de l'approché par la fonction de transfert sous la forme suivante :

$$\phi(s) = \frac{K_v \cdot (m_1 \cdot T_v \cdot s + 1)}{(T_v \cdot s + 1)(m_2 \cdot T_v \cdot s + 1)} \tag{2.14}$$

Avec  $m_2 = 0.25$  et  $m_1 = 0.4$

Le calcul des paramètres mathématiques  $K_v$  et  $T_v$ , est assez complexe. Ils peuvent être donnés par les relations suivantes [1] :

$$T_v^i = \frac{L_v}{V_i(t)} \tag{2.15}$$

$$\sigma_v^{(i)} = k_{\sigma,v} \cdot V_i(t) \tag{2.16}$$

$$K_v^{(i)} \approx \sqrt{2\pi \cdot \frac{T_v^i}{T_s}} \tag{2.17}$$

- 2<sup>ème</sup> étape : définition de l'écart type de la turbulence  $\sigma_v$ , l'écart type dépend de la vitesse moyenne  $V(t)$  et d'un coefficient  $K_\sigma$  qui représente l'intensité de la turbulence.

$$\sigma_v = K_\sigma \cdot V(t) \tag{2.18}$$

Ainsi, à partir d'un bruit blanc gaussien en entrée, il est possible de déterminer la composante de la turbulence et donc de générer une série temporelle de la vitesse  $V_0(t)$  du vent en un point comme présente sur la figure (2.10), le vent est défini par 3 paramètres

- une vitesse lentement variable  $V(t)$
- un coefficient de variance  $K_\sigma$  (compris entre 0.1 en mer et 0.25 dans une zone turbulente)
- une échelle de longueur de turbulence  $L_v$ . (compris entre 100 en mer et 500 dans une zone turbulente)

Pour notre cas, nous avons choisi un jeu de paramètres correspondant à un site côtier ( $K_\sigma = 0.13$  et  $L_v = 125$ ) [1].

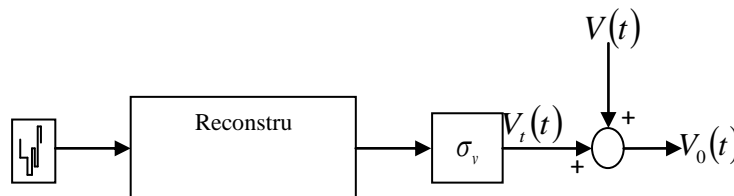


Fig.(2.10) : Construction d'une série temporelle de la vitesse du vent

8.3. Filtre spatial:

La vitesse du vent en un point de l'aire balayée par l'aéroturbine doit permettre de retrouver le couple éolien proche de celui que produirait le champ de vitesse du vent réel incident sur toute l'aire balayée par le rotor. Il a été démontré expérimentalement que seules les composantes basses fréquences du vent incident se retrouvaient dans le couple total produit par les pales. Par contre, l'aéroturbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue cet effet en appliquant sur la vitesse instantanée du vent un filtre dont la fonction de transfert est donnée ci-dessous :

$$H_f(s) = \frac{\sqrt{2} + b.s}{(\sqrt{2} + b.\sqrt{a}.s)\left(\frac{b}{\sqrt{a}}.s + 1\right)} \tag{2.19}$$

Le paramètre  $a$  est empirique et vaut 0.55. Le paramètre  $b$  est fonction entre autre du rayon des pales de l'éolienne  $R$ . La figure(2.12) montre l'évolution de la vitesse du vent avant et après le filtre spatial [23].

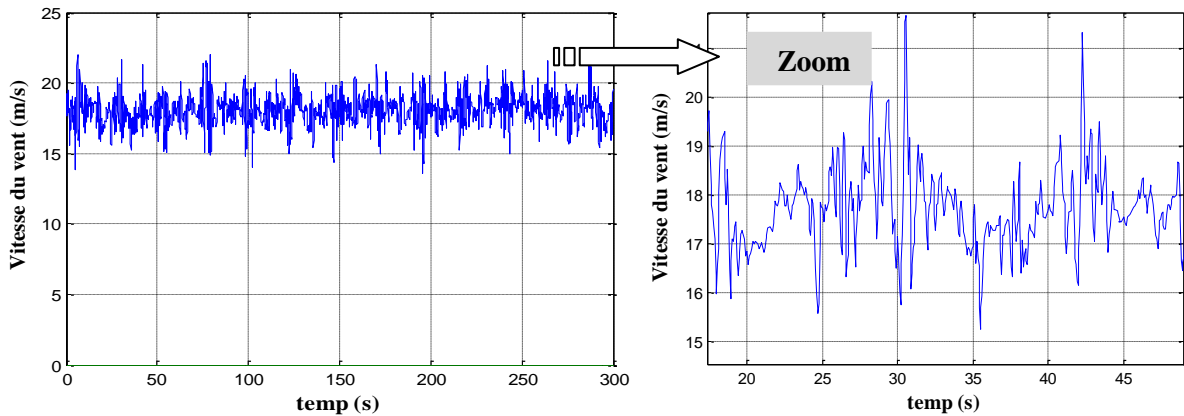


Fig.(2.11) :Profil du vent duré de 300s

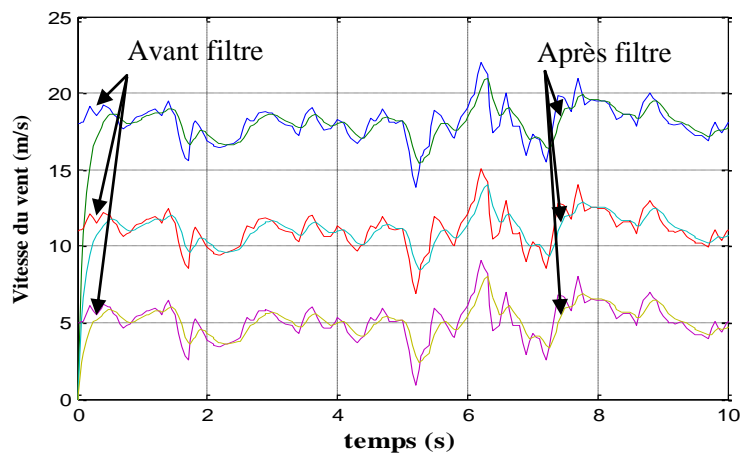


Fig.(2.12) : Définition de 3 niveaux du vent avant et après le filtre spatial

**9. Modèle de la turbine**

La modélisation de la turbine éolienne est basée sur la loi de betz. L'expression de la puissance totale du vent  $P_{mt}$  en fonction de la vitesse du vent  $V$ , la surface biliée par les pales  $S$ , la densité d'air  $\rho$  est donnée par:

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \tag{2.20}$$

La puissance mécanique de la turbine éolienne est déterminée par :

$$P_m = P_v \cdot C_p(\lambda, \beta) \tag{2.21}$$

Où le coefficient de la puissance  $C_p$  est en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit[24] :

$$\lambda = \frac{R \times \Omega_t}{V_v} \tag{2.22}$$

Avec:  $\Omega_t$  la vitesse angulaire de la turbine (rad/s). ,  $R$  longueur des pales.

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne, l'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine, par l'équation suivante [25]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-(\lambda_i)^{-21}} \tag{2.23}$$

Avec :  $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$

On suppose que la vitesse de la turbine n'est pas réglable ainsi que l'angle de calage  $\beta$ . Nous allons donc prendre en compte cette approximation. Dans ce sens nous présentons la courbe de variation du coefficient de puissance  $C_p$  et celle de la puissance mécanique en fonction de  $\lambda$  (rapport de vitesse spécifique) et ces différentes valeurs de calage des pales.

La figure (1.24.a) représente la caractéristique  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  avec des différentes valeurs de l'angle de calage  $\beta$ . La valeur maximale de  $C_p$  ( $C_{pmax}=0.42$ ) est atteinte pour  $\beta=1^\circ$  et  $\lambda = 8$ . Cette valeur particulière de  $\lambda$  est définie comme la valeur nominale  $\lambda_{opt}$ . Afin d'optimiser la conversion de puissance, il faut donc essayer de conserver cette vitesse réduite, c'est-à-dire modifier la vitesse de rotation lorsque la vitesse du vent varie.

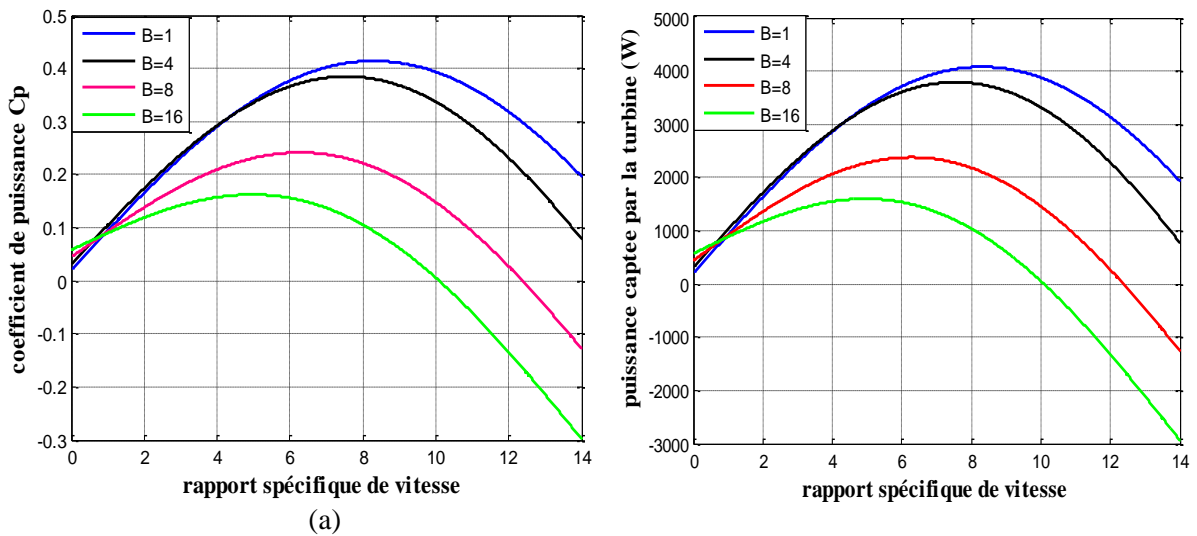


Fig.(2.13) :(a) Coefficient de la puissance et (b) puissance mécanique de la turbine

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par : [24]

$$C_{aer} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\Omega_t} \rho . S . V^3 \tag{2.24}$$

**9.1. Modélisation de l'arbre de la machine :**

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et générateur est donnée par :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_r}{dt} = C_g - C_{em} - (f_m + f_t) \Omega_r \tag{2.25}$$

- Où:  $J_t$  et  $J_m$  sont les inerties de la turbine et de la machine respectivement,  $f_m$  le coefficient de frottement de la machine,  $f_t$  le coefficient de frottement des pales et  $C_g$  le couple statique fournie par l'éolienne.

Dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure ne sera pas pris en compte). Le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par[26]:

$$C_g = J_t \frac{d\Omega_r}{dt} + C_{em} + f_m \cdot \Omega_r \tag{2.26}$$

**9.2. Modélisation du multiplicateur :**

Le multiplicateur de gain  $G$  permet d'adapter les grandeurs mécaniques (la vitesse et le couple) de la turbine et la génératrice qui s'exprime:

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{G} \tag{2.27}$$

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \tag{2.28}$$

En se basant sur les équations précédentes, on peut donner Le schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine comme il est présenté dans la figure (2.14) :

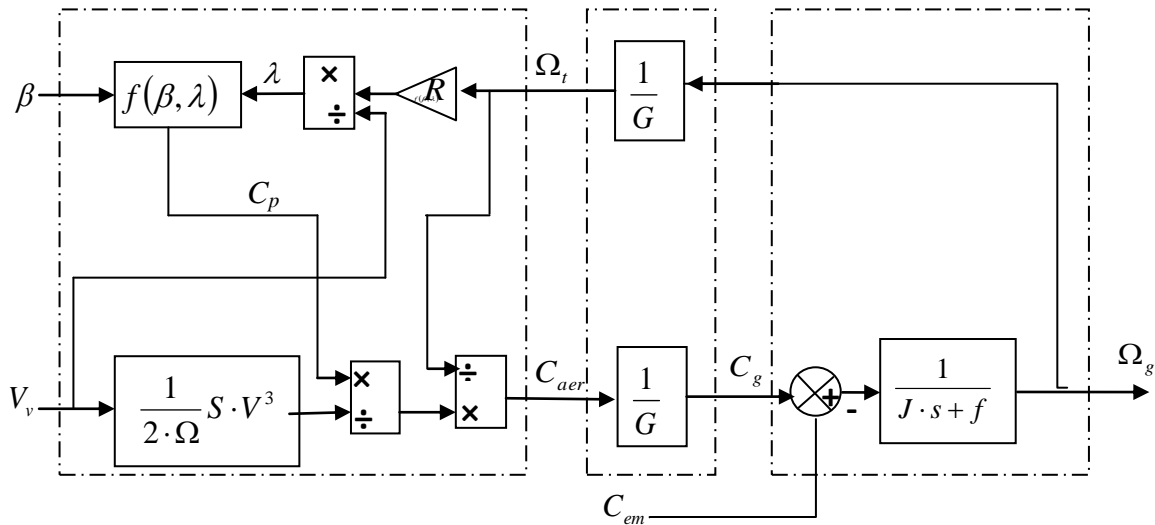


Fig.(2.14) : Schéma synoptique du modèle dynamique de la turbine éolienne

**10. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation :**

**10.1. Structure de la machine :**

Une MADA a un stator identique à celui (d'une machine asynchrone à cage ou d'une machine synchrone). C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écuriel mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statoriques.

On peut voir sur la figure (2.15) que les enroulements rotoriques sont connectés en étoile et les trois phases sont reliées à un système de contacts glissants (balais-bagues collectrices) permettant d'avoir accès aux tensions et courants du rotor[25]

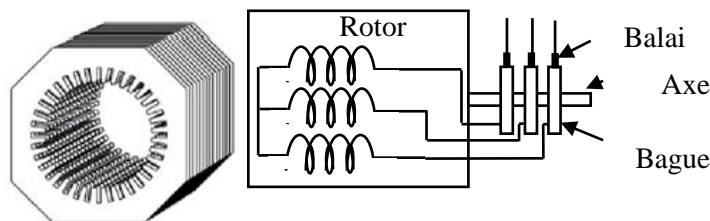


Fig.2.15 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

**10.2.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone a double alimentation**

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de *f<sub>nms</sub>* des enroulements statoriques

tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire  $\omega_s = 2\pi \cdot f_s$ , et le rotor tourne avec la vitesse  $\omega_r$ , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des  $f_{rms}$  des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_{gl}$  telle que :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = \omega_s \cdot g \tag{2.29}$$

- Où :  $g$  est le glissement et  $\omega_{gl}$  est la vitesse angulaire de glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme, les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés.

Pour que la rotation du vecteur résultant des  $f_{rms}$  par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence  $f_r$ , définie à partir de  $\omega_{gl} = 2\pi \cdot f_r$ ; c'est à dire :

$$f_r = f_s \cdot g \tag{2.30}$$

### 10.3. Modélisation de la machine à double alimentation

La machine asynchrone est représentée sur la figure (2.16) par ces six enroulements dans l'espace électrique. L'angle  $\theta$  repère le décalage de l'axe de la phase rotorique ( $OAR$ ) par rapport à l'axe fixe de la phase statorique ( $OAS$ ).



Fig.(2.16) : Représentation schématique d'une MADA

### 10.4. Hypothèses simplificatrices :

Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est reparti de manière à donner une f.m.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.

Nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et effet de peau.

Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.

Ces choix signifient entre autres que :

- Les flux sont additifs.
- Les inductances propres sont constantes.
- Il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

**10.5. Modèle de la MADA dans le repère abc :**

Avec les hypothèses citées ci dessus, les équations électriques des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases} \quad (2.31)$$

Avec :

$$\text{Grandeurs statoriques : } \begin{cases} [V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T \\ [I_s] = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T \\ [\Phi_s] = [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T \end{cases},$$

$$\text{Grandeurs rotoriques : } \begin{cases} [V_r] = [V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T \\ [I_r] = [I_{ar} \ I_{br} \ I_{cr}]^T \\ [\Phi_r] = [\Phi_{ar} \ \Phi_{br} \ \Phi_{cr}]^T \end{cases},$$

Les flux statorique et rotorique en fonction des courants, des inductances propres et des inductances mutuelles, sont exprimés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \\ [\Phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \end{cases} \quad (2.32)$$

Où :

: sont les matrices des résistances statoriques et rotoriques.  $[R_s], [R_r]$

: sont les matrices des inductances propres statoriques et rotoriques.  $[L_s], [L_r]$

: sont les matrices des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.  $[M_{sr}], [M_{rs}]$

: sont les matrices des inductances mutuelles statorique-statorique et rotorique-rotorique.  $[M_{ss}], [M_{rr}]$

Avec :

$$\begin{cases} [R_s] = R_s \cdot [I]_{3 \times 3} \\ [R_r] = R_r \cdot [I]_{3 \times 3} \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} [L_s] = L_s \cdot [I]_{3 \times 3} \\ [L_r] = L_r \cdot [I]_{3 \times 3} \end{cases} \quad (2.34)$$

$$[M_{ss}] = M_{ss} \begin{bmatrix} 0 & \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & 0 & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

$$[M_{rr}] = M_{rr} \begin{bmatrix} 0 & \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & 0 & \cos(2.\pi/3) \\ \cos(2.\pi/3) & \cos(2.\pi/3) & 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$[M_{sr}] = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2.\pi/3) & \cos(\theta - 4.\pi/3) \\ \cos(\theta - 4.\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta - 2.\pi/3) \\ \cos(\theta - 2.\pi/3) & \cos(\theta - 4.\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^T \quad (2.38)$$

Avec :

: est la matrice identité d'ordre 3.  $[I]_{3 \times 3}$

: sont les résistances statorique et rotorique par phase.  $R_s, R_r$

: sont les inductances statorique et rotorique par phase.  $L_s, L_r$

$M_{ss}, M_{rr}$  : sont les maximums des inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques respectivement à axes confondus.

: est le maximum d'inductance mutuelle entre une phase statoriques et entre une phase rotorique  $M$  pour  $\theta = 0$ .

L'énergie magnétique peut être calculée à partir de l'expression suivante :

$$W_{mag} = \frac{1}{2} ([I_s]^T [\phi_s] + [I_r]^T [\phi_r]) \quad (2.39)$$

Le couple électromagnétique s'exprime par le dérivé de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [27] :

$$C_e = \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{geom}} = p \cdot \frac{\partial W_{mag}}{\partial \theta_{elect}} \quad (2.40)$$

On peut déduire :

$$C_e = \frac{p}{2} [I_s]^T \left( \frac{d[M_{sr}]}{d\theta_{elect}} \right) [I_r] \quad (2.41)$$

L'équation du mouvement (mécanique) est :

$$J_m \frac{d\Omega_r}{dt} + f_m \cdot \Omega_r = C_{em} - C_r \quad (2.42)$$

Où :

$$\Omega_r = \frac{\omega_r}{np} \tag{2.43}$$

Avec :  $J_m$  moment d'inertie de la machine,  $C_{em}$  couple électromagnétique,  $C_r$  couple résistant, et  $f_m$  coefficient de frottement de la machine.

Nous constatons la complexité des équations électriques et l'équation mécanique de la machine asynchrone qui ne peuvent être facilement exploitées à cause des dimensions des matrices entrant dans les calculs et de la dépendance de la matrice inductance vis à vis de la position de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique, qui est variable dans le temps.

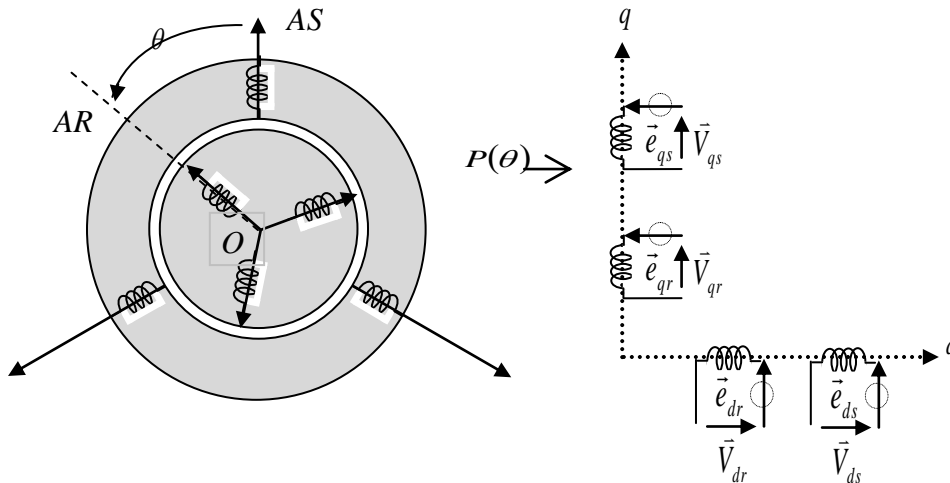
**10.6.Changement de repère :**

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations de la machine plus simple à exploiter. Dans notre étude nous avons utilisé la transformation de Park

**10.6.1. La transformation de Park :**

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère (d, q) tournant dont l'orientation est a priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en une machine diphasée équivalente [28].

