

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

Ecole Nationale Supérieure Polytechnique  
Département du Génie Electrique



Projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique

Thème

# **Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC**

Proposé et dirigé par :

Dr. H. CHKIREB.

Présenté et étudié par :

Rafika DRARENI.

Zahra OUAHRANI.

Promotion Juin 2009

ENSP- 10, Avenue Hassen Badi, 16200 El Harrach, Alger.

---

---

# Remerciements

---

Nous remercions Dieu, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir bien voulu accepter d'examiner et d'évaluer ce travail.

Nos vifs remerciements s'adressent à notre promoteur Monsieur **CHKIREB**, pour nous avoir orientées, conseillées et dirigées durant ce travail.

Des remerciements vont également à tous nos enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Nous remercions enfin, tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce modeste travail.

# *Dédicace*

*A qui puis-je dédier cet humble travail si ce n'est à mes très chers parents, dont le sacrifice, la tendresse, l'amour, la patience, le soutien, l'aide et les encouragements sont l'essence de ma réussite. Sans eux, je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.*

*Je dédie ce travail également:*

*A ma grande famille surtout, mon cher frère, mes adorables sœurs, mes nièces et mes neveux.*

*A mes amies et toute la promotion Génie électrique 2009*

*A tous ceux qui me sont chers.*

*Rafika*

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail:*

*A mes très chers parents dont le sacrifice, l'amour et le soutien sont l'essence de ma réussite*

*A ma chère sœur, à mon cher frère*

*A ma tante et mon oncle*

*A mes cousins et cousines*

*A mon grand père et toute ma famille*

*A Imene, Safa et Rafika*

*A tous mes amis*

*Zahra*

### ملخص

يقدم هذا العمل دراسة و تحكم في المولد اللائزمني في إنتاج الطاقة الكهربائية الهوائية. من أجل ذلك, قمنا بإنشاء نماذج لمختلف مكونات النظام الهوائي (المولد ذو القفص السنجابي اللائزمني, المروحة الهوائية, المحول الطاقوي) و تطبيق تقنية التحكم الشعاعي على المولد اللائزمني. بعد ذلك, قمنا بإستعمال تقنيات (MLI) في التحكم في المموج ذو الثلاث أطوار والمقوم ذو الثلاث أطوار, ثم قدمنا دراسة معمقة تبين مجال المموج ذو الثلاث مستويات بالمقارنة مع المموج ذو المستويين. أستنتجت هذه الدراسة بعد عرض نتائج المحاكات العددية للنظام الهوائي. أخيرا, نستطيع ملاحظة الإمكانية الكبيرة لمساهمة المولد اللائزمني في هذا النوع من الإستعمالات.

**كلمات مفتاحية:** مولد لائزمني ذو قفص سنجابي, الطاقة الهوائية, نموذج, مموج, مقوم, تحكم شعاعي.

### Résumé

Ce travail présente l'étude et la commande de la machine asynchrone pour la production de l'énergie éolienne. Pour ce faire, un modèle est établi pour chaque composant de l'éolienne (Turbine, MAS et cascade redresseur –onduleur) et une commande vectorielle de la machine est effectuée. La technique de commande par MLI triangulo-sinusoïdale est appliquée à l'onduleur et le redresseur est commandé par la technique de la MLI à hystérésis pour éviter la dégradation du réseau. Les performances et les avantages des convertisseurs à trois niveaux vis-à-vis des convertisseurs à deux niveaux sont également montrées à partir d'une étude détaillée. Cette étude est conclue par la simulation de l'ensemble de l'éolienne. Nous pouvons ainsi constater la capacité de la MAS à intégrer ce genre d'application.

**Mots clés :** Machine asynchrone à cage, éolienne, modélisation, onduleur, redresseur, commande vectorielle.

### Abstract

This work presents the modelling and the control of an induction machine in wind power production. With this intention, a model of the different components of the wind generator (Turbine, induction machine and cascaded converter- inverter) is established and a direct vector control of the induction machine is set up. The converter is used for driving the machine. For this reason we use the PWM technique to control this device. In order to limit the damage of the network we control by the current the inverter by using the PWM hysteresis technique. The advantages of the cascaded three level converter-three level inverter comparing with the cascaded two level converter-two level inverter are also shown. This study is concluded by a simulation of the wind generator. We observe that the induction machine is able to be used in the wind generation application.