Cette transformation qui permet le passage du système triphasé au système biphasé s'effectue en faisant correspondre aux variables réelles leurs composantes homopolaires, directes et en quadrature, figure (2.17).



**Fig.(2.17) :** Représentation de la MADA dans le repère de Park

Donc pour le passage du système triphasé au système biphasé en utilise la matrice  $P(\theta)$ :

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2.44)$$

Le changement de variables relatifs aux courants, tensions et flux est défini par la transformation (2.45) :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [P(\theta)] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Avec  $x$  : tension, courant ou flux, et les indices suivant représentent :

- $o$  : indice de l'axe homopolaire.
- $d$  : indice de l'axe direct.
- $q$  : indice de l'axe en quadrature.

et pour la transformation inverse on utilise la matrice  $[P(\theta)]^{-1}$  :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Alors les variables réelles sont obtenues à partir des variables biphasées

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P(\theta)]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

### 10.6.2. Equations électriques et magnétiques dans le système d'axes ( $d, q$ ) :

Les expressions des tensions statorique et rotorique suivant l'axe ( $d, q$ ) sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \omega_{coor} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + \omega_{coor} \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (\omega_{coor} - \omega_r) \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (\omega_{coor} - \omega_r) \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.48)$$

Avec :  $\omega_{coor}$  : Vitesse du système d'axe ( $d, q$ ).

Les expressions des flux statoriques et rotoriques dans le système (d, q)

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.49)$$

### 10.6.3. Choix du référentiel :

Pour étudier la théorie des processus transitoires des machines électriques, il est recommandé de choisir un système d'axes de référence qui permet d'aboutir au système différentiel le plus simple possible, car le résultat final est indépendant du choix du système de coordonnées. On trouve que le calcul peut être plus ou moins complexe.

A partir du système d'axe (d, q) on peut avoir d'autres axes qui sont des cas particuliers. Dans la suite, les composantes homopolaires sont supposées nulles :

- Référentiel fixé par rapport au stator :  $\omega_{coord} = 0$
- Référentiel fixé par rapport au rotor :  $\omega_{coord} = \omega_r$
- Référentiel fixé par rapport au champ tournant :  $\omega_{coord} = \omega_s$

Cette dernière représentation qui fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales en régime permanent, la conception du contrôle vectoriel par orientation du flux nécessite ce choix et les modèles d'action dépendent de la position du référentiel par rapport aux divers axes de flux.

### 10.6.4 Modèle biphasé de la MADA lié au champ tournant :

On exprime les tensions par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (2.50)$$

Avec :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (2.51)$$

D'autre par, on peut déduire l'expression de la puissance électromagnétique de la machine dans le repère de Park après le calcul de la puissance instantanée comme suit [27]:

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[ (V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs}) + (V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr}) \right] \quad (2.52)$$

En remplaçant  $V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}$  et  $V_{qr}$  par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = P_{js}(t) + P_{jr}(t) + P_{mgs}(t) + P_{mgr}(t) + P_{em}(t) \quad (2.53)$$

: représente les pertes joule dans l'enroulement de stator.  $P_{js}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_s \cdot (I_{ds}^2 + I_{qs}^2)$

: représente les pertes joule dans l'enroulement de rotor.  $P_{jr}(t) = \frac{3}{2} \cdot R_r \cdot (I_{dr}^2 + I_{qr}^2)$

$P_{mgs}(t) = \frac{3}{2} \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{ds} + \phi_{qs} \cdot I_{qs})$  : représente l'échange d'énergie électromagnétique avec la source statorique.

$P_{mgr}(t) = \frac{3}{2} \cdot (\phi_{dr} \cdot I_{dr} + \phi_{qr} \cdot I_{qr})$  : représente l'échange d'énergie électromagnétique avec la source rotorique.

$P_{em}(t) = \frac{3}{2} \cdot [-\omega_s \cdot \phi_{qs} \cdot I_{ds} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \cdot I_{qs} - (\omega_s - \omega) \phi_{qr} \cdot I_{dr} + (\omega_s - \omega) \phi_{dr} \cdot I_{qr}]$  représente la puissance électromagnétique.

En utilisant les expressions des flux magnétiques présentées dans (2.51), on obtient :

$$P_{em}(t) = \frac{3}{2} \cdot \omega \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qs} + \phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (2.54)$$

Sachant que :  $P_{em}(t) = \Omega_r \cdot C_{em}$  et  $\omega_r = \Omega_r \cdot np$

On déduit l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\phi_{ds} \cdot I_{qs} + \phi_{qs} \cdot I_{ds}) \quad (2.55)$$

Par ailleurs, les puissances active et réactive statorique et rotorique sont données par :

$$\text{Puissance statorique : } \begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \end{cases}$$

$$\text{Puissance rotorique : } \begin{cases} P_r = \frac{3}{2} (V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr}) \\ Q_r = \frac{3}{2} (V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr}) \end{cases}$$

### 10.6.5 Mise sous forme d'équation d'état :

Les équations (2.20) peuvent être disposées sous la forme de représentation d'état. On choisit pour vecteur d'état  $x = [\phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}]$ , on trouve les équations d'état sous forme matricielle :

$$L \cdot \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot U \quad (2.56)$$

Avec :  $U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T$ ,  $B = [I]_{4 \times 4}$ ,

$$\text{et } L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_s & \frac{R_s \cdot M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & -\frac{R_s}{L_s} & 0 & \frac{R_s \cdot M}{L_s} \\ 0 & \frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & -R_r & \sigma(\omega_s - \omega_r) \\ -\frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & 0 & -\sigma(\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{bmatrix}$$

**11. Simulation de la machine asynchrone a double alimentation :**

A l'aide du logiciel MATLAB/simulink, la simulation de la machine asynchrone à double alimentation pour les deux types de fonctionnement moteur et générateur a été faite. Son modèle est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (repère (d, q)) lié au champ tournant. Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 3 KW.

Les résultats de simulation de la machine asynchrone fonctionnant en moteur à rotor en court-circuit sont présentés sur les figure (2.18), (2.19), (2.20), (2.21) concernant respectivement les variables d'états  $[\phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}]$  la vitesse, le couple et la puissance active et réactive du stator.

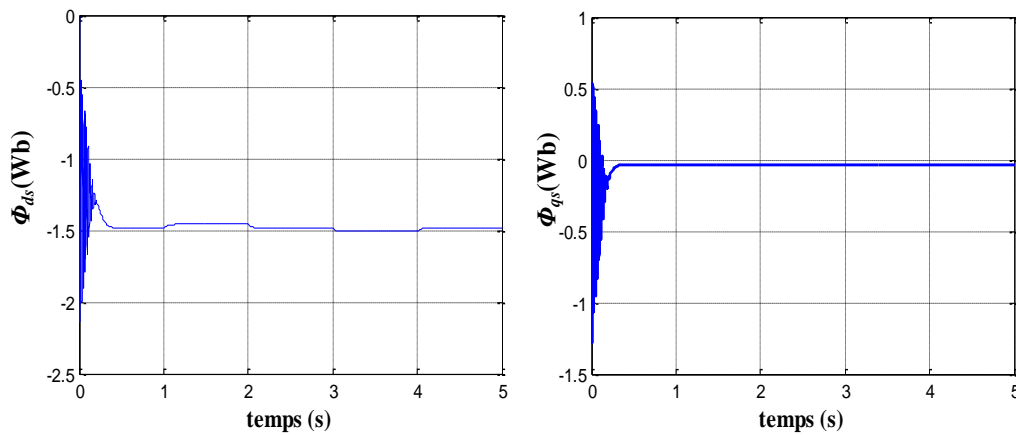


Fig.(2.18) : Composantes du flux statorique

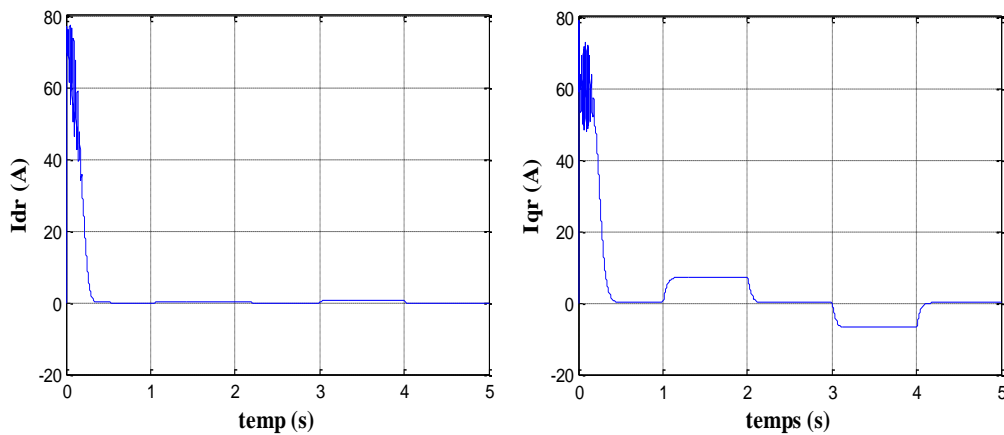


Fig.(2.19) : Composantes du courant statorique

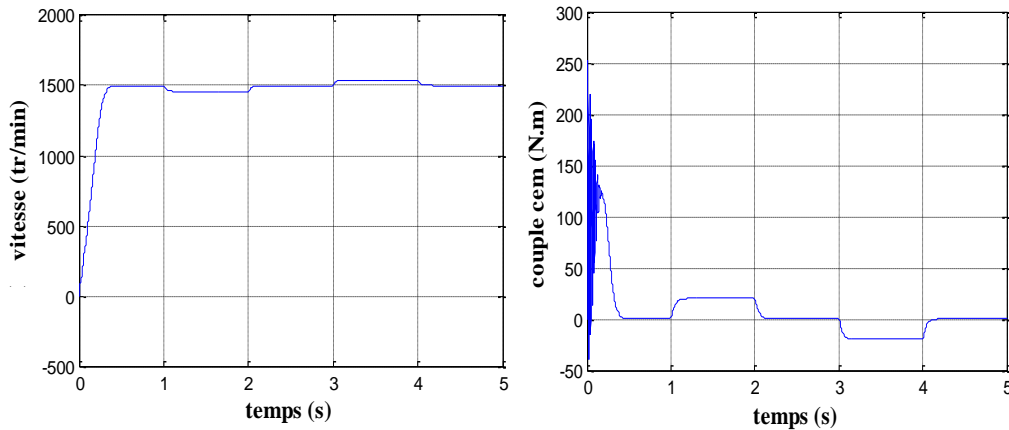


Fig.(2.20) : Vitesse et couple électromagnétique  $C_{em}$

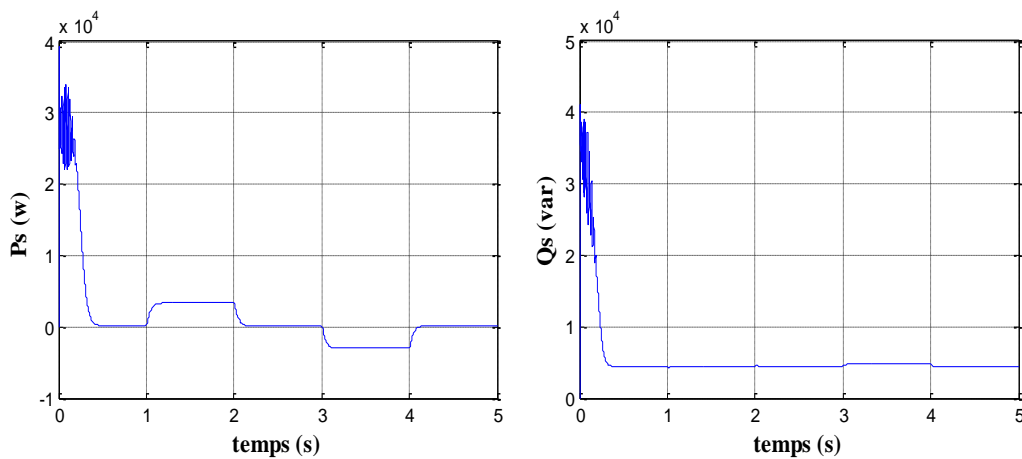


Fig.(2.21) : Puissance active et réactive du stator

La simulation s'effectue au départ, d'un démarrage à vide. On remarque que le régime transitoire est oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine. Après que le régime permanent s'établi, on applique à l'instant  $t=1s$ , un couple de charge à la machine  $C_r=+20Nm$  qu'on annule à  $t=2s$  ensuite à l'instant  $t=3s$ , on applique un couple de charge  $C_r=-20Nm$  qu'on annule à  $t=4s$ . Après l'application de cette perturbation, nous observons une bonne stabilité de la machine.

Néanmoins, nous remarquons une variation de la vitesse traduite par un glissement supplémentaire (+g, ou -g).

Notons qu'à vide la vitesse du rotor est proche de la vitesse de synchronisme (glissement nul), au moment où on applique un couple résistant  $C_r=+20N.m$ , la vitesse diminue (augmentation du glissement) et pour  $C_r=-20N.m$ , la vitesse augmente (diminution du glissement) le couple électromagnétique répond au couple résistant ainsi que les courants de phase, mais nous remarquons que ces deux grandeurs présentent des pics gênants (les effets du régime transitoire), qui peuvent endommager la machine. Comme on peut souligner un autre point important, c'est la variation notée au niveau du flux lors de l'application du couple résistant, ceci met en évidence l'absence de

découplage. On remarque aussi que le régime de fonctionnement de la machine (moteur ou génératrice) dépend de la vitesse de rotation hypo ou hypersynchrone

Les résultats de simulation montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, fonctionnement moteur, alimenté directement par deux sources de tensions triphasées parfaites. L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est de 50 Hz et d'amplitude 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12 V et une fréquence égale à 1Hz. Les figure (2.22), (2.23), illustrent la vitesse, le courant rotorique, le courant statorique, le couple électromagnétique.

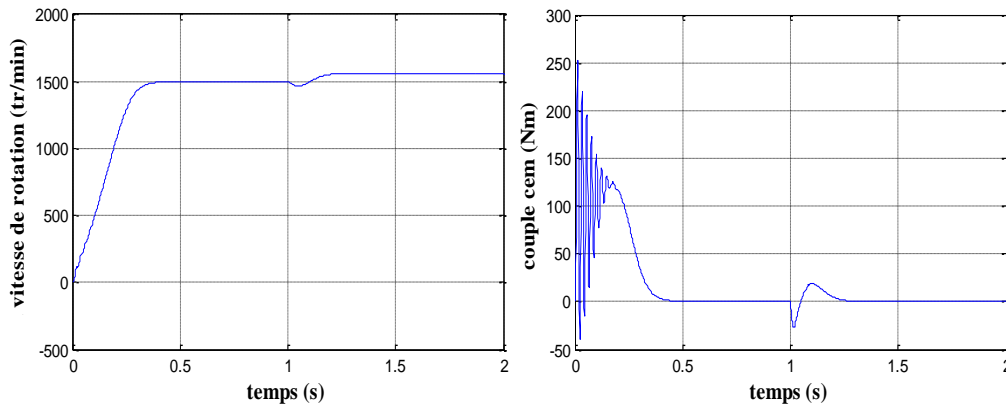


Fig.(2.22) : Vitesse et couple électromagnétique

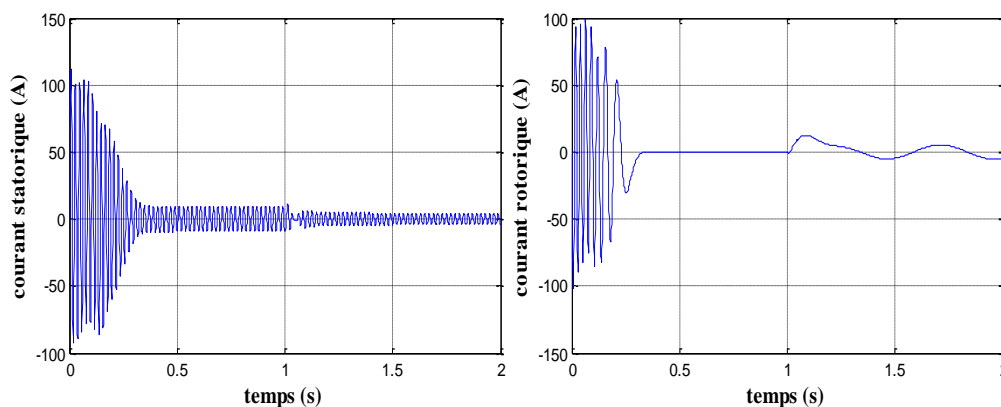


Fig.(2.23): Courants statorique et rotorique

Les résultats de simulation de la MADA reportés sur les figures ci-dessus, montrent clairement les capacités de la MADA à fonctionner en régime hypersynchrone même si la fréquence statorique est fixée à 50Hz. La MADA ne peut démarrer directement en mode double alimentée, elle doit avoir un rotor en court-circuité pour sa mise en marche en asynchrone. A l'instant  $t=1s$ , on alimente le rotor par une tension de 12V et de 2Hz.

### 12. Modélisation de l'alimentation de la MADA commandée par le rotor :

Dans cette partie, nous présentons l'alimentation de la génératrice à double alimentation dont le stator est couplé directement au réseau et le rotor par une cascade redresseur- onduleur à MLI figure (2.24).

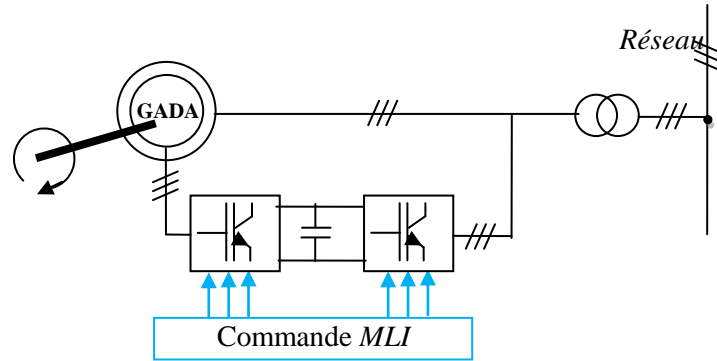


Fig.(2.24): Structure d'alimentation de la MADA par une cascade onduleur- redresseur à MLI

**a. MLI à porteuse triangulaire :**

Dans la méthode de la MLI à porteuse triangulaire, montrée dans la figure ci-dessous, l'erreur entre le signal de référence (courant ou tension) et une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixes définit les instants de commutation des interrupteurs à l'aide d'un comparateur [29].

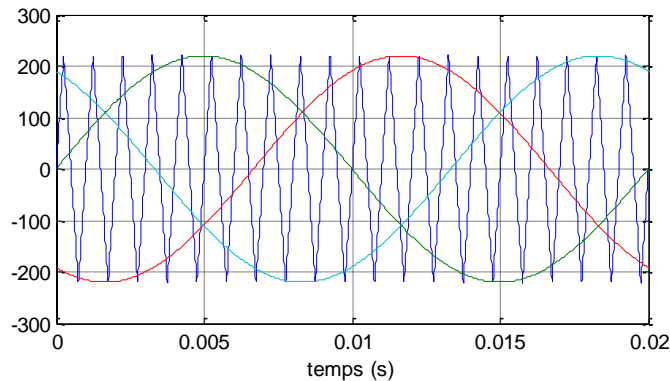


Fig.( 2.25) : signal de porteuse et signaux de référence

**b. MLI à bande hystérésis**

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du redresseur lorsque l'erreur entre le signal et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée fourchette ou bande d'hystérésis. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase. Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la figure (2.26).

L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à  $-H/2$ , et il se ferme si cette dernière est supérieure à  $+H/2$ , où  $H$  représente la fourchette (ou largeur de la bande) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre  $-H/2$  et  $+H/2$  (c'est-à-dire, qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas [29].

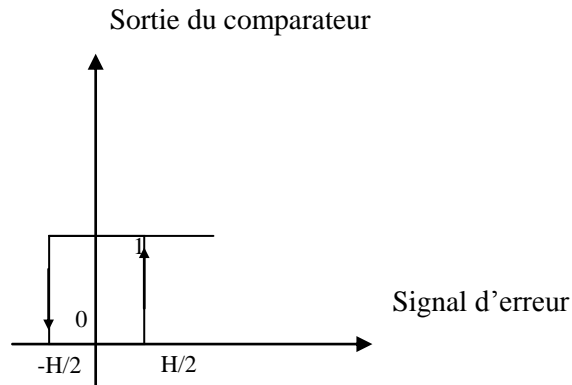


Fig.(2.26) : Modulateur MLI à bande d'hystérésis

**12.1. Structure générale du redresseur MLI :**

La technologie employée consiste à modifier la structure interne du redresseur en remplaçant les thyristors par des interrupteurs entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture : transistor MOSFET pour les moyennes et petites puissances, transistors IGBT ou thyristor GTO pour les fortes puissances, en anti parallèle avec des diodes. Pour la commande on utilise la technique de la modulation de largeur d'impulsion. La figure (2.27) montre le schéma de principe d'un redresseur MLI [29].