**Keywords:** Induction machine, wind turbine, modelling, inverter, converter, vector control.

---

---

# Sommaire

---

Remerciements .....	i
Dédicaces .....	ii
Résumé .....	iv
Sommaire .....	v
Glossaire .....	viii
Liste des figures .....	xi
Liste des tableaux .....	xiii
Introduction générale.....	01
<b>Chapitre 1 : Etat de l'art des aérogénérateurs</b>	
1. Historique .....	04
2. Définition de l'énergie éolienne .....	05
3. Usage de l'énergie électrique produite par l'éolienne.....	05
3.1. Besoin d'électricité sur un site non raccordé au réseau.....	06
3.2. Fourniture d'électricité sur un site raccordé au réseau électrique .....	06
3.3. Production d'énergie éolienne vendue sur le réseau .....	06
4. Les différents types d'éoliennes .....	06
4.1. Les éoliennes à axe vertical .....	07
4.1.1. Le rotor de Darrieus.....	07
4.1.2. Le rotor de Savonius .....	08
4.2. Les éoliennes à axe horizontal.....	09
5. Composants de l'aérogénérateur .....	09
6. Conversion d'énergie éolienne .....	12
6.1. La puissance théorique .....	12
6.2. Théorie de BETZ.....	12
7. Intérêt de la vitesse variable .....	16
8. Stratégie de fonctionnement de l'aérogénérateur.....	16

8.1. Bilan des forces sur la pale .....	16
8.2. Moyen de réglage de la conversion de l'énergie .....	17
8.2.1. Système à pas variable ou à calage variable ou système « pitch » .....	17
8.2.2. Système à décrochage aérodynamique ou système « stall » .....	18
9. Chaîne de conversion électromécanique .....	19
9.1. Génératrice synchrone .....	19
9.2. Génératrice asynchrone .....	21
10. Description du système étudié .....	22
11. Conclusion .....	23

## Chapitre 2 : Commande et régulation du système

1. Modélisation de la machine asynchrone .....	26
1.1. Description de la MAS .....	26
1.2. Principe de fonctionnement .....	26
1.3. Hypothèses .....	27
1.4. Mise sous forme d'équations d'état .....	27
2. Régulation coté machine .....	29
2.1. Commande vectorielle de la MAS .....	29
2.1.1. Principe de la commande vectorielle .....	30
2.1.2. Commande directe à flux rotorique orienté .....	31
2.1.2.1. Estimation de $\Phi_r$ et $\theta_s$ .....	31
2.1.2.2. Schéma de la commande vectorielle directe .....	33
2.2. Calcul des régulateurs .....	34
2.2.1. Régulation du flux .....	34
2.2.2. Régulation de la vitesse .....	35
2.2.3. Calcul de $C_{em}$ et $I_q - ref$ .....	36
2.2.4. Régulation des courants $I_{qs}$ et $I_{ds}$ .....	36
3. Régulation coté réseau .....	38
3.1. Régulation du bus continu .....	39
4. Conclusion .....	40

## Chapitre 3 : Etude de la cascade onduleur-bus continu-redresseur

1. Onduleur-redresseur à deux niveaux .....	43
1.1. Onduleur de tension à deux niveaux .....	43
1.1.1. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux .....	43
1.1.2. Modélisation et commande de l'onduleur de tension à deux niveaux ...	43
1.1.2.1. Stratégie de commande .....	45
1.1.2.2. Algorithme de commande .....	46
1.2. Le redresseur à deux niveaux .....	47
1.2.1. Modélisation et commande du redresseur à deux niveaux .....	47
1.3. Simulations et interprétations .....	49
1.4. Robustesse de la régulation .....	53
1.4.1. Variation des paramètres de la machine .....	53

1.4.1.1. Conditions d'essais .....	53
1.4.1.1. Résultats et interprétations .....	54
1.4.2. Variation des paramètres du réseau .....	54
1.4.2.1. Résultats et interprétations .....	55
2. Onduleur-redresseur à trois niveaux.....	60
2.1. Onduleur à trois niveaux .....	60
2.1.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux.....	60
2.1.2. Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux .....	61
2.1.3. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux .....	62
2.1.3.1. Commandabilité de l'onduleur à trois niveaux.....	62
2.1.3.2. Fonction de connexion.....	63
2.1.3.2.1. Fonction de connexion des interrupteurs .....	63
2.1.3.2.2. Fonction de connexion des demi-bras.....	64
2.1.3.3. Fonction de conversion .....	64
2.1.4. Représentation vectorielle des états en $(\alpha, \beta)$ .....	65
2.1.5. Stratégie de commande.....	68
2.2. Redresseur à trois niveaux.....	69
2.3. Simulations et interprétations .....	69
3. Conclusion.....	73

### Chapitre 4 : optimisation de la puissance produite

1. Régulation de la puissance d'une éolienne .....	75
2. Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.....	76
2.1. Modélisation de la turbine .....	76
2.2. Modélisation du multiplicateur.....	77
2.3. Equation mécanique de l'arbre .....	78
2.4. Modèle global de la partie mécanique.....	78
3. Optimisation de l'extraction de puissance .....	79
3.1. Commande avec asservissement de la vitesse du vent.....	79
3.2. Génération de la variation du vent.....	80
3.3. Simulation et interprétations.....	81
4. Conclusion.....	82
Conclusion générale .....	84
Annexe A : Paramètres utilisés .....	86
Annexe B : Modèle diphasé de la MAS .....	88
Annexe C : Expression du couple électromagnétique.....	92
Annexe D : Paramètres des régulateurs.....	94
Bibliographie.....	95