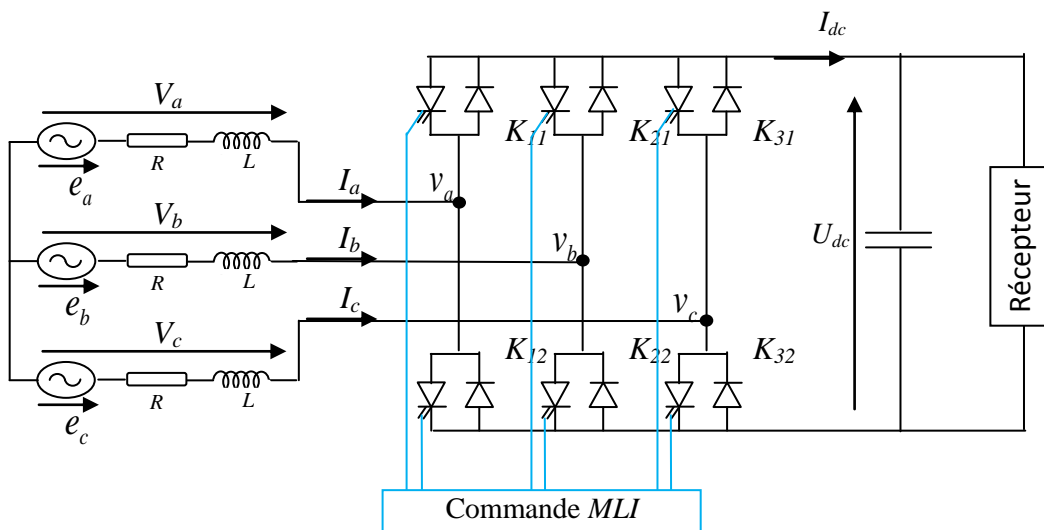


Fig.(2.27) : Schéma de principe d'un redresseur MLI

**12.1.1. Principe de fonctionnement en redresseur MLI :**

La réversibilité en courant de l'onduleur MLI de tension autorise son fonctionnement en redresseur MLI de courant. Il s'agit alors d'alimenter une charge (passive ou active) en continu à partir d'un réseau alternatif, le courant prélevé sur ce réseau étant sinusoïdale et éventuellement, en phase avec la tension. On peut donc, avec un redresseur MLI, obtenir un facteur de puissance très proche de l'unité.

On peut aussi régler, par le contrôle, l'énergie réactive absorbée ou fournie. Toutefois, ce redresseur peut être à structure courant ou à structure tension.

Le courant de ligne est commandé par la chute de tension de la ligne produite par l'inductance  $L$ , et la résistance  $R$  de la ligne et la tension d'entrée du redresseur  $v_{a,b,c}$ . Le pont redresseur est constitué de trois bras chaque bras comporte deux transistors bipolaires (thyristors) en antiparallèles avec des diodes comme il est représenté dans la figure (2.27), chaque interrupteur peut être commandé en ouverture et en fermeture. La tension d'entrée  $v_{a,b,c}$  est en fonction des états de ces interrupteurs. Le tableau suivant donne les huit états possibles de ces interrupteurs[30] :

K	$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{ab}$	$V_{bc}$	$V_{ca}$
0	1	0	0	$U_{dc}$	0	$-U_{dc}$
1	1	1	0	0	$u_{ds}$	$-u_{ds}$
2	0	1	0	$-U_{dc}$	$u_{ds}$	
3	0	1	1	$-U_{dc}$	0	$U_{dc}$
4	0	0	1	0	$-U_{dc}$	$U_{dc}$
5	1	0	1	$U_{dc}$	$-U_{dc}$	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

Tableau (2.1) : états possibles des interrupteurs et tensions d'entrée associées

$S_a, S_b, S_c$  sont les états des interrupteurs  $k_{11}, k_{21}, k_{31}$ .

De cette table, on peut écrire les tensions d'entrée du redresseur d'une manière générale comme suit :

$$\begin{cases} V_{ab} = (S_a - S_b)U_{dc} \\ V_{bc} = (S_b - S_c)U_{dc} \\ V_{ca} = (S_c - S_a)U_{dc} \end{cases} \quad (2.57)$$

D'où on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{aligned} v_a &= f_a \cdot U_{dc} \\ v_b &= f_b \cdot U_{dc} \\ v_c &= f_c \cdot U_{dc} \end{aligned} \quad (2.57)$$

Avec :

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{2.S_a - (S_b + S_c)}{3} \\ f_b &= \frac{2.S_b - (S_c + S_a)}{3} \\ f_c &= \frac{2.S_c - (S_a + S_b)}{3} \end{aligned} \quad (2.58)$$

12.1.2. Représentation fonctionnelle du redresseur MLI dans le référentiel triphasé

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

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = R \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.59)$$

Et la tension d'entrée du redresseur peut être écrite comme suit :

$$v_n = U_{dc} \cdot \left( S_n - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) \quad (2.60)$$

$n=a$  ou  $b$  ou  $c$ .

Par ailleurs, on peut écrire le courant du bus continu comme :

$$C \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = i_c \quad (2.61)$$

Le courant dans la capacité peut s'écrire aussi:

$$i_c = i_{dc} - i_{ch} \quad (2.62)$$

$$C \cdot \frac{dU_{dc}}{dt} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c - i_{ch} \quad (2.63)$$

Donc, pour le coté alternatif du redresseur on peut écrire:

$$\begin{aligned} L \frac{di_a}{dt} + R \cdot i_a &= e_a - U_{dc} \cdot \left( S_a - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_a - U_{dc} \left( S_a - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_b}{dt} + R \cdot i_b &= e_b - U_{dc} \cdot \left( S_b - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_b - U_{dc} \left( S_b - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \\ L \frac{di_c}{dt} + R \cdot i_c &= e_c - U_{dc} \cdot \left( S_c - \frac{1}{3} \sum_{n=a}^c S_n \right) = e_c - U_{dc} \left( S_c - \frac{1}{3} (S_a + S_b + S_c) \right) \end{aligned} \quad (2.64)$$

La combinaison des équations (2.63), (2.64) nous permet de tracer le schéma fonctionnel triphasé représenté dans la figure (2.28).

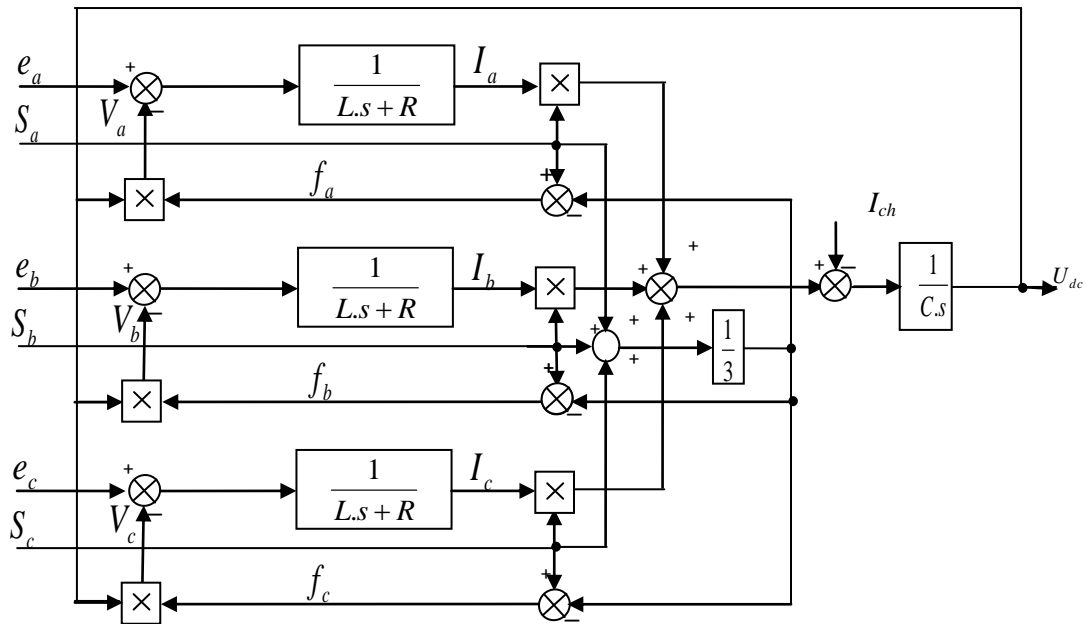


Fig.(2.28) : Schéma fonctionnel d'un redresseur MLI

Le contrôle de la tension continue  $U_{dc}$  exige une boucle d'asservissement fermée. Pour cela, il faut régler cette tension de sortie en fonction de la charge utilisée. Pour accomplir cette tâche, la tension de sortie du redresseur est mesurée et comparée à une référence  $U_{dc-ref}$ . La sortie du régulateur produit les ordres de commande pour les transistors du redresseur comme l'indique la figure (2.29)[31].

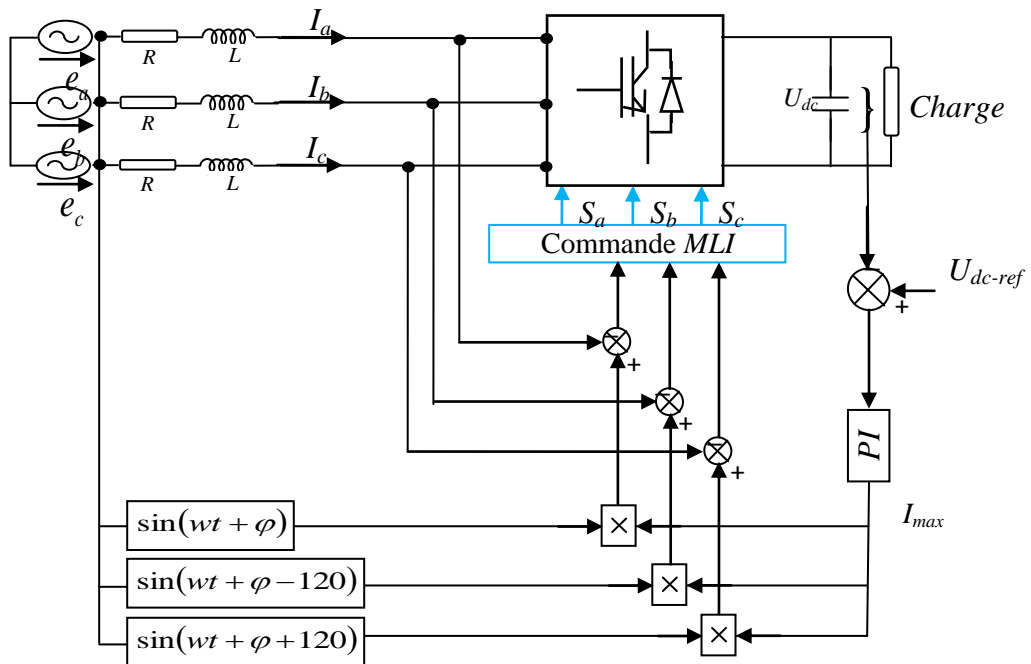
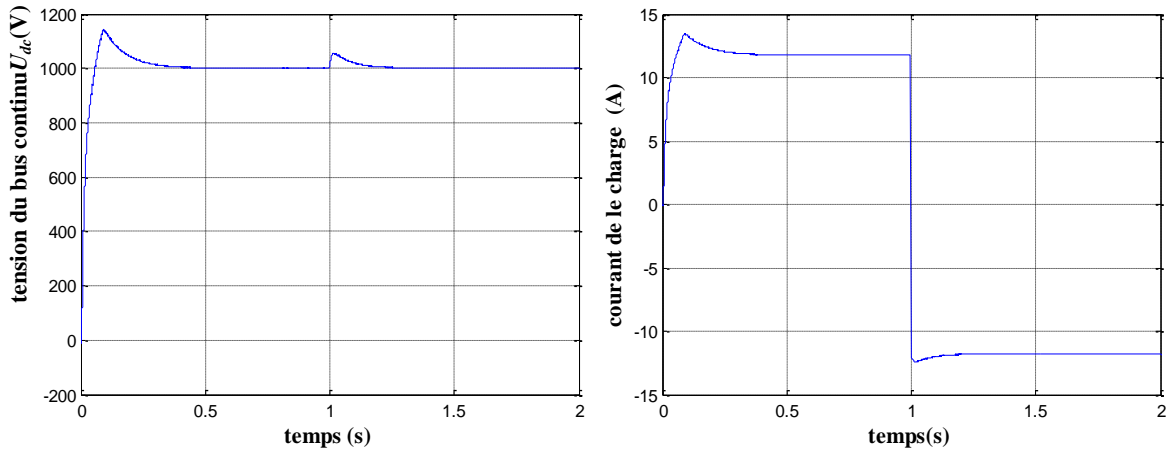


Fig.(2.29) : Redresseur MLI triphasé et sa commande.

**12.1.3. Résultats de simulation :**

Le fonctionnement était en redresseur et le courant de charge est positif ( $i_{ch} > 0$ ). A l'instant  $t=1s$ , on fait changer le mode de fonctionnement par inversion du sens du courant de charge  $i_{ch} < 0$  donc en fonctionnement onduleur.



**Fig.(2.30) :** Allure de la tension du bus continu  $U_{dc}$  et du courant de charge  $i_{ch}$

**12.2. Modélisation de l'onduleur triphasé à MLI :**

L'onduleur est un convertisseur d'électronique de puissance qui permet la conversion continue alternative. Il fonctionne en commutation forcée et conçu généralement à base de transistors. Il permet d'imposer à la machine des tensions ou des courants à amplitude et fréquence variables [27].

Cet onduleur à commutations commandés est constitué de trois branches disposées de la même manière que dans le redresseur commandé [27].

Les couples d'interrupteurs ( $K_{11}$  et  $K_{12}$ ), ( $K_{21}$  et  $K_{22}$ ), ( $K_{31}$  et  $K_{32}$ ) doivent être commandés de manière complémentaire pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge d'une part, et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part. L'état des interrupteurs, supposés parfaits, peut être défini par trois grandeurs booléennes de commande.

Les équations instantanées des tensions simples à la sortie de l'onduleur en fonction des grandeurs de commande sont données par [32] :

$$(2.65) \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$$

Ces variables de commande  $f_1, f_2, f_3$  présentent des signaux logiques (1 ou 0) déduits de l'application de la technique à MLI, ou par comparaison entre les courants de sortie  $i_{a,b,c}$  et les

courants de références  $i_{a,b,c,ref}$ . la figure suivante présente la tension d'une phase de sortie de l'onduleur.

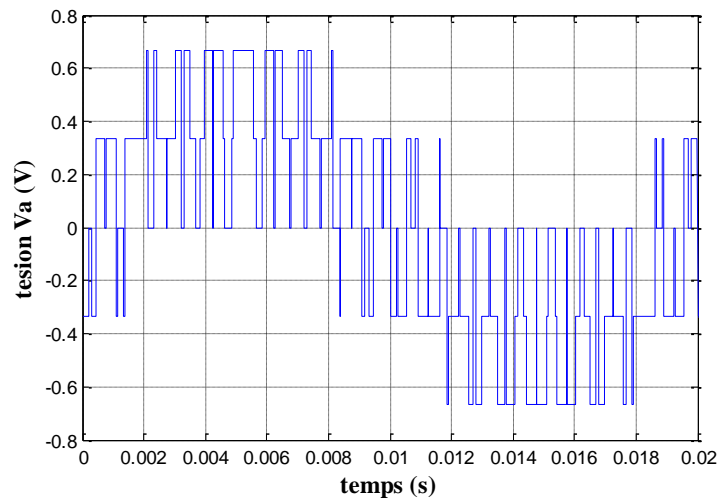


Fig.(2.31) : Tension de sortie d'une phase de l'onduleur

### 13. Conclusion

Pour effectuer une telle études des n'importe une modélisation détaillée sera indispensable, pour ce fait nous l'avons pris comme objectif de ce chapitre.

En premier lieu, nous avons présenté la modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable séparément. Cette chaîne qui est constituée d'une machine asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine à calage variable et pilotée par le rotor via deux convertisseurs de puissances bidirectionnelles fonctionnant en MLI et reliés au réseau.

Nous avons entamé notre travail par la modélisation de la turbine éolienne Par la suite, nous avons modélisé double alimentation dans le repère de Park (Repère biphasé (d,q)) lié au champ tournant qui réduit la complexité du modèle.

En deuxième phase, on est passé à la modélisation de l'alimentation de la MADA, onduleur comme convertisseur coté rotor et un redresseur triphasé comme convertisseur coté réseau, ainsi qu'à sa commande afin de contrôler par la suite le bus continu et le maintenir à une valeur constante dans le but d'améliorer le facteur de puissance du côté réseau.

Les modèles de la chaîne de conversion ont été simulés par le logiciel MATLAB, les résultats de simulation obtenus sont similaires à ceux déjà publiés Dans le prochain chapitre, nous étudierons la commande vectorielle .

*Chapitre 03:*

*Commande vectorielle*

## 1. Introduction

Pour avoir une bonne qualité d'énergie électrique produite par un système éolien basé sur une MADA, il faut appliquer des techniques de commandes adéquates permettant le contrôle des puissances générées par le stator de la machine

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur

Dans cette chapitre Nous allons présenter le principe de La commande vectorielle par orientation du flux et ses types, puis l'appliquer sur une MADA, puis procéder à la simulation et à la présentation finale des résultats..

## 2. Principe de la commande vectoriel a flux oriente

La commande par flux orienté est une expression qui apparaît de nos jours dans la littérature traitant les techniques de contrôle des machines électriques à courant alternatif. A savoir la force exercée sur un conducteur parcouru par un courant et soumis à un champ magnétique est égale au produit vectoriel du vecteur courant par le vecteur champ. Il en résulte évidemment que l'amplitude de cette force est maximale lorsque le vecteur courant est perpendiculaire au vecteur champ [33]

La commande par orientation de flux proposé par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée,  $I_{dr}$  est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant  $I_{qr}$  est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes  $I_{dr}$  et  $I_{qr}$  sont mutuellement découplées [34].

De nombreuses variétés de commande ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie :

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère :

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement

### 3. Objectifs du contrôle

Bien que la dynamique du dispositif éolien soit relativement lente par rapport à l'évolution des grandeurs électriques, les régulateurs de la commande vectorielle seront calculés de façon à obtenir les performances les plus élevées possibles tant au niveau de la dynamique qu'à celui de la robustesse et du rejet de perturbations. Ainsi, au cours de la synthèse de ces régulateurs, nous ferons en sorte d'obtenir une dynamique électrique du système aussi rapide que l'autorise la fréquence de la MLI du convertisseur rotorique , ceci dans l'optique de l'insertion du dispositif dans un système éolien à vitesse variable ou dans un autre système utilisant la MADA en génératrice. Les lois de commande élaborées doivent autoriser cette dynamique sans engendrer des dépassements qui peuvent nuire à la durée de vie de la machine et des convertisseurs. Elles devront également opérer un bon rejet des perturbations qui peuvent être nombreuses sur un tel système étant donné la complexité et le nombre important de capteurs mis en jeu. Enfin, elles devront satisfaire aux exigences de robustesse face aux variations de paramètres qui peuvent intervenir dans les machines électriques notamment à cause des variations de température.

### 4. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique :

On rappelle d'abord le système d'équations différentielles de la machine :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (3.1)$$

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques. En considérant les flux statoriques et les courants rotoriques comme des vecteurs d'état. Les équations électriques de la machine peuvent être disposées sous la forme d'une représentation d'état comme suite :

$$L \cdot \frac{dx}{dt} = A \cdot x + B \cdot U \quad (3.2)$$

$$\text{Avec : } U = [V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}]^T, \quad B = [I]_{4 \times 4}, \quad x = [\phi_{ds}, \phi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}]^T$$

$$\text{et } L = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & \frac{M}{L_s} & 0 & \sigma \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega_s & \frac{R_s \cdot M}{L_s} & 0 \\ -\omega_s & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & \frac{R_s \cdot M}{L_s} \\ 0 & \frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & -R_r & \sigma(\omega_s - \omega_r) \\ -\frac{M}{L_s}(\omega_s - \omega_r) & 0 & -\sigma(\omega_s - \omega_r) & -R_r \end{bmatrix}$$

**4.1. Choix du référentiel pour le modèle diphasé :**

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine (orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe **q** soit constamment nul).

Nous pouvons écrire :

$$\phi_{qs} = 0 \quad \phi_{ds} = \phi_s$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \omega_s \cdot \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \end{cases} \quad (3.3)$$

Dans le repère triphasé (a, b, c), la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprimé par la relation générale :

$$V_{ns} = R_s I_{ns} + \frac{d\phi_{ns}}{dt} \quad (3.4)$$

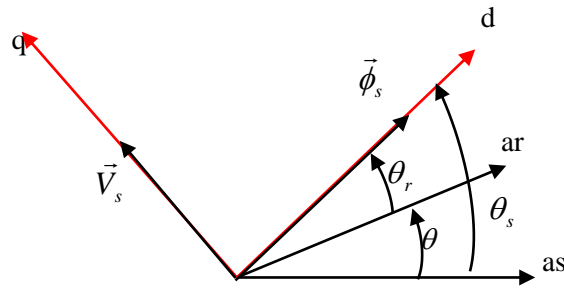
De plus, si on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à [32] :

$$V_{ns} = \frac{d\phi_{ns}}{dt} \quad (3.5)$$

Cette relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur de tension statorique et qu'il est en avance de  $(\pi/2)$  sur ce même vecteur. Toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant, on peut écrire :

$$V_{ds} = 0 \quad , \quad V_{qs} = V_s \quad (3.6)$$

Le principe d'orientation de la tension et du flux statorique est illustré sur la figure (3.01)



**Fig.(3.01) :** Orientation du flux statorique

Dans l'hypothèse où le flux  $\phi_{ds}$  est maintenu constant (ce qui est assuré par la présence d'un réseau stable connecté au stator). Le choix de ce repère rend le couple électromagnétique produit par la machine et par conséquent la puissance active uniquement dépendants du courant rotorique d'axe q. L'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_e = np \frac{M}{L_s} \phi_{ds} \cdot I_{qr} \tag{3.7}$$

En utilisant les simplifications ci-dessus, nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \phi_{ds} = \omega_s \phi_s \end{cases} \tag{3.8}$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = \phi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \tag{3.9}$$

A partir des équations (3.9), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques:

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \\ I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \end{cases} \tag{3.10}$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \tag{3.11}$$

L'adaptation de ces équations au système d'axes choisi et aux hypothèses simplificatrices effectuées dans notre cas ( $V_{ds} = 0$ ) donne :

$$\begin{cases} P_s = V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} \end{cases} \tag{3.12}$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs valeurs de l'équation (3.10) dans l'équation (3.12), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qr} \\ Q_s = V_s \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{dr} \end{cases} \quad (3.13)$$

En tirant ( $\phi_s = V_s / \omega_s$ ) de l'équation (3.8), l'expression de la puissance réactive devient :

$$Q_s = \frac{V_s^2}{L_s \cdot \omega_s} - \frac{V_s \cdot M}{L_s} I_{dr} \quad (3.14)$$

Ces équations montrent qu'on a un découplage entre les commandes des puissances où la puissance active peut être commandée par la composante en quadrature du courant  $I_{qr}$ . La puissance réactive peut être commandée par la composante directe du courant  $I_{dr}$  [35].

**5. Commande vectorielle directe**

Cette méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. L'appellation commande directe vient du fait que les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine. L'intérêt que présente cette méthode est que sa mise en œuvre est simple.

Pour réguler la MADA, nous avons mis en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur de type PI Figure.(3.02) [36] :

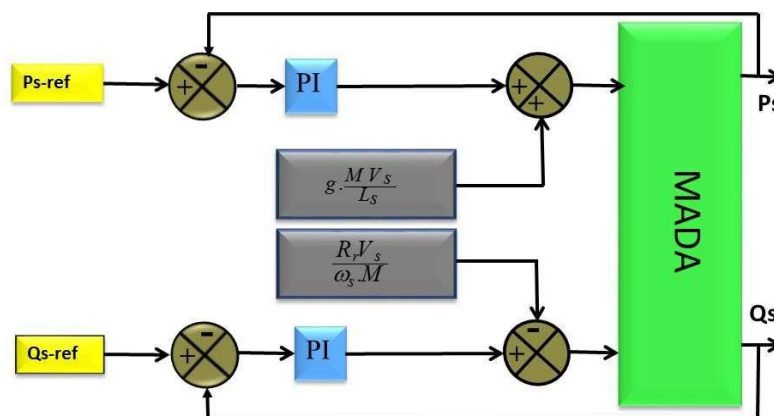


Fig. (3.02) : Schéma bloc de la commande directe

**6. Commande vectorielle indirecte**

**6.1. Commande en boucle ouverte :**

La commande en boucle ouverte est essentiellement basée sur l'hypothèse d'un réseau stable en tension et en fréquence. Elle consiste à asservir pas les puissances mais plutôt indirectement les courants rotoriques en n'utilisant non pas les puissances mesurées comme retour sur le comparateur mais les courants rotoriques d'axe  $d$  et  $q$ .

A partir des expressions des puissances active et réactive statoriques du système (3.13) et (3.14), on déduit les références des courants rotoriques direct et en quadrature suivant les relations [36]:

$$I_{dr\_ref} = \frac{V_s}{M \omega_s} - \frac{L_s}{M.V_s} Q_{s\_ref} \tag{3.15}$$

$$I_{qr\_ref} = \frac{L_s}{M.V_s} P_{s\_ref} \tag{3.16}$$

Ces courants seront utilisés comme références à la place des références sur les puissances active et réactive, on aboutit alors au schéma bloc de la figure ( 3.03) :

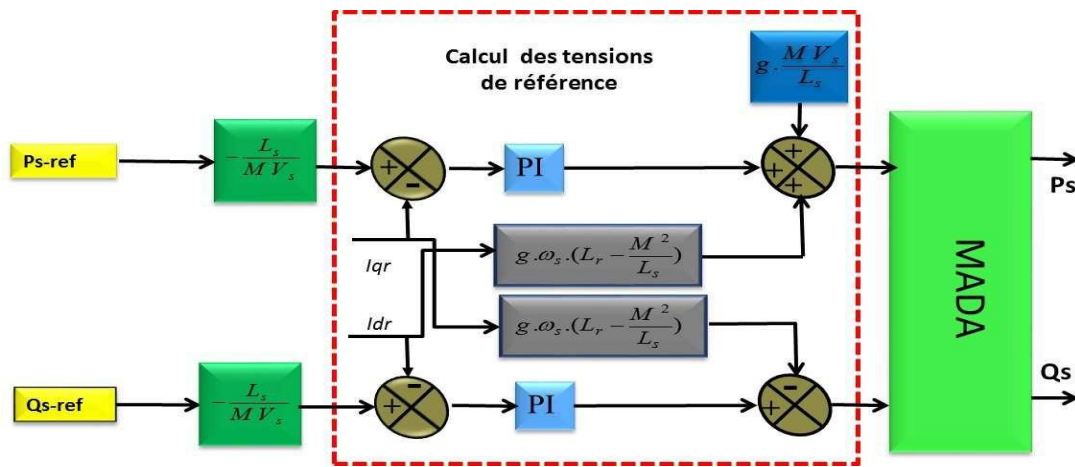


Fig. (3.03) : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle ouverte

Cette configuration reste fiable tant que le réseau électrique reste stable en tension et en fréquence. Une instabilité du réseau va donc provoquer une erreur sur le suivi des consignes des puissances active et réactive.

**6.2. Commande en boucle fermée :**

Pour réguler les puissances de manière optimale, nous allons mettre en place deux boucles de régulation sur chaque axe avec un régulateur proportionnel intégral pour chacune, une boucle sur la puissance et l'autre sur le courant correspondant tout en compensant les termes de perturbations et de couplages apparaissant sur le schéma bloc du modèle de la MADA. Nous obtenons ainsi la structure de commande présentée sur la figure (3.04) suivante [36] :

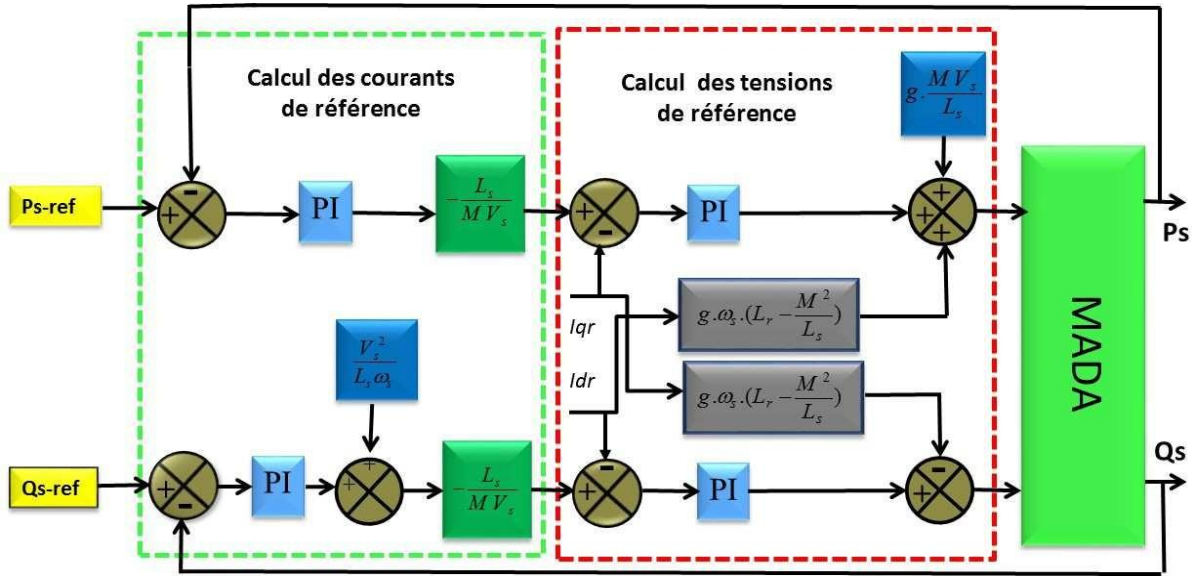


Fig. (3.04) : Schéma bloc de la commande indirecte en boucle fermée

Cette structure aboutit à un système de régulation plus complexe. Tout fois, elle offre une meilleure robustesse face aux éventuelles instabilités sur le réseau électrique. Le régulateur proportionnel intégral utilisé pour l’asservissement des courants et des puissances est simple et facile à mettre en place tout en offrant des performances acceptables pour l’utilisation en génératrice de la GADA.

De plus, la symétrie du système après compensation mène à calculer les régulateurs pour un seul axe, les deux autres seront identiques aux premiers.

On considère les tensions rotoriques  $V_{dr}$ ,  $V_{qr}$  comme variables de commande qui sont générées par le bloc de contrôle à flux orienté et les courants rotoriques  $I_{dr}$ ,  $I_{qr}$  comme variables d’état. Ces grandeurs sont en fonction des grandeurs de consigne  $P_{sref}$  et  $Q_{sref}$ .

$$\begin{cases} P_{sref} = -V_s \frac{M}{L_s} I_{qrref} \\ Q_{sref} = \frac{V_s \phi_s}{L_s} - \frac{V_s M}{L_s} I_{drref} \end{cases} \quad (3.17)$$

Les équations des flux

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \\ \phi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (3.18)$$

En remplaçant les courants statoriques par leurs expressions, on aura :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \phi_{qr} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{cases} \quad (3.19)$$

A partir de ces équations, les expressions des tensions deviennent :

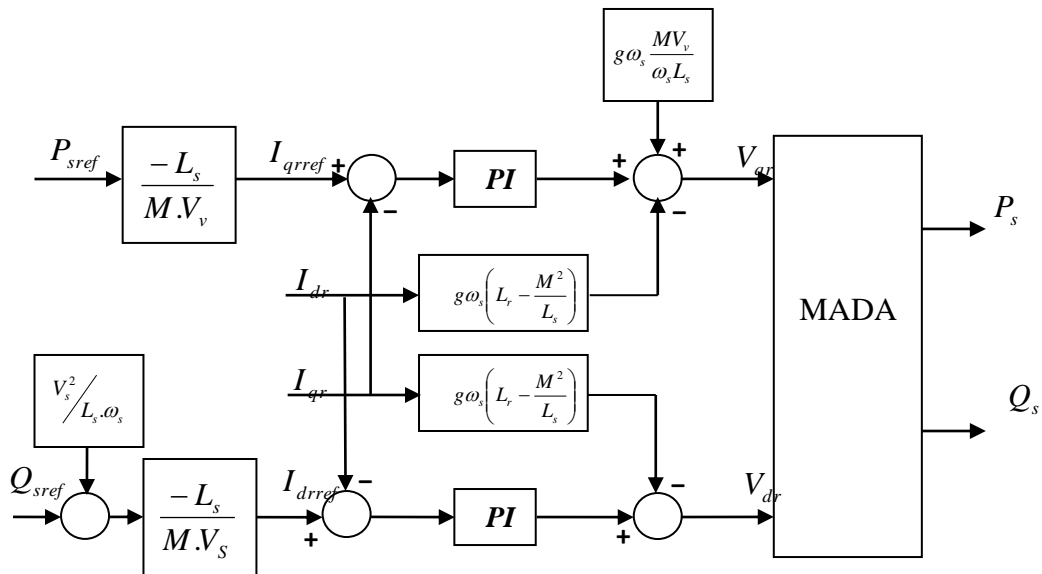
$$\begin{cases} V_{dr} = R_s I_{dr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} = R_s I_{qr} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g \omega_s \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (3.20)$$

$V_{dr}$  et  $V_{qr}$  : sont les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants rotoriques voulus ;

Est le terme de couplage entre les deux axes ;  $\left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$

Représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.  $g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr}$

Les équations (3.17), (3.20) permettent d'établir un schéma bloc du système électrique à réguler figure (3.05).



**Fig.(3.05) :** Schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA alimentée en tension

**7. Résultats de simulation :**

**7.1 . Essai 01 : fonctionnement à vitesse fixe**

Le premier essai consiste à appliquer aux entrées de commande des échelons. On a effectué le schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA avec une variation de la vitesse suivant