---

# Glossaire

---

$V$	La vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur.
$S_1$	La section amont du tube d'air.
$S_2$	La section aval du tube d'air.
$M_1$	Masse d'air en amont de l'éolienne.
$M_2$	Masse d'air en aval de l'éolienne.
$V_1$	La vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur.
$V_2$	La vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur.
$E_1$	L'énergie cinétique contenue en amont de l'éolienne.
$E_2$	L'énergie cinétique contenue en aval de l'éolienne.
$E_r$	L'énergie cinétique perdue par une masse du vent.
$C_p$	Le coefficient de puissance.
$P_{aéro}$	La puissance extraite par la turbine éolienne.
$P_m$	La puissance disponible.
$\lambda$	La vitesse relative de l'éolienne.
$C_{pmax}$	Limite de BETZ.
$\lambda_{opt}$	La vitesse relative optimale de l'éolienne.
$V_{rot}$	Composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur.
$V_{res}$	Vecteur du vent résultant.
$F_{res}$	Force produite par l'action du vent sur la pale.
$F_{ax}$	Force représentant la poussée axiale.
$F_{rot}$	Force produisant le déplacement de la pale.
$\beta$	Angle de calage.
$i$	Angle d'incidence.

---

AC	Courant alternatif.
DC	Courant continu.
MLI	Modulation de largeur d'impulsion.
F.m.m	Force magnétomotrice.
s, r	Indice relatif au stator et rotor respectivement.
d	Indice de l'axe direct.
q	Indice de l'axe en quadrature.
$[V_s]$	Vecteur tension statorique.
$[I_s]$	Vecteur courant statorique.
$[I_r]$	Vecteur courant rotorique.
$[\Phi_s]$	Vecteur flux statorique.
$[\Phi_r]$	Vecteur flux rotorique.
$[R_s]$	Matrice résistance statorique.
$[R_r]$	Matrice résistance rotorique.
$[L_{ss}]$	Matrice inductance statorique.
$[L_{rr}]$	Matrice inductance rotorique.
$[M_{sr}]$	Matrice inductance mutuelle stator-rotor.
P	Nombre de paires de pôles.
$\theta_s$	Angle de transformation de Park des grandeurs statoriques.
$\theta_r$	Angle de transformation de Park des grandeurs rotoriques.
$\theta$	La position angulaire du rotor par rapport au stator.
$\omega_s$	Pulsation électrique statorique.
$\omega_r$	Pulsation de glissement ( $\omega_s - \omega$ ).
$\omega$	Vitesse angulaire de rotation.
$\Omega$	Vitesse de rotation mécanique.
$C_{em}$	Couple électromagnétique.
$R_s$	Résistance statorique.
$R_r$	Résistance rotorique.
$l_s$	Inductance propre d'une phase statorique.
$l_r$	Inductance propre d'une phase rotorique.
$M_s$	Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.
$M_r$	Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.
$M_{sr}$	Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe $a_s$ coïncide avec l'axe $a_r$ .
$L_s$	Inductance cyclique statorique.
$L_r$	Inductance cyclique rotorique.
$L_m$	Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor.
$T_s$	Constante de temps statorique.
$T_r$	Constante de temps rotorique.

---

$\sigma$	Coefficient de dispersion.
PI	Régulateur Proportionnel Intégral.
$\tau$	Constante de temps du régulateur.
$f$	Coefficient de frottement.
J	Inertie totale de l'arbre.
$C_{turbine}$	Couple de la turbine.
$C_f$	Couple des frottements.
$V_{dc}$	Tension du bus continu.
C	Capacité du bus continu.
$K_p$	Coefficient de l'action proportionnelle du régulateur.
$K_i$	Coefficient de l'action intégrale du régulateur.
$V_a, V_b, V_c$	Tensions simples statoriques.
$U_{ab}, U_{bc}, U_s$	Tensions composées statoriques.
$S_a, S_b, S_c$	Etat des commutateurs de puissance.
m	Indice de modulation.
$f_p$	Fréquence de la porteuse.
r	Taux de modulation.
$U_p$	Amplitude de la porteuse.
$F_{ref}$	Fréquence de la référence.
$U_{ref}$	Tension crête de la référence.
$f_p$	Fréquence de la porteuse.
$U_p$	Tension crête de la porteuse.
M	Signal de la porteuse.
$V_K$	Tension du bras.
$i_{res}$	Courant de phase du réseau.
$V_{res}$	Tension de phase du réseau.
NPC	Structure à point milieu.
$\Omega_{méc}$	Vitesse de l'arbre rapide.
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine.
$J_{turbine}$	Inertie de la turbine.
$J_G$	Inertie de la génératrice.
R	Rayon de la surface