- échelon comme montre de 0 -2 -7m/s
- 2-4 - 9m/s
- 4-6 -10m/s

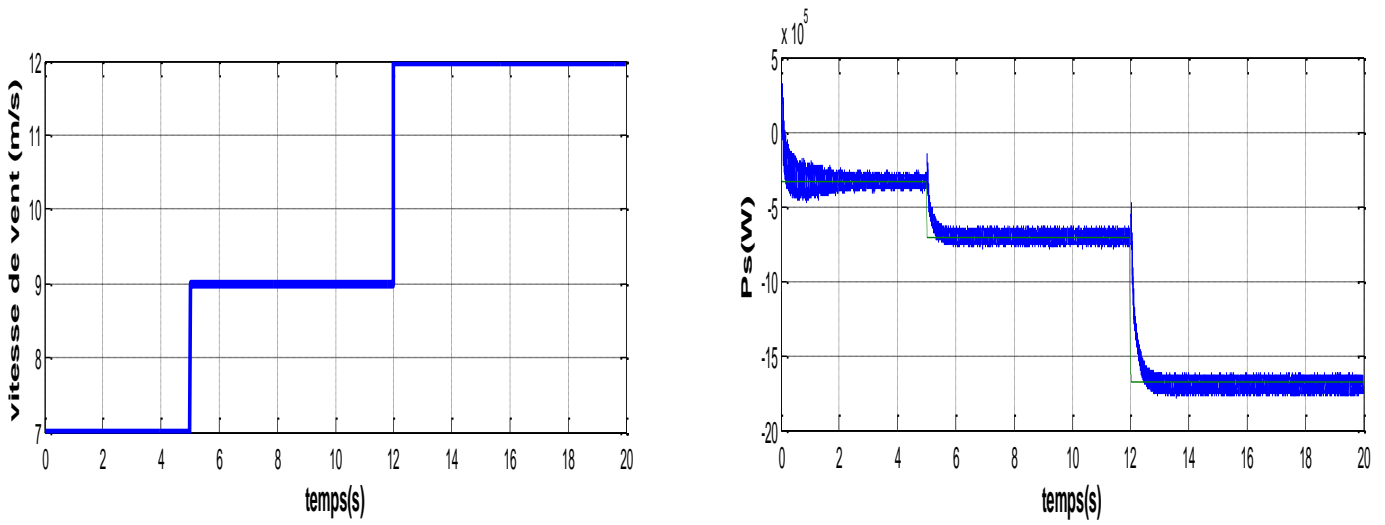


Fig (3.06) : vitesse de vent et puissance active statorique

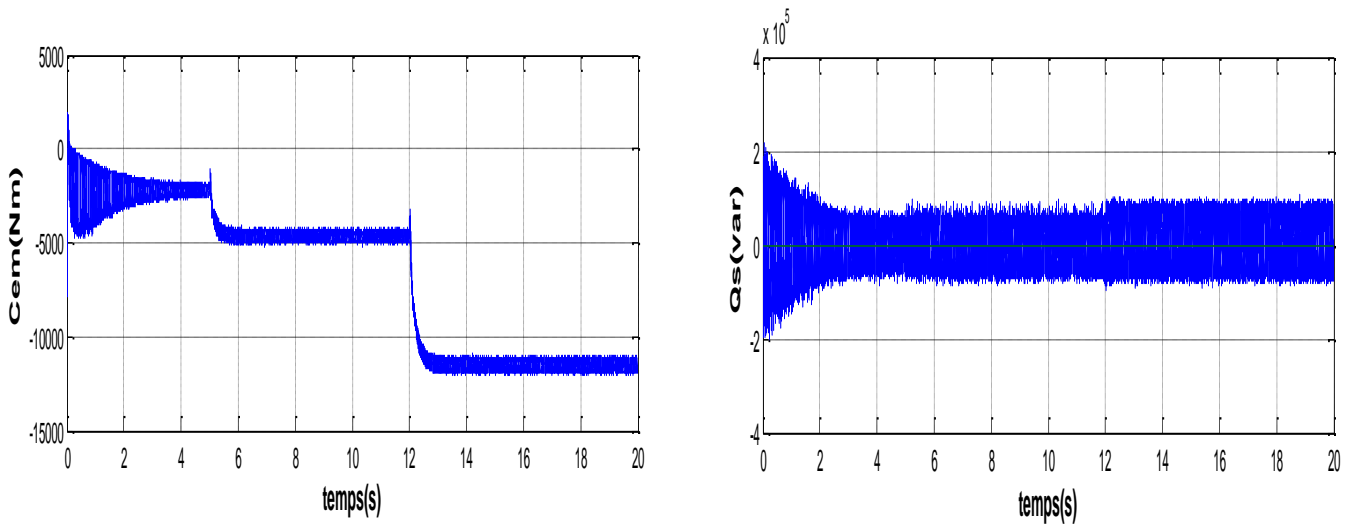


Fig (3.07) : couple électromagnétique et puissance réactive statorique

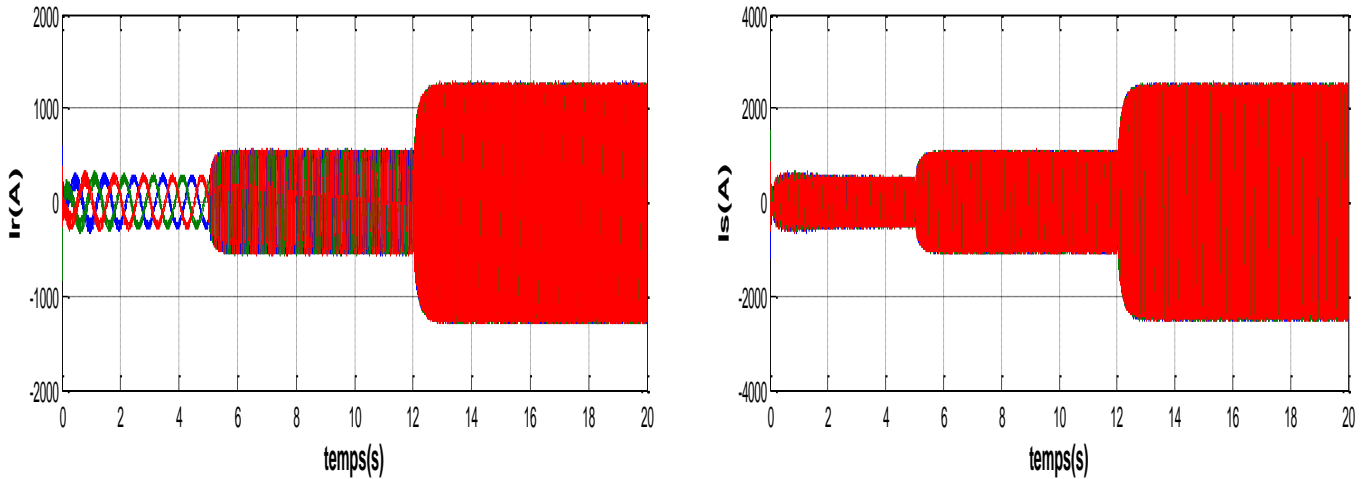


Fig (3.08) : courant rotorique et courant statorique

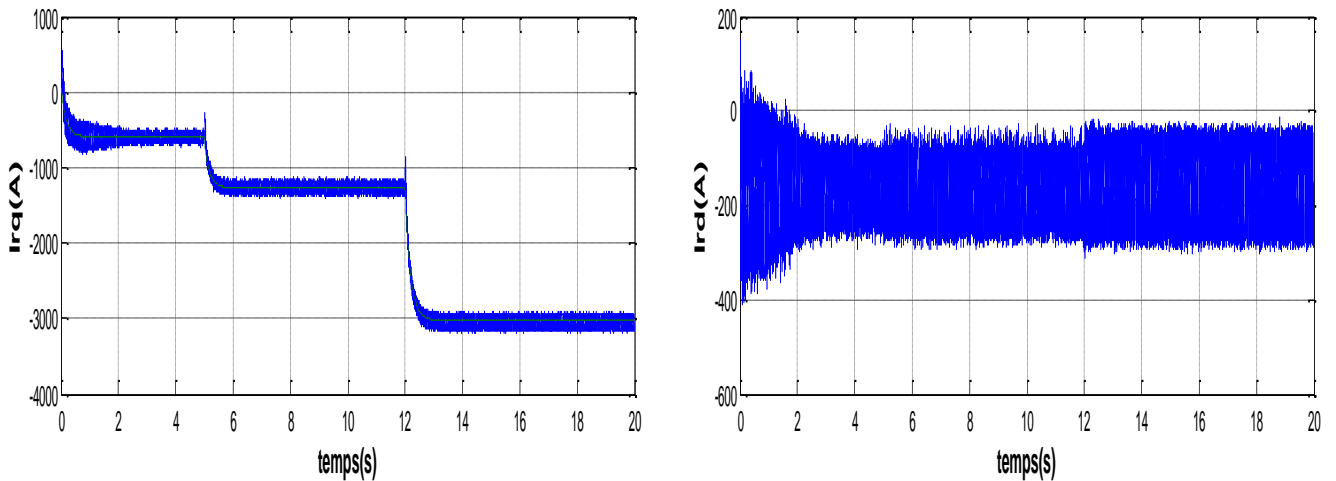


Fig (3.09) : courant rotorique selon l'axe d et q

**7.1.1. Interprétation des résultats**

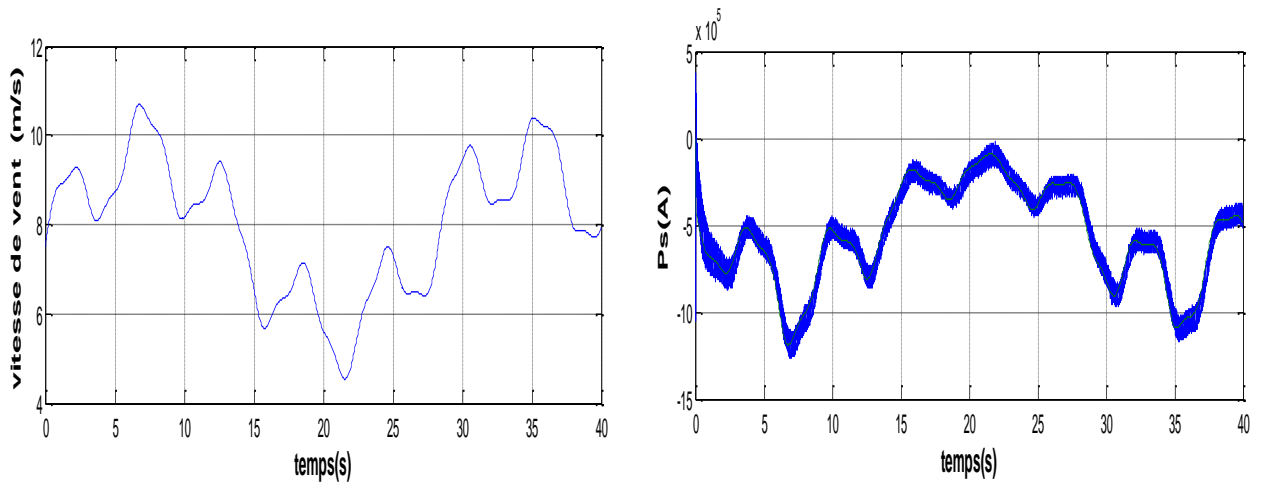
Le figure (3.06), montrent que les puissances active de la machine dans le cas régulateur PI et la vitesse de vent constant, allure la puissance active correspondant la forme de la vitesse de vent si le vent augmente la puissance générée augmente, mise il y a un retard dans la réponse presque égale 0.01s on remarque aussi un oscillation de le puissance autour de la référence.

La puissance réactive présenté sur la figure (3.07) est réglable selon les besoins du réseau (ajustement sur le  $\cos(\varphi)$ ), et les deux sont découplées entre eux (la puissance active est commandée par la composante  $I_{qr}$  et la puissance réactive par le composante  $I_{dr}$ ) présenté sue la figure (3.09).

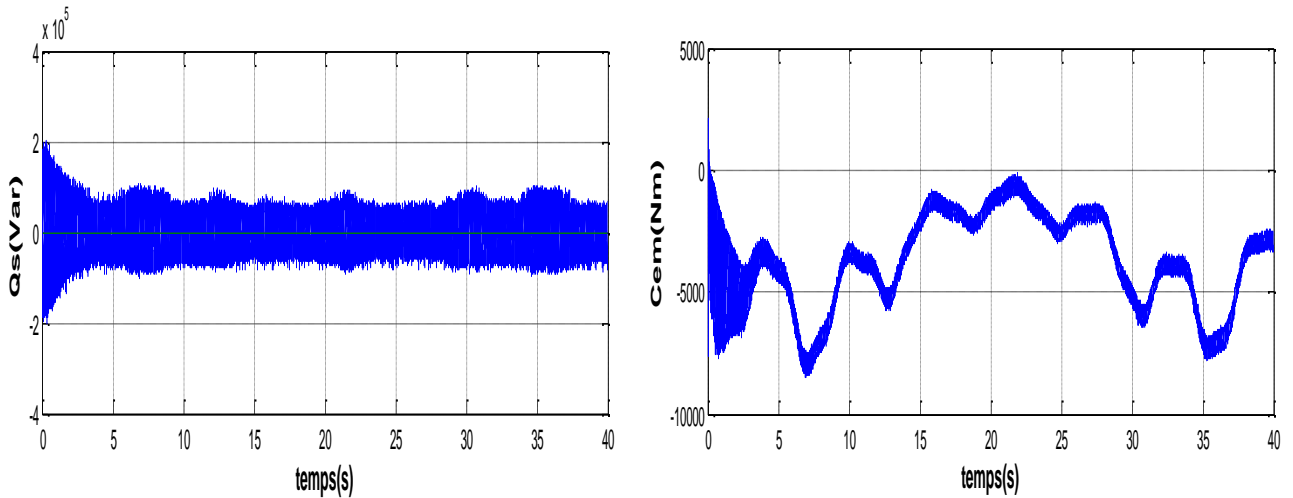
Avec un délai de réponse du tous l'allure Généralement le temps de réponse de ce régulateur est 0.01s. On observe un peu de sensibilité à la variation des grandeurs de référence.

**7.2. Essai 02 : Fonctionnement avec vitesse variable**

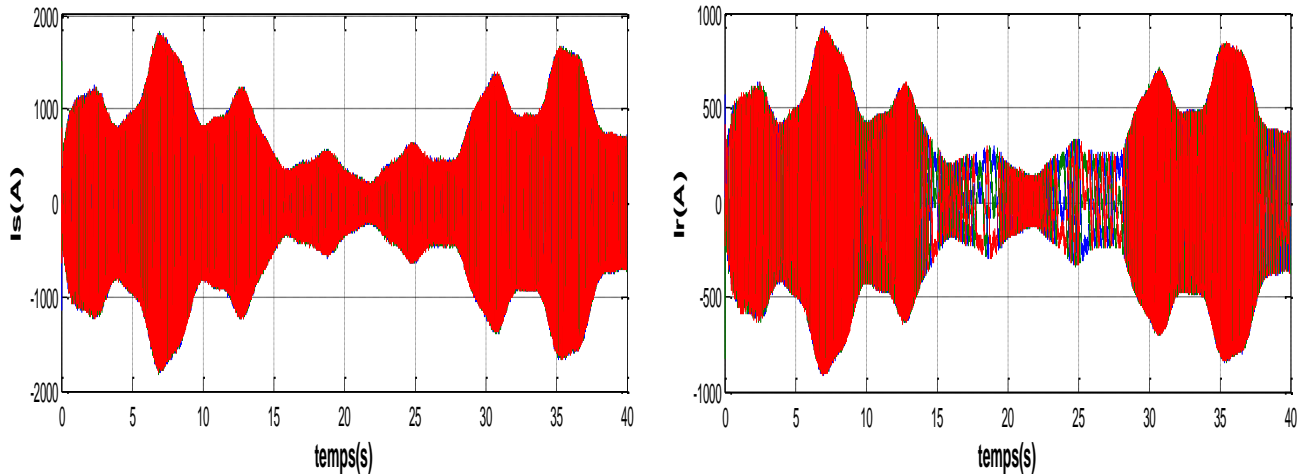
On a effectué le schéma bloc de la structure de commande par orientation du flux statorique de la MADA avec une variation de la vitesse comme vent réel



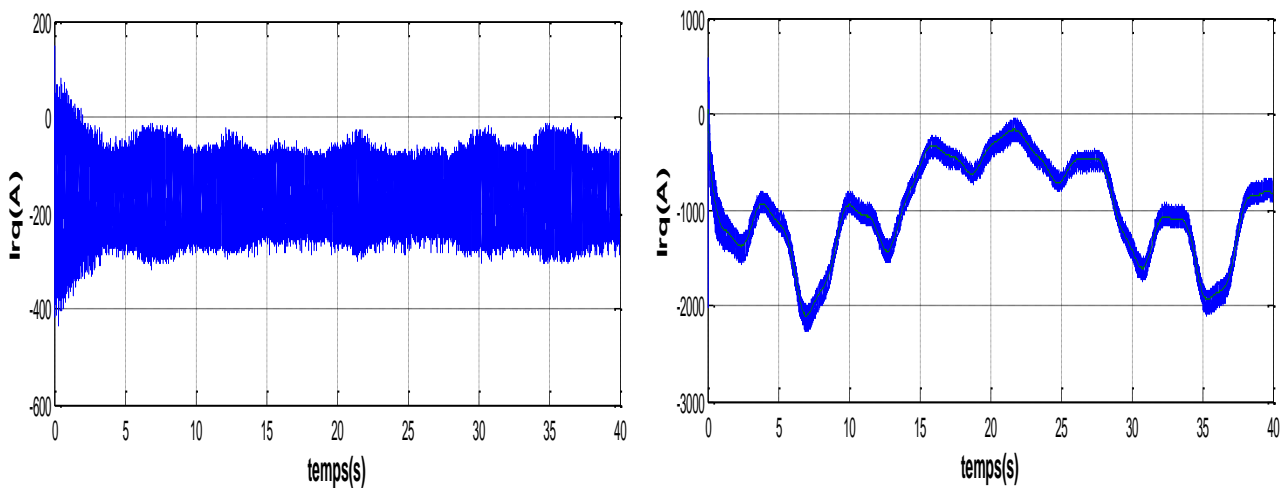
**Fig (3.10) :** vitesse de vent et puissance active statorique



**Fig (3.11) :** puissance réactive statorique et couple électromagnétique



**Fig (3.12) :** courant statorique et courant rotorique



**Fig (3.13) :** courant rotorique selon l'axe d et q

### 7.2.1. Interprétation des résultats :

Nous avons appliqué à notre éolienne un profil de vent et la puissance active qui est présentée dans la figure (3.10). Le couple de la génératrice  $C_{em}$  et réactive du stator sont présentés dans la figure (3.11). Nous avons ensuite présenté le courant du stator dans la figure (3.12), et le courant du rotor axe d et q dans la figure (3.13).

Une variation de la vitesse du vent introduit une variation de la puissance extraite car elle est proportionnelle à la vitesse du vent. Cette puissance est appliquée au système de réglage pour que la puissance active du rotor suive cette puissance, et la puissance réactive du stator est réglée suivant les besoins du réseau (correction du facteur de puissance). Notez également que la commande vectorielle peut être appliquée dans les cas de vent variable avec une réponse retardée.

### 8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié et appliqué la commande vectorielle en puissance active et réactive fournies par le générateur asynchrone à double alimentation, où nous avons introduit les principes et mentionné divers types des boucles possibles à implémenter.

Nous avons ensuite effectué l'étude appliquée où la direction du flux était choisie en dirigeant le flux du stator le long de l'axe d. C'est une méthode efficace et largement déployée qui nous permet de simplifier le modèle de la machine et de séparer le contrôle des deux puissance.

Les résultats de la simulation numérique démontrent la possibilité de séparer les deux puissances , active et réactive, de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, tandis que la composante en quadrature régule la puissance active. dans le chapitre suivant que nous étudierons commande par mode glissant .

# Chapitre 04:

## Commande par mode glissant

## 1. Introduction

La théorie des systèmes à structures variable (SSV) et les modes glissants a fait l'objet d'études détaillées au cours des trente dernières années aussi bien par les chercheurs soviétiques, que par les chercheurs des autres pays. La discussion qui a eu lieu au 1<sup>er</sup> congrès de l'IFAC en 1960 entre Neimark et Fillipov a été concluante dans la mesure où un nouveau problème sur la théorie des modes glissants a été posé. Ce n'est que durant cette discussion que l'ambiguïté de la détermination du comportement dynamique du système commandé sur la surface de commutation a été levée [1]

Dans ce chapitre, nous allons présenter le principe de commande par mode glissant et en décrire les étapes en détail, puis l'appliquer sur une MADA et simuler ensuite l'affichage des résultats. Dans ce dernier, nous étudierons une comparaison entre CMG et régulateur PI.

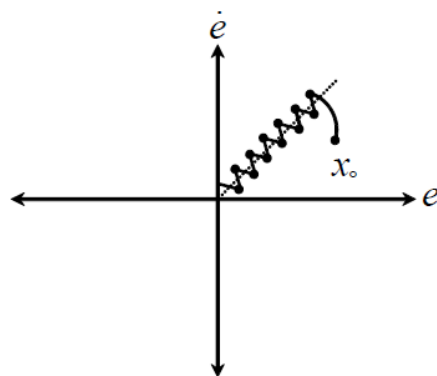
## 2. Généralités sur la théorie de la régulation par mode de glissement

Les lois de régulation classique du type (PI) donnent des bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants ces lois de régulation classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes on doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations de paramètres aux perturbations et aux non linéarités. Les lois de la commande dite. La commande à structure variable (CSV) est par nature une commande non linéaire. La caractéristique principale de ces systèmes est que leur loi de commande se modifie d'une manière discontinue[37].

Dans la pratique, l'utilisation de cette technique de régulation a été longtemps limitée par les oscillations liées aux commutations de la commande et qui peuvent se manifester sur les grandeurs asservies. Depuis de nombreuses solutions ont été proposées permettant de réduire ces oscillations augmentation de la fréquence de commutation, commande continue dans une bande autour de la variété de glissements ou décomposition de la régulation en une composante continue de basse fréquence et en régulation discontinue de haute fréquence

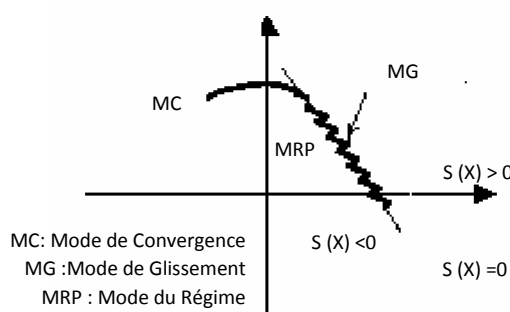
## 3. Principe de la commande à structure variable par régime glissant

Étant un cas particulier de la commande à structure variable, la commande par modes glissants (CMG) a été largement utilisée dans la littérature. Ce succès est dû à sa simplicité de mise en œuvre et à sa robustesse vis-à-vis des variations paramétriques et des perturbations externes. Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien et le glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase comme montré sur la figure (4.01). [38]



**Fig (4.01) :** Modes de fonctionnement dans le plan de phase

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes [39] figure (4.02)



**Fig(4.02) :** mode trajectoire dans le plan de phase

- a. Le mode de convergence (MC) :** durant lequel la variable à réguler se déplace à partir de n'importe quel point du plan de phase vers la surface de commutation  $S(x)=0$  et l'atteint dans un temps fini. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- b. Le mode de glissement (MG) :** durant lequel la variable d'état a atteint la surface glissante et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(x)=0$ .
- c. Le mode de régime permanent (MRP) :** il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre. Il caractérise la qualité et la performance de la commande. Il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non linéaires.

#### 4. Conception de la commande par mode de glissement :

Les avantages de la commande par mode glissant sont importantes et multiples; la haute précision, la bonne stabilité, la simplicité, l'invariance, la robustesse...etc. Ceci lui permet d'être particulièrement adapté pour les systèmes ayant un modèle imprécis, Dans ce cas, la structure d'un contrôleur comporte deux parties: une partie continue représentant la dynamique du système durant le mode glissant et une autre discontinue représentant la dynamique du système durant le mode de

convergence. Cette dernière est importante dans la commande non linéaire car elle a pour rôle d'éliminer les effets d'imprécisions et des perturbations sur le modèle.[40]

La conception des régulateurs par les modes glissants prend en charge les problèmes de stabilité et des performances désirées d'une façon systématique. La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes : [39]

- choix de la surface-
- L'établissement des conditions de la convergence-
- La détermination de la commande

#### 4.1. Choix des surfaces de glissement :

On considère le modèle d'état suivant :

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ x \end{bmatrix} = [A][x] + [B][U] \quad (4.1)$$

Où  $[x] \in R^n$  est le vecteur d'état,  $[U] \in R^m$  le vecteur de commande, avec  $n > m$ .

Généralement, le choix du nombre des surfaces de glissement est égal à la dimension du vecteur de commande  $[U]$ .

Afin d'assurer la convergence d'une variable d'état  $x$  vers sa valeur de référence  $x_d$ , plusieurs travaux proposent la forme générale suivante :

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \delta \right)^{r-1} e(x) \quad (4.2)$$

Avec :

$\delta$  : gain positif,

$e(x) = x_d - x$  : écart de la variable à réguler,

$r$  : degré relatif, c'est le plus petit entier positif représentant le nombre de fois qu'il faut dériver afin de faire apparaître la commande, tel que :  $\frac{\partial S}{\partial U} \neq 0$  assurant la contrôlabilité;  $S(x)$  est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse  $e(x)$  tend vers zéro pour un choix correct du gain  $\delta$  et c'est l'objectif de la commande.

#### 4.2. Condition de convergence

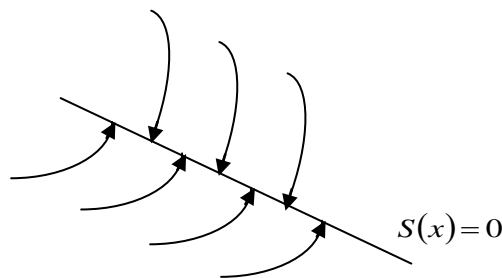
La condition de convergence permet au système de converger vers la surface de glissement. Il s'agit alors de formuler une fonction scalaire positive  $V(x) > 0$  pour les variables d'états du système qui est définie par la fonction de Lyapounov suivante:

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (4.3)$$

Pour que la fonction de Lyapounov décroisse, il suffit de s'assurer que sa dérivée soit négative. Ceci est vérifié par la relation suivante

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) < 0 \quad (4.4)$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par  $S^2(x)$ , diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux coté figure (4.03). Cette condition suppose un régime glissant idéal [41]



**Fig.(4.03) :** Trajectoire de l'état vis-à-vis de la surface

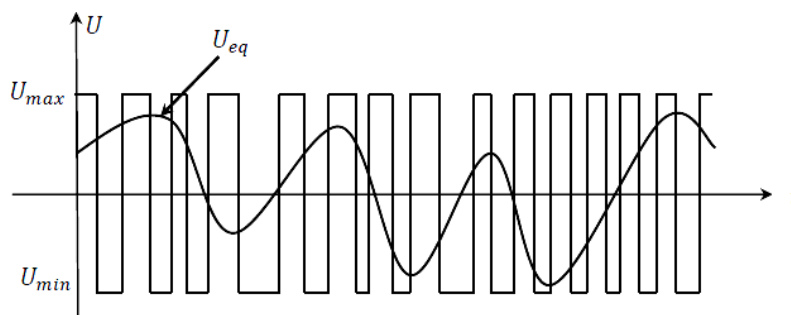
### 4.3. Détermination la loi de commande

On a déterminé la loi de commande nécessaire pour attirer et maintenir la trajectoire d'état vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre toute en garantissant les conditions d'existence du mode de glissement. La structure de la commande  $U(t)$  comporte deux commandes, l'une appelée  $U_{eq}$  qui concerne la linéarisation exacte du système, l'autre appelée  $\Delta U$  qui concerne la stabilisation du système, cette dernière est très importante dans la technique de commande par mode de glissement, car elle est utilisée pour éliminer les effets d'imprécision du modèle et de rejeter les perturbations extérieures.

$$U(t) = \Delta U + U_{eq} \quad (4.5)$$

$U_{eq}$  : la commande équivalente ou nominale est déterminée par le modèle du système. On peut la considérer comme la valeur moyenne continue que prend la commande lors d'une commutation rapide entre deux valeurs  $U_{max}$  et  $U_{min}$ . Elle sert à maintenir la variable à contrôler sur la surface de glissement  $s(x)$ .

La commande équivalente est déduite en considérant que la dérivée de la surface est nul  $\dot{s}(x) = 0$ .



**Fig (4.04):** La valeur continue  $U_{eq}$  prise par la commande lors de la commutation entre  $U_{max}$  et  $U_{min}$

$\Delta U$  : la commande de glissement ou attractive est utile pour compenser les incertitudes du modèle. Elle est constituée de la fonction signe « *sign* » de la surface de glissement  $s(x)$ , multipliée par une constante  $kx$ .

### 4.3.1. La commande équivalente :

La commande équivalente est augmentée par un terme appelé action de la commande discontinue  $u_n$ , pour satisfaire les conditions d'atteinte de la surface  $s(x)$ . Dans ces conditions la commande est écrite comme suit:

$$u = u_{eq} + u_n \quad (4.6)$$

La première étape, est de définir une entrée  $u_{eq}$ , de telle façon que la trajectoire d'état reste sur la surface de commutation  $s(x) = 0$ .

La dérivée de la surface  $s(x)$  est [51]:

$$\dot{s}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} A(x) + \frac{\partial S}{\partial x} B(x) u_{eq} + \frac{\partial S}{\partial x} B(x) u_n \quad (4.7)$$

La commande équivalente est déterminée durant la phase de glissement et la phase du régime permanent en identifiant que  $s(x) = 0$ , et par conséquent  $\dot{s}(x) = 0$ , et  $u_n = 0$ .

Dans ces conditions la solution de l'équation (4.8) et alors :

$$u_{eq} = - \left( \frac{\partial S}{\partial x} B(x) \right)^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} A(x) \quad (4.8)$$

Avec la condition que:  $\frac{\partial S}{\partial x} B(x) \neq 0$ .

Une fois  $u_{eq}$  définit, (4.9) est substituée dans le système (4.8), pour avoir la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

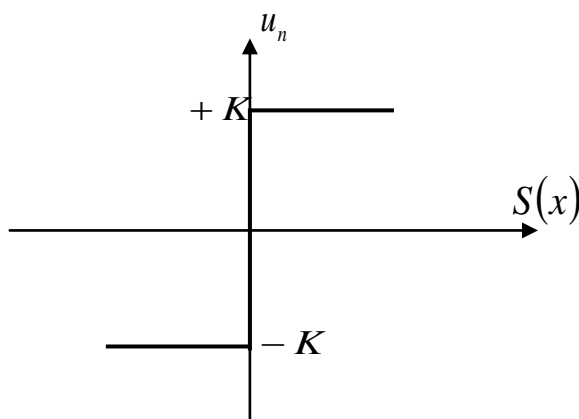
$$\dot{S}(x,t) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t) u_n \quad (4.9)$$

### 4.3.2. La commande discontinue de base :

La commande  $u_n$  est définie durant le mode de convergence et doit satisfaire la condition  $S_n \dot{S} < 0$ . Afin de satisfaire cette condition, le signe de  $u_n$  doit être opposé à celui de  $S(x,t) \frac{\partial S}{\partial x} B(x,t)$ .

La commande  $u_n$ , est donnée par la forme de base qui est celle d'un relais représenté par la fonction « *sign* » figure (4.05) :

$$u_n = K \cdot \text{sign}(S(x)) \quad (4.10)$$



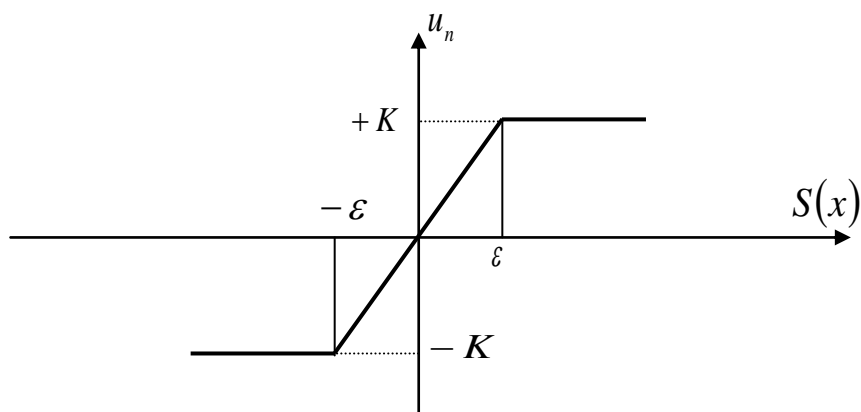
**Fig.(4.05) :** Fonction « *sign* »

Pendant l'utilisation de la commande de type relais peut provoquer des dynamiques indésirables caractérisées par le phénomène de chattering.

D'autres méthodes sont proposées pour limiter ce phénomène, on utilise pour la commande par régulateurs à mode glissant la commande dite douce à un seul seuil, elle est donnée par le système (4.11) et représentée sur la figure.(4.06).

$$u_n = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} K \cdot S(x) & \text{si } |S(x)| < \varepsilon \\ K \cdot \text{sign}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \end{cases} \quad (4.12)$$

Cette fonction est connue aussi par, la fonction saturation « *sat* ».



**Fig.(4.06) :** Commande adoucie « sat »

Les oscillations de hautes fréquences qui apparaissent sur les réponses en régime glissant peuvent être évitées en rendant continue la commande discontinue  $u_n$ . Pour cela, on remplace la fonction *sign* par la fonction intégrale. Elle est définie comme suit [42]:

$$u_n = K \frac{S(x)}{|S(x)| + \delta} + \eta \quad (4.12)$$

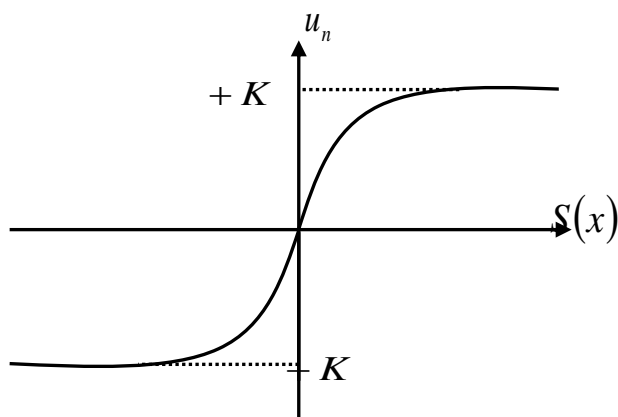
Avec:

$$\delta = \begin{cases} \delta_0 & \text{si } |S(x)| \geq \varepsilon \\ \delta_0 + \gamma \int S(x) dt & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (4.13)$$

$$\eta = \begin{cases} 0 & \text{si } |S(x)| \geq \varepsilon \\ \xi + \gamma \int S(x) dt & \text{si } |S(x)| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (4.14)$$

Où:  $\delta, \eta, \gamma, \xi, \varepsilon$  sont des constantes positives.

La commande est illustrée à la figure (4.07):



**Fig.(4.07) :** Commande intégrale

Entre ces commande, on choisit une telle commande en prendre compte des paramètres de chaqu'une entre eux. La fonction sign très rapide mais elle génère beaucoup de chattering (changement d'état brusque). La fonction sat et intégrale sont douce par rapport à la fonction sing , et le changement d'état est lente,

## 5. Utilisation du RMG pour le contrôle de la puissance active et réactive de la MADA :

### 5.1. Contrôle de la puissance active :

Pour contrôler la puissance active on prend  $r=1$ , l'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme :

$$S(P) = (P_{sref} - P_s) \quad (4.15)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(P) = (\dot{P}_{sref} - \dot{P}_s) \quad (4.16)$$

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, la puissance active peut être donnée (contrôlée) en fonction du courant  $I_{qr}$ .

On remplace l'expression de la puissance active (3.12) dans (4.16) :

$$\dot{S}(P) = \left( \dot{P}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{qr} \right) \quad (4.17)$$

On tire l'expression du courant  $\dot{I}_{qr}$  de l'équation de la tension  $V_{qr}$  (3.17)

$$\dot{S}(P) = \dot{P}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} \left( V_{qr} - R_r I_{qr} - g \omega_s L_r \sigma I_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) \quad (4.18)$$

En remplaçant l'expression de  $V_{qr}$  par  $V_{qreq} + V_{qrm}$  commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(P) = \dot{P}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} \left( (V_{qreq} + V_{qrn}) - R_r I_{qr} - g \omega_s L_r \sigma I_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) \quad (4.19)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :  $S(P) = 0$ ,  $\dot{S}(P) = 0$  et  $V_{qrn} = 0$ .

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente  $V_{qreq}$  qui s'écrit :

$$V_{qreq} = \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \dot{P}_{sref} - \left( R_r I_{qr} + g \omega_s L_r \sigma I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \right) \quad (4.20)$$

Et

$$V_{qr.n} = K_{Vqr} \text{sign}(S(P)) \quad (4.21)$$

$K_{Vqr}$  Est un gain positif qui sera calculé par la suite.

## 5.2 Contrôle de la puissance réactive :

Pour  $r=1$ , l'expression de la surface de contrôle de la puissance réactive a pour forme :

$$S(Q_s) = Q_{sref} - Q_s \quad (4.22)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(Q_s) = \dot{Q}_{sref} - \dot{Q}_s \quad (4.23)$$

On remplace l'expression de la puissance réactive (3.15)

$$\dot{S}(Q_s) = \dot{Q}_{sref} - \left( V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{dr} \right) \quad (4.24)$$

On tire l'expression du courant  $\dot{I}_{dr}$  de l'équation de la tension  $V_{dr}$  (3.18)

$$\dot{S}(Q_s) = \dot{Q}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{dr} - R_r I_{dr} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr}) \quad (4.25)$$

D'où l'expression de  $V_{dr} = V_{dr.eq} + V_{dr.n}$

En remplaçant cette expression dans l'équation (4.25), nous trouvons :

$$\dot{S}(Q_s) = \dot{Q}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} ((V_{dr.eq} + V_{dr.n}) - R_r I_{dr} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr}) \quad (2.26)$$

Durant le mode de glissement et le régime permanent, nous avons:  $S(Q) = 0$ ,  $\dot{S}(Q) = 0$  et  $V_{dr.n} = 0$ .

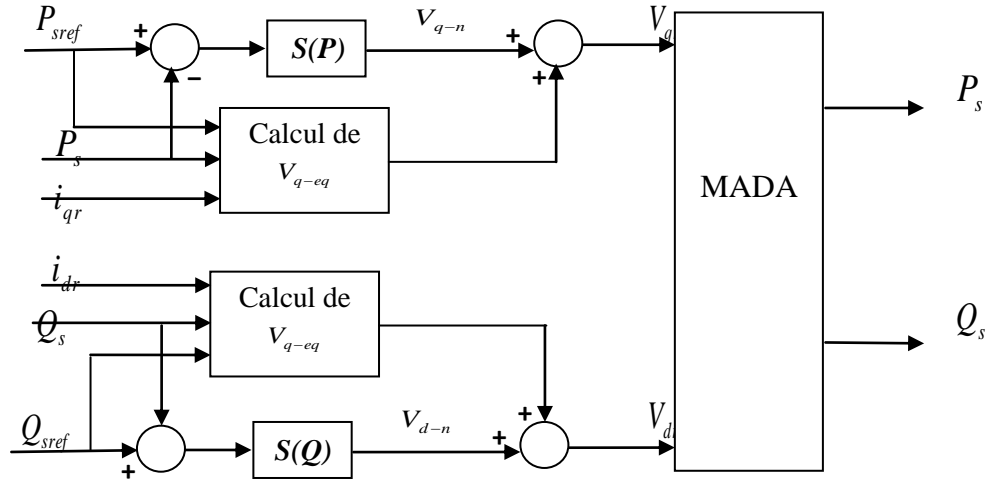
D'où nous déduisons :

$$V_{dr.eq} = \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \dot{Q}_{sref} - R_r I_{dr} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr} \quad (4.27)$$

Et

$$V_{dr.n} = K_{Vdr} \text{sign}(S(Q)) \quad (4.28)$$

$K_{vdr}$  Est un gain positif qui sera calculé par la suite. On peut résumer ces équations par la figure (4.08) :



**Fig.(4.08):** Schéma bloc de la structure de commande par mode

### 5.3 Calcul des paramètres $K_{vqr}$ et $K_{vdr}$ :

Ces paramètres sont choisis de façon à :

- assurer la rapidité de la convergence,
- imposer la dynamique en mode de convergence et de glissement,
- limiter le courant à une valeur admissible pour un couple maximal.

#### ➤ Calcul de $K_{vqr}$ :

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $S(P)\dot{S}(P) < 0$  soit vérifiée, on pose:

Selon le théorème de Lyapunov (4.6) :

- Si  $S(P) > 0 \Rightarrow \dot{S}(P) < 0$

$$(4.19) \Leftrightarrow \dot{P}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} \left( K_{vqr} - R_r I_{qr} - g \omega_s L_r \sigma I_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) < 0$$

(4.29)

$$\Rightarrow K_{vqr} > \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \dot{P}_{sref} - R_r I_{qr} - g \omega_s L_r \sigma I_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s} \quad (4.30)$$

- Si  $S(P) < 0 \Rightarrow \dot{S}(P) > 0$

$$(4.19) \Leftrightarrow \dot{P}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} \left( -K_{Vqr} - R_r I_{qr} - g \omega_s L_r \sigma I_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) > 0 \quad (4.31)$$

$$\Rightarrow K_{Vqr} > - \left( - \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \dot{P}_{sref} + R_r I_{qr} + g \omega_s L_r \sigma I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \right) \quad (4.32)$$

A partir de ces deux équations :

$$K_{Vqr} > \left| \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \dot{P}_{sref} + R_r I_{qr} + g \omega_s L_r \sigma I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \right| \quad (4.33)$$

➤ **Calcul de  $K_{Vdr}$  :**

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $s(Q)\dot{s}(Q) < 0$  soit vérifiée, on pose:

Selon le théorème de Lyapunov (4.6) :

- Si  $s(Q) > 0 \Rightarrow \dot{s}(Q) < 0$

$$(4.26) \Leftrightarrow \dot{Q}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (K_{Vdr} - R_r I_{dr} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr}) < 0 \quad (4.34)$$

$$\Rightarrow K_{Vdr} > \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \dot{Q}_{sref} - R_r I_{dr} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr} \quad (4.35)$$

- Si  $s(Q) < 0 \Rightarrow \dot{s}(Q) > 0$

$$(4.26) \Leftrightarrow \dot{Q}_{sref} - V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (-K_{Vdr} - R_r I_{dr} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr}) > 0 \quad (4.36)$$

$$\Rightarrow K_{Vdr} > \left( - \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \dot{Q}_{sref} + R_r I_{dr} + g \omega_s L_r \sigma I_{qr} \right) \quad (4.37)$$

A partir de ces deux équations :

$$K_{Vdr} > \left| - \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \dot{Q}_{sref} + R_r I_{dr} + g \omega_s L_r \sigma I_{qr} \right| \quad (4.38)$$

## 6. Résultats de simulation :

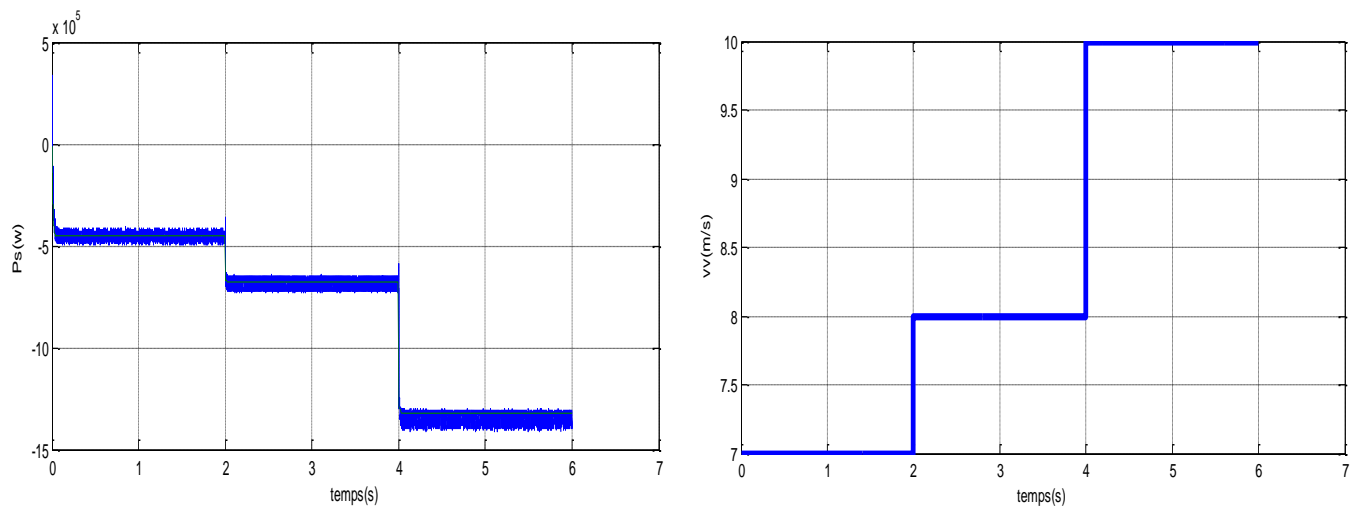
### 6.1 Essai 01 : fonctionnement avec Echelon de vitesse:

On a effectuée le schéma bloc de la CMG de la MADA avec une variation de la vitesse suivant :

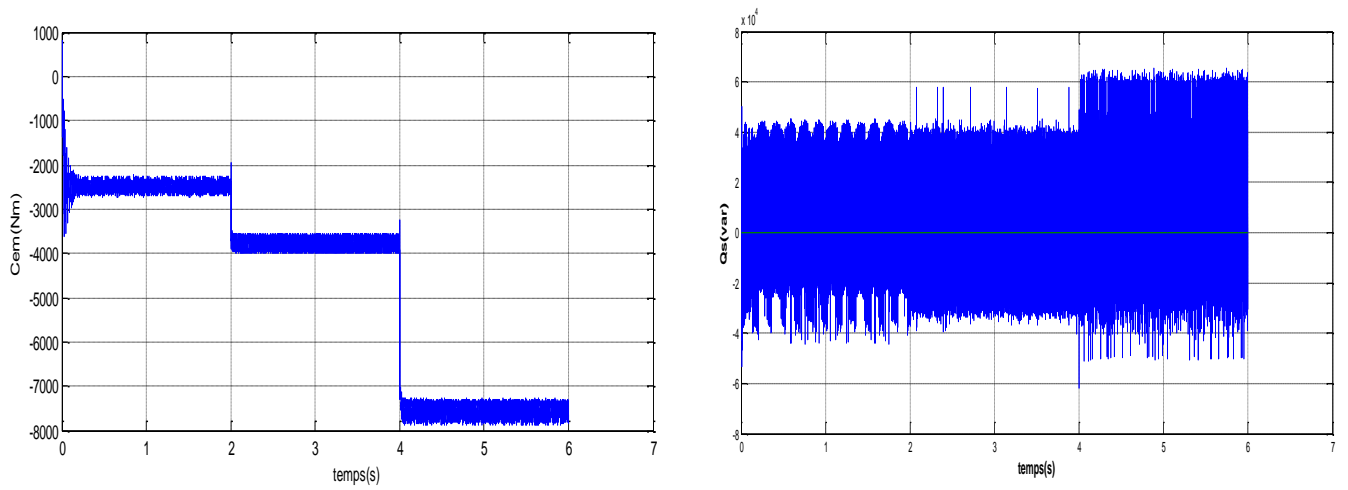
Échelon comme montre de 0-2 -7m/s

2-4 -9m/s

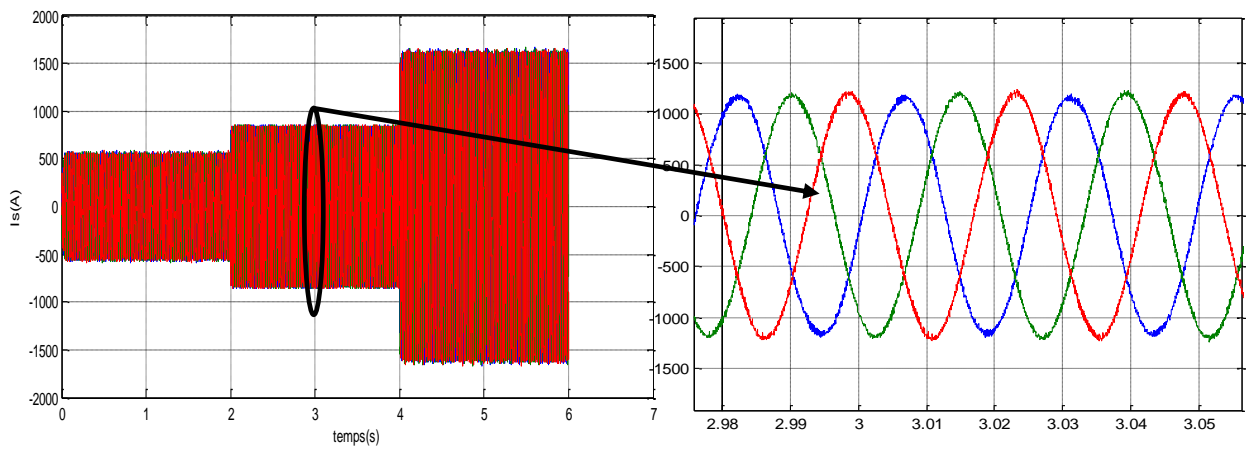
4-6 -10m/s



**Fig (4.09) :** vitesse de vent et puissance active statorique



**Fig (4.10) :** couple électromagnétique puissance réactive statorique



**Fig (4.11) :** courant statorique et Zome

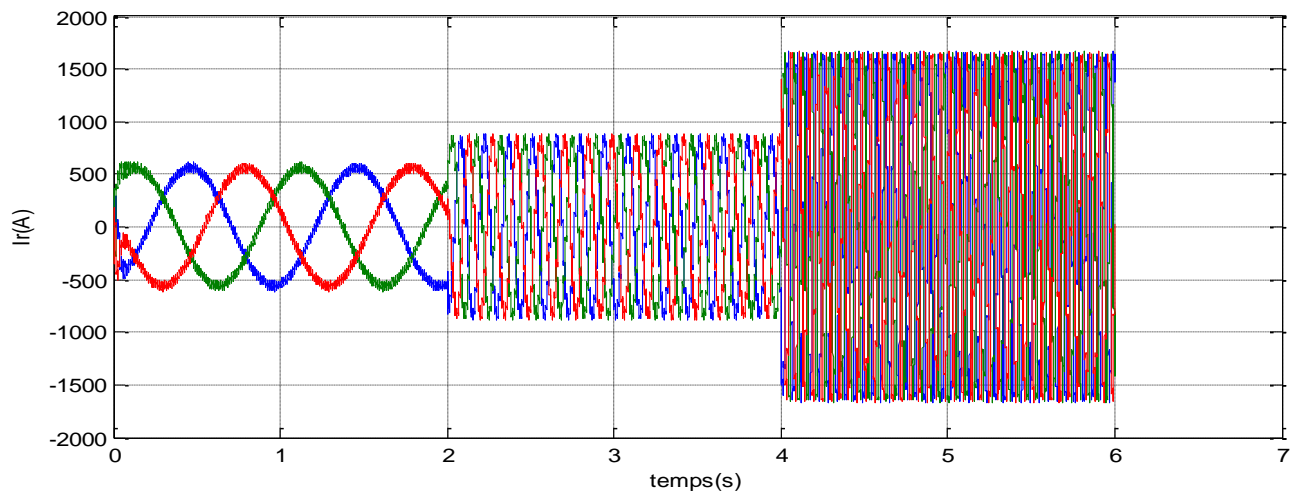


Fig (4.12) : courant rotorique

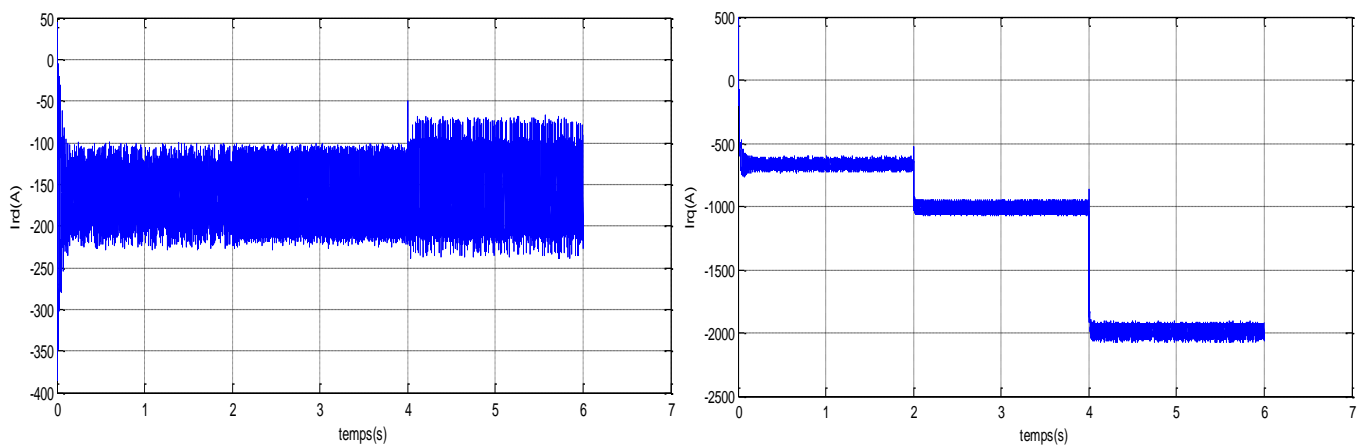


Fig (4.13) : courant rotorique selon l'axe d et q

### 6.1.1. Interprétation des résultats

La figure (4.09) présente la puissance active de la machine et celle de l'MPPT extraite du vent on constate que le allure de la puissance suit la forme de la vitesse si la vitesse de vent augmente la puissance générée augmente, on remarque aussi un oscillations de la puissance autour de la référence c'est le phénomène de chattering

- On a gardé la puissance réactive figure (4.10) toujours égale à zéro (0) par maintenir un facteur de puissance unitaire
- Les deux composant du courant rotorique ( $I_{rd} - I_{rq}$ ) sont aussi présentes dans les figure (4.13)  
La composante directe ( $I_d$ ) est varié avec la variation de la puissance 'Q' et l'autre donc l'axe 'q' est identique à la puissance 'P'  
Donc la puissance 'P' est commandée par  $I_{qr}$  et la puissance 'Q' commandée par  $I_{dr}$  est le découplage entre eux
- le courant ( $I_s$ ) est l'image de la puissance 'P' dans l'augmentation et diminution, avec un fréquence de 50 hz .
- ( $I_r$ ) même chance à propos de variation , le différence et donc la fréquence

$$f_r = 1\text{hz}$$

$$f_r = 12\text{hz}$$

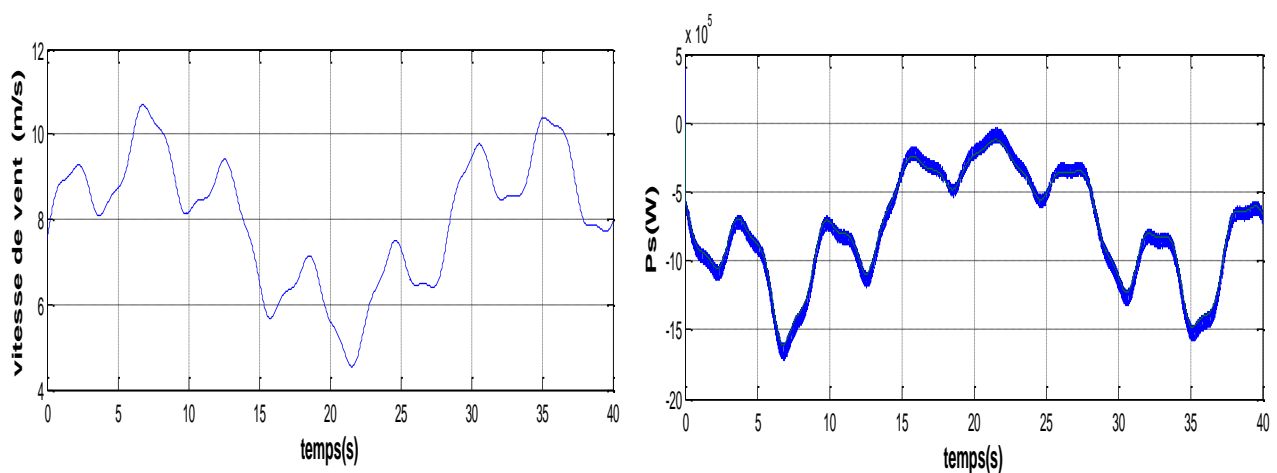
$$f_r = 25\text{hz}$$

- Le couple électromagnétique de la génératrice varie selon celle de la turbine qui est en fonction de la vitesse du vent figure (4.10). Les deux couples vérifient la relation de l'MPPT  
 $C_g = G * C_{em}$ .

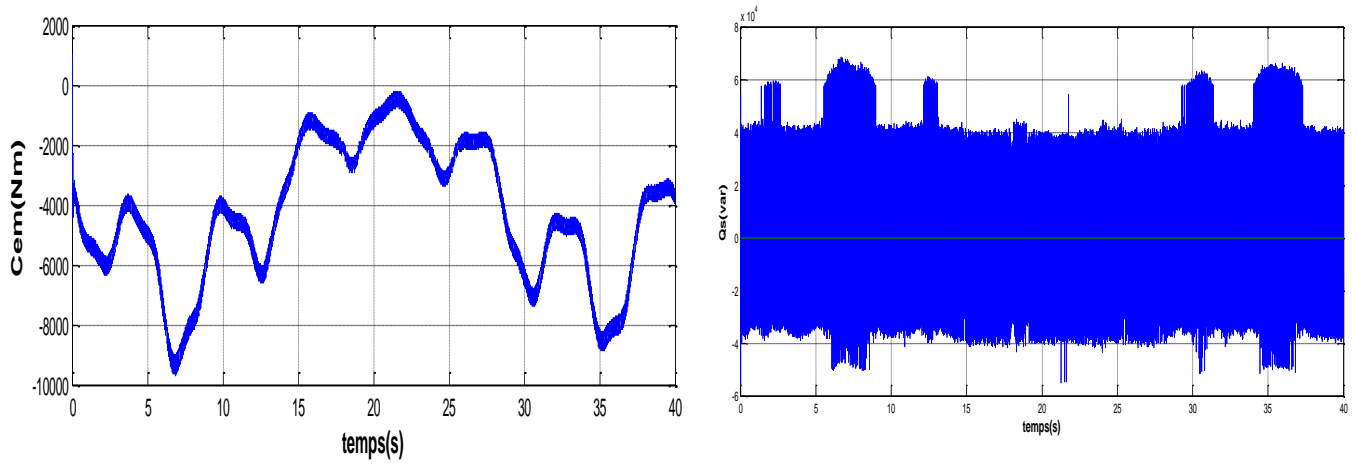
les courants rotoriques ont une basse fréquence qui vérifie  $f_r = g * f_s$  qui nous assure un fonctionnement dans la zone de la stabilité de la MADA (caractéristique couple vitesse) 30% autour de la vitesse de synchronisme.

## 6.2. Essai 02 : Fonctionnement avec vitesse variable

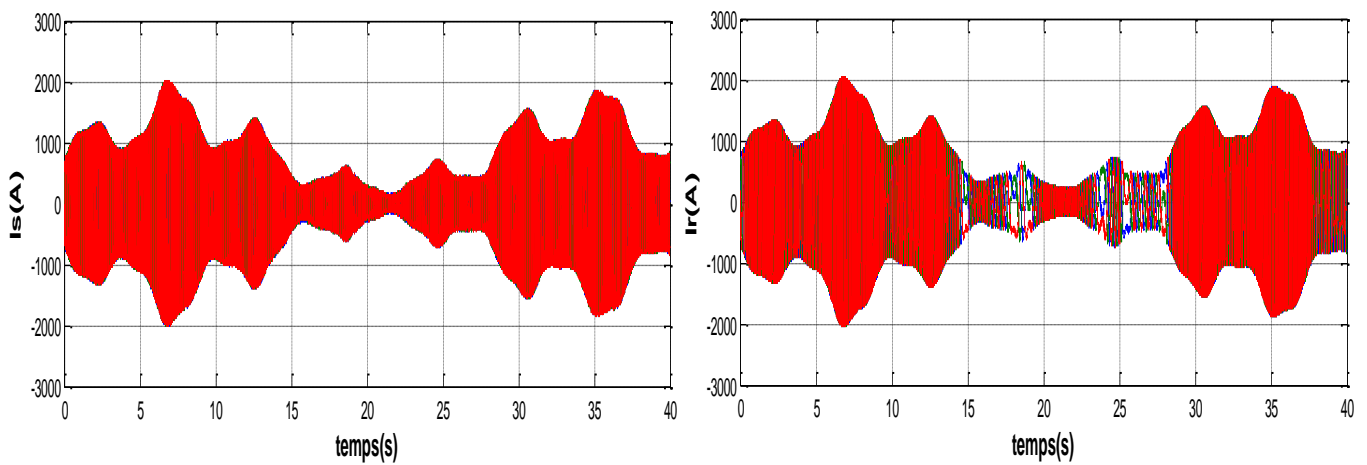
On a effectuée le schéma bloc de la CMG de la MADA avec une variation de la vitesse comme vent réel .



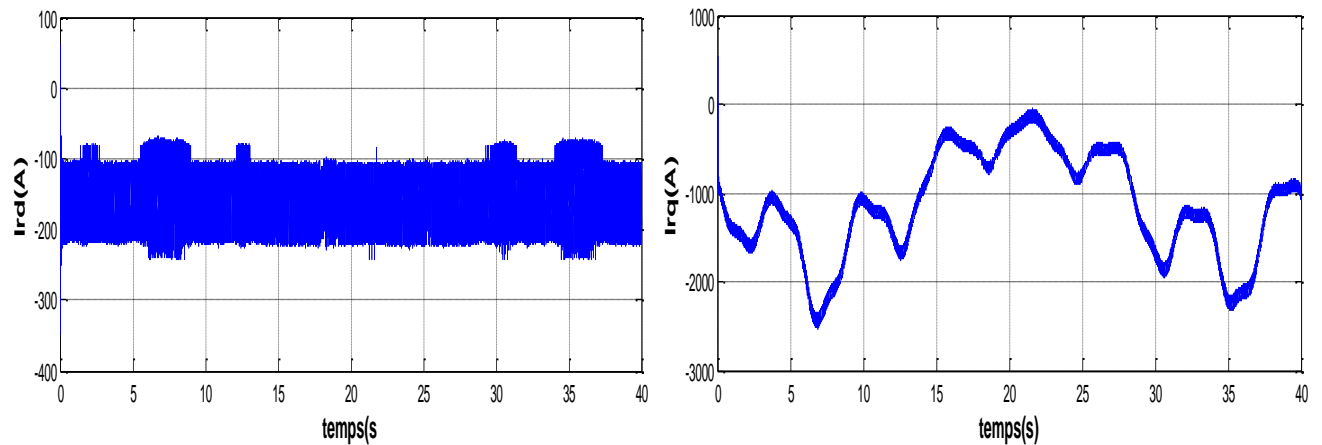
**Fig(4.14) :** vitesse de vent et puissance active statorique



**Fig (4.15) :** couple électromagnétique et puissance réactive statorique



**Fig (4.16) :** courant statorique et courant rotorique



**Fig (4.17) :** courant rotorique selon l'axe d et q

### 6.2.1. Interprétation des resultants

Les courbes précédentes représentent toutes les ( $V_v, P, Q_s, C_{em}, I_s, I_r, I_{rd}, I_{rq}$ ) respectivement, dans le cas de la configuration de vent réelle. D'après ces résultats on constate clairement que la courbe de la puissance active est toujours suit sa référence à la lettre, malgré le changement brusque et instantané. Même chose concernant la courbe de la puissance réactive. Ce qui prouve la précision de la commande par mode glissant plus la possibilité d'utiliser dans un système éolien à vitesse variable pour obtenir un bon rendement.

## 7. Comparaison entre les commandes par régulateur PI et RMG :

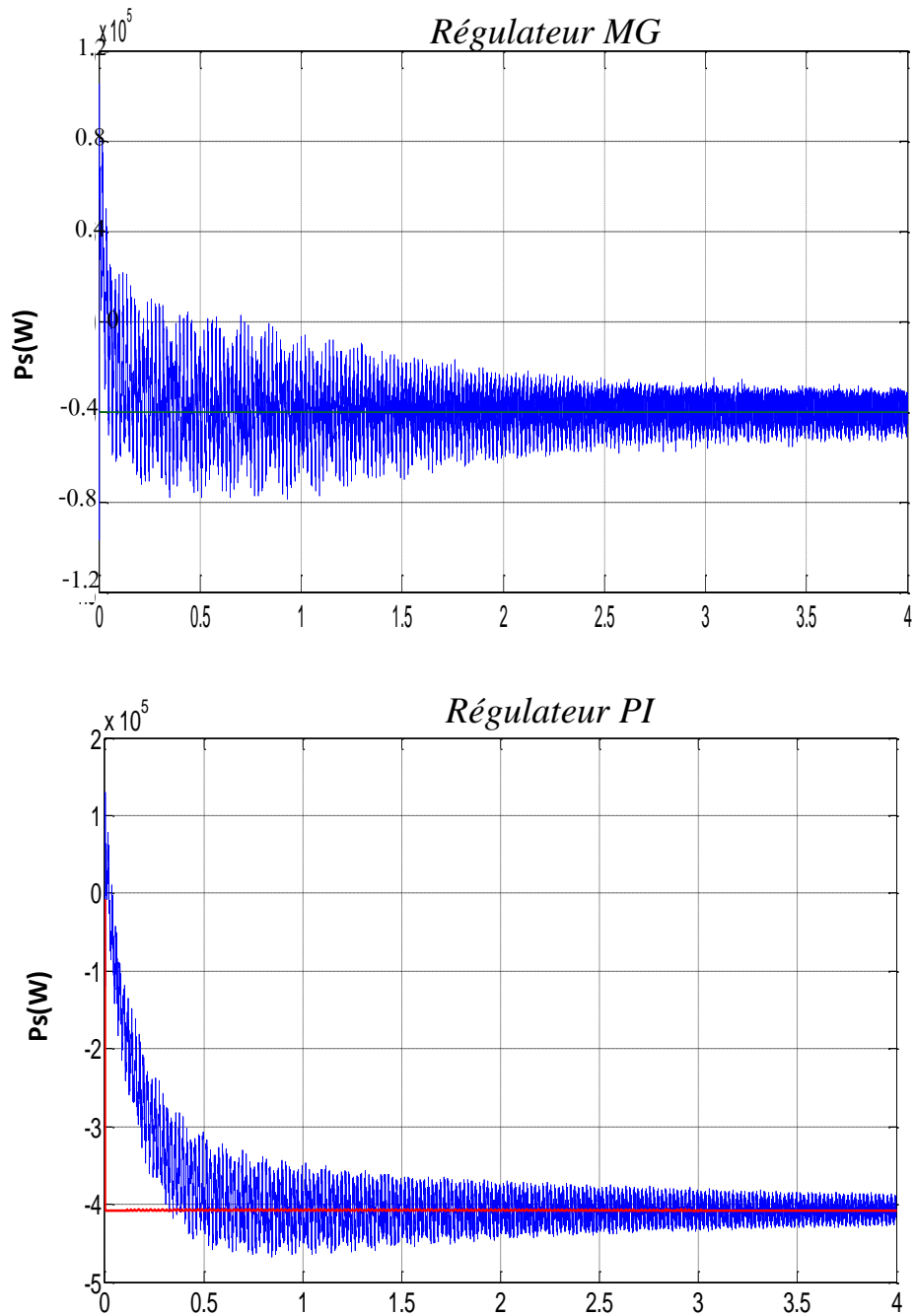
Après avoir effectué l'application du régulateur PI et celui par mode de glissement dans la commande direct de la puissance active et réactive générée par la MADA, nous nous intéressons à l'étude de la robustesse de ces deux types de régulateurs.

En effet, pour une étude comparative plus poussée, il serait intéressant de comparer les réponses en puissance active et réactive des ces deux régulateurs:

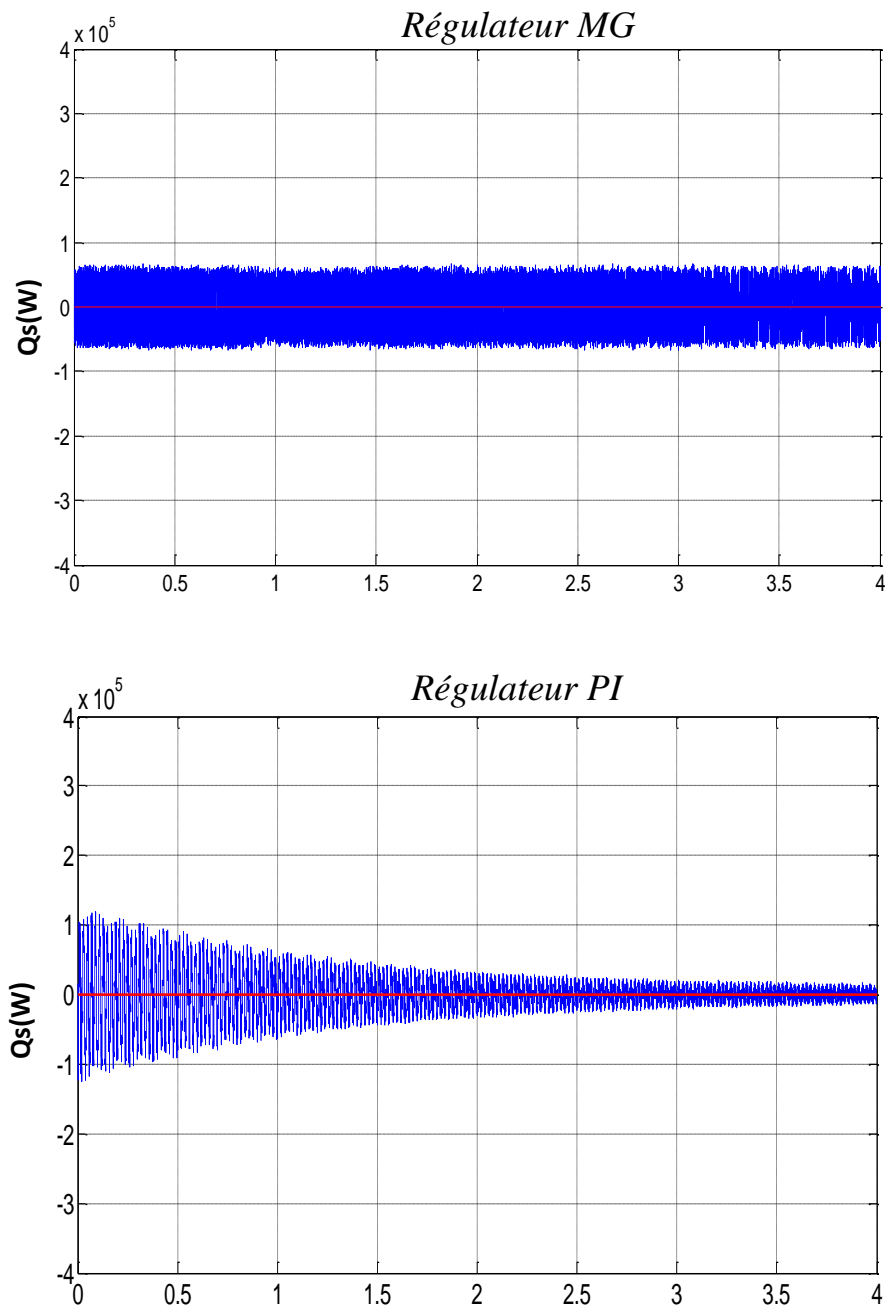
- Le système est soumis à des variations de consigne dans les différentes plages de fonctionnement (ce que traduit les figures (4.18)...(4.19)),
- Le système est soumis à des variations des paramètres du modèle (ce que traduit les figures (4.20) et (4.24)).

La figure (4.18) montre la réponse en puissance active du système avec un régulateur classique PI et le régulateur à mode glissant (RMG).

On remarque que les performances sont très satisfaisantes, du point de vue poursuite de la consigne, mais d'une durée de convergence de  $t=0.1s$  pour le RMG plus courte que celle du régulateur PI  $t=0.4s$ .



**Fig (4.18) :** puissance active selon régulateur MG et PI

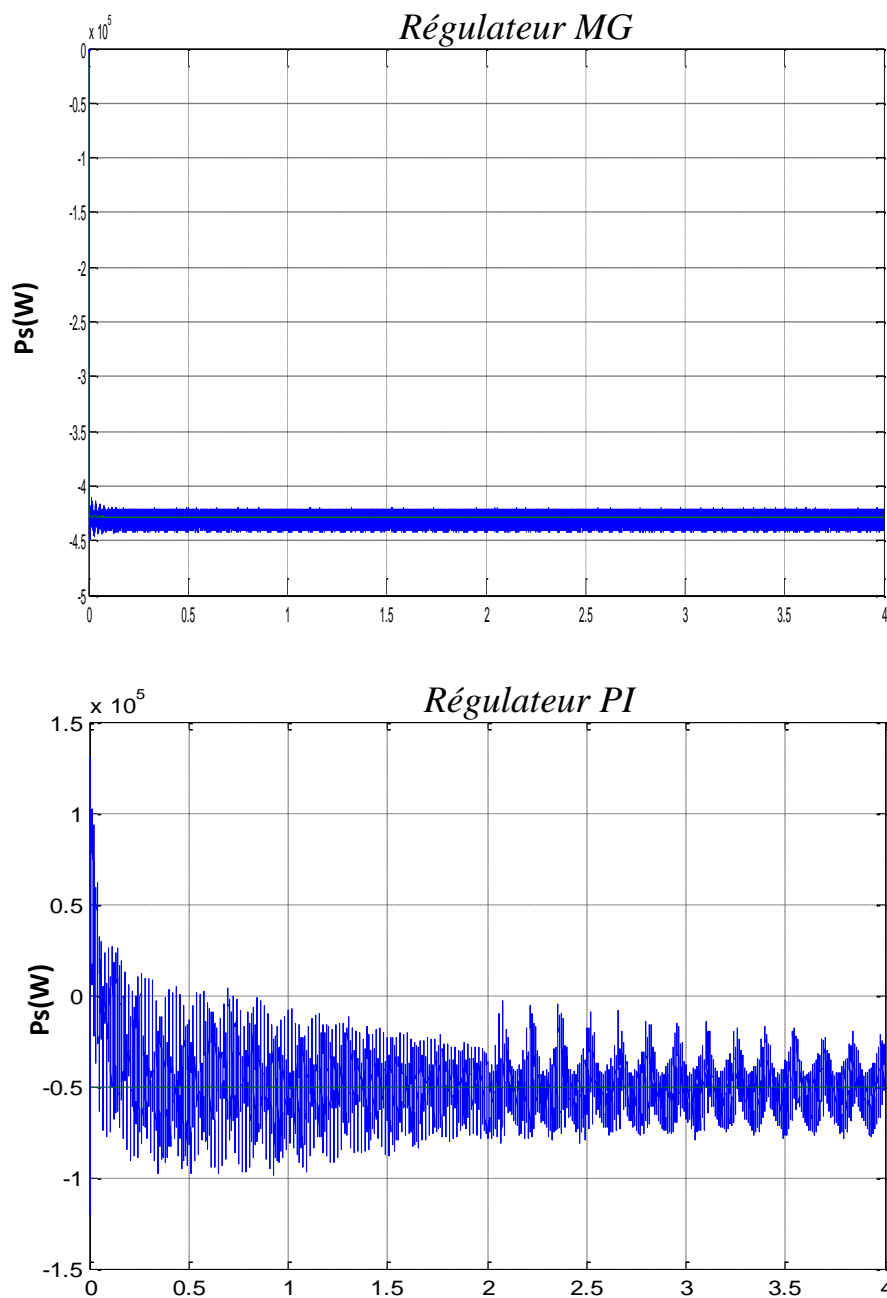


**Fig (4.19)** : puissance réactive selon régulateur MG et PI

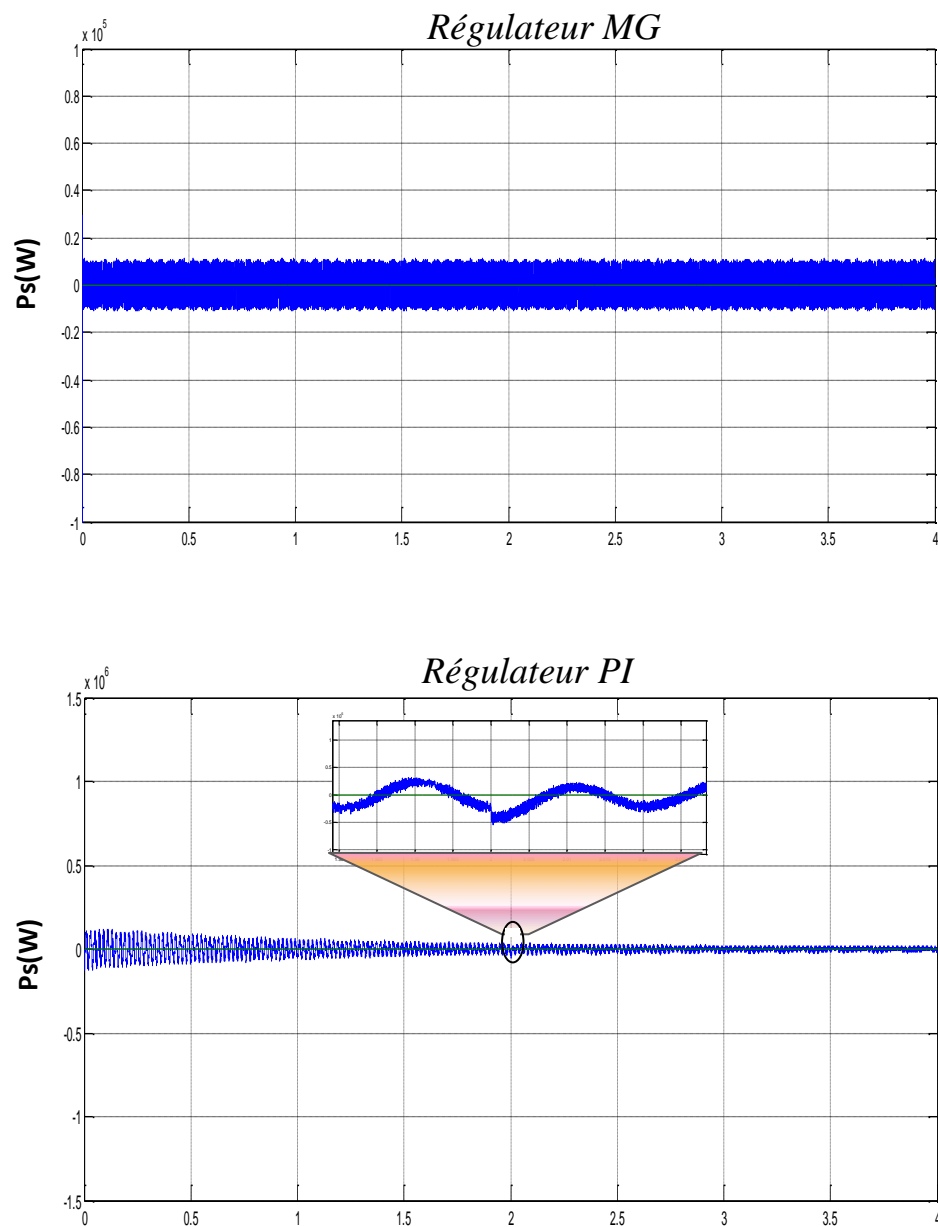
### 7.1 Variation de la résistance rotorique :

La figure (4.20) représente l'évolution de la puissance active du stator en utilisant le régulateur PI et régulateur RMG , La figure (4.21) représente l'évolution de la puissance réactive du stator en utilisant régulateur RMG et le régulateur PI et.RMG pour une augmentation de 30% de la résistance rotorique .On constate :

- Une performance très satisfaisante, de point de vue poursuite de la consigne
- Une augmentation légère de temps de convergence pour les deux régulateurs.



**Fig (4.20) :** puissance active selon régulateur MG et PI



**Fig(4.21):** puissance réactive selon régulateur MG et PI

## 8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le principe de la CSV pour les différentes structures de la commande discontinue  $u_n$ . Nous avons étudié les techniques de conception des régulateurs par mode glissants. En effet, la conception de ces régulateurs prend en charge les problèmes de stabilité et les performances désirées d'une façon systématique.

La mise en œuvre de cette méthode de commande nécessite principalement trois étapes:

- *Le choix de la surface,*
- *L'établissement des conditions de la convergence,*
- *La détermination de la loi de commande.*

Et on a appliqué de la CSV à la machine asynchrone à double alimentation pour le contrôle de la puissance active et réactive.

La fin de ce chapitre est consacré à une simple comparaison entre la commande vectorielle à régulateur PI et la CSV de la MADA, l'application du régulateur à MG pour la commande des puissances active et réactive de la MADA donne des résultats satisfaisantes.

Les résultats de comparaison montrent qu'il n'y a pas de grandes différences entre les performances de ces deux régulateurs, dans notre application mais peut être pour des autres applications qui nécessitent des grandes précisions ou bien une modélisation adéquate, il apparaît bien la différence entre ces deux régulateurs.

## Conclusion générale

---

Le but de ce travail concerne l'étude, la modélisation et la commande non linéaire d'un système de production d'énergie éolienne. Pour cela, une modélisation des différents composants de ce système a été menée. Ces modèles ont été utilisés pour l'élaboration de plusieurs techniques de commandes pour assurer un contrôle précis et continu des puissances statoriques générées tout en garantissant une stabilité, une rapidité de poursuite avec une erreur statique nul. Cela a permis d'obtenir un rendement élevé du système et une qualité de production optimale

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur les stades développement de l'énergie éolienne à travers l'histoire, leur propagation et leur exploitation dans le monde, puis en Algérie. Nous avons ensuite mentionné les types de turbines et les différents types de générateurs utilisés dans le système éolien. Nous avons choisi la machine asynchrone à double alimentation de par ces qualités de fonctionnement

Le deuxième chapitre, nous avons décrit la partie mécanique contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre. Nous avons ensuite établi les modèles de ces derniers. Et après nous avons construit un dispositif de commande de l'ensemble afin de faire fonctionner l'éolienne de manière à extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent. , nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation, fonctionnant en génératrice. En le basant sur quelques hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique a été établi dont la complexité a été réduite .Dans ce modèle, le stator de la machine est connecté directement au réseau électrique, et le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire des convertisseurs électroniques bidirectionnels en courant. Cette configuration nous permet de réduire la taille des convertisseurs, car il traite un tiers de la puissance totale du système. Ces convertisseurs sont un redresseur à MLI de courant côté réseau (CCS) et un onduleur de tension à MLI côté rotor .(CCR) reliés entre eux par un bus continu

le troisième chapitre était réservé au développement d'un modèle pour le contrôle indépendant des puissances active et réactive statoriques en partant de la commande vectorielle de la MADA à flux statorique orienté.et ainsi pour une gestion efficace de la production d'énergie éolienne, il était pratique de raisonner en termes de puissances pour la commande de la MADA On a utilisé une stratégie MPPT sans asservissement de vitesse au niveau de la turbine éolienne pour capter le maximum de puissance du vent

Ainsi, les algorithmes de réglage classiques, tel que les PI peuvent s'avérer suffisants si les exigences sur la précision et les performances du système ne sont pas trop stricte

Dans le quatrième chapitre, nous nous sommes intéressés à l'application de l'une des techniques de commande robuste, nommée commande par mode de glissement. Les résultats obtenus ont montrés que cette technique de réglage n'a pas apporté des améliorations remarquables par rapport aux régulateurs classiques PI. En générale, les régulateurs par mode de glissement offrent de bonnes performances statiques et dynamiques, un rejet quasi-total de la perturbation, comme ils accordent aussi une meilleure poursuite

## Annexe

---

### Eolienne WEST WIND 3kW :

Diamètre du rotor	$R$	3.5 m
pales		3 pales en fibre de verre renforcées
Puissance nominale		2500 W/ 3000W
Vitesse du vent nominale		14 m/s
Vitesse de démarrage		4 m/s
Plage de vitesse		2.5 /29 m/s
Vitesse de survie		60 m/s
Vitesse de rotor nominale		120/900 tr/min
génératrice		Asynchrone, synchrone
protection		Protection automatique par effacement latéral progressif+frein manuel
poids		190 kg

### Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation :

Donné de la première machine à induction double alimentée :

Resistance du stator	$R_s$	= 0.012 $\Omega$
Resistance du rotor	$R_r$	= 0.021 $\Omega$
Inductance propre du stator	$L_s$	= 0.0137H
Inductance propre du rotor	$L_r$	= 0.0136 H
Inductance mutuelle	$M$	= 0.0135 H
Moment d'inertie	$J$	=0.1 kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	$f$	= 0.0024 Nm.s/rd
Puissance nominal	$P$	= 3 Kw

### Paramètres de la machine asynchrone à double alimentation :

Donné de la première machine à induction double alimentée :

Resistance du stator	$R_s$	= 1.2 $\Omega$
Resistance du rotor	$R_r$	= 1.8 $\Omega$
Inductance propre du stator	$L_s$	=0.1554 H
Inductance propre du rotor	$L_r$	= 0.1568 H
Inductance mutuelle	$M$	= 0.15 H
Moment d'inertie	$J$	=0.2 kg.m <sup>2</sup>
Coefficient de frottement	$f$	= 0.001 Nm.s/rd
Puissance nominal	$P$	= 1.5 Mw

### Paramètres régulateur PI

PI dans Boucle Ird

$$K_p = 2.44 \quad K_i = 110.74$$

PI dans Boucle Irq

$$K_p = 4.0808 \quad K_i = 307.63$$

## Bibliographique

---

[1] **bennour cherif** « *Simulation de la commande par mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation* » mémoire magister biskra

[2] **Mr. MAHBOUB Mohamed abd elbasset** « *Modélisation et commande d'un system éolien based'une génératrice double alimentée sans balais* » mémoire magister setif 2012

[3] <http://journalidp.blogspot.com/2016/01/le-potentiel-eolien-sur-terre.html> 2019-03-12 .17:45

[4] **Khelfat Lotfi Dr. A. OURICI Maataoui Lakhdar** « *Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée* » mémoire de master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA 2017

[5] **WWEA** «*Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne*» April 2011.

[6] [www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-l-algerie-ina...](http://www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-l-algerie-ina...)  
« *L'Algérie inaugure sa première ferme éolienne de 10* »

[7] **Frédéric Poitiers** « *ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICESASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DEL'ENERGIE EOLIENNE*

- *Machine asynchrone à cage autonome*

- *Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau* » Doctorat de l'Université de Nantes 2003

[8] **TIR ZOHEIR** «*Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade*» mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.

[9] **TRIA Fatma** «*Contribution à la commande d'un système éolien basé sur une MADA* »

[10] **LATRECHE Mohammed Tahar** « *Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien*» Mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif 2012

[11] <https://windpower.org/en> 10:42

## Bibliographique

---

[12] <http://journalidp.blogspot.com/2016/01/le-potentiel-eolien-sur-terre.html> 2019-03-12 .17:45

[13] **HASSAD Mohamed Amine** « *Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques* » mémoire de magister setif 2012

[14] **MESAI AHMED HAMZA et NADIR KAIS** « *Commande de la machine asynchrone à double alimentation – apport des techniques de l'intelligence artificielle* » master sidi belabes 2017

[15] <https://eolienne.f4jr.org.10:38>

[16] « *Modélisation et commande d'une génératrice Synchrones à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne* » **S. Belakehal\***, **A. Bentounsi**, **M. Merzoug** et **H. Benalla** Laboratoire d'Electrotechnique, 'LEC' Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Université Mentouri de Constantine Route Ain-El-Bey, Constantine, Algérie (reçu le 14 Janvier 2010 – accepté le 28 Mars 2010) article

[17] **fayrouz messai** « *Contribution à l'Etude d'une Génératrice à Réductance Variable* » mémoire de magister 2009 constantine .

[18] **Adam MIRECKI**, « *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* » », thèse de doctorat, université de Toulouse, 2005.

[19] **.hamzaoui**, « *Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur* » , thèse de magistère, ENP, Janvier 2008

[20] **N. abu-tabak**. « *Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation* ». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon 2008

[21] **Vincent Courtecuisse**, « *supervision d'une centrale multisources à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique* », thèse de doctorat, université de Lille ; 2008

[22] **Ameziane Sadek**, « *implantation expérimentale de l'mppt pour un système de génération hybride solaire-éolien* », thèse de magister, université de Batna, 2009.

[23] **Vincent Rogez**, « *modélisation simplifiée de source de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une*

## Bibliographique

---

*production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », thèse de doctorat, université de Lille, 2004.*

**[24] Tarak GHENNAM** «*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* » PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE ET L'ECOLE MILITAIRE POLYTECHNIQUE D'ALGER 2011

**[25] F. Kendouli, k. Nabti, k. Abed et h. Benalla,** « *modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation* », *revue des énergies renouvelables vol. 14 n°1 (2011) 109 – 120, université Mentouri, Constantine.*

**[26] S. Belakehal\*, A. Bentounsi, M. Merzoug et H. Benalla,** « *modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne* », *Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1 (2010) 149 – 161 149*

**[27] Toual Belkacem,** « *modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice asynchrone à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable* », *mémoire de magister, université de Batna, 2010.*

**[28] Tamarat Azzouz ,** « *modélisation d'une chaîne de conversion basée sur une machine asynchrone à double alimentation* » *mémoire de magister, université de Biskra, 2009.*

**[29] Hind Djeghloud,** « *filtrage actif de puissance* », *thèse de doctorat, université de Constantine, 2007*

**[30] Guy Séguier,** « *électronique de puissance : les fonctions de base et leurs principales applications*», *7eme édition, Dunod, paris, 1999.*

**[31] H. Tedjini, Y. Meslem and M. Rahli,** «*contrôle non linéaire avancé du redresseur MLI triphasé en absorption sinusoïdale de courant*», *ACTA ELECTROTEHNICA, Volume 49, Number 3, 2008.*

**[32] A. Meroufel, Y. Djeriri, A. Massoum et A. Hammoumi,** « *commande vectorielle par les réseaux de neurones artificiels de l'énergie d'une MADA intégrée à un système éolien* » *Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 669 – 682, 2010*

**[33] Naouel HAMDI** « *Modélisation et commande des génératrices éoliennes*» *mémoire magister CONSTANTINE 2008.*

**[34] AKKARI NADIA,** « *contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine asynchrone à double alimentation* » *thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.*

## Bibliographique

---

- [35] **M. Ali Dami, K. Jemli, M. Jemli, M. Gossa** « *doubly fed induction generator, with crow-bar system, under micro-interruptions fault* », *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, Volume 2, Number 3, 2010.
- [36] **Madjid SI BRAHIM** « *Etude d'un système de conversion de l'énergie éolienne à base de la machine asynchrone* » mémoire de doctorat tizi-ouzou 2015.
- [37] **Fenni Atmane** « *Commande Non Linéaire Par Des Régulateurs En Mode Glissant D'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA)* » 19/12/2013 Biskra
- [38] **Ayman Hussain**, « *contribution a la commande adaptative robuste par modes glissants* », thèse de doctorat ; Université de Reims Champagne Ardenne, 2009
- [39] **A. BENAÏSSA and M.K. FELLAH** « *Commande par mode de glissement d'un convertisseur AC/DC avec correction du facteur de puissance* » article 2006 University of Djilali Liabes
- [40] **A.Saiad**, « *Commande à structure variable d'un système d'entraînement asynchrone* » mémoire de Magister, Université Batna, 2001
- [41] **Khaldi Abderrahmane**, « *diagnostic et commande d'une machine synchrone a aimants permanents* », mémoire de magister, ENP Alger, 2006
- [42] **Benchabane Fateh**, « *commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé a aimants permanents avec minimisation du chattering* », mémoire de magister, université de Biskra, 2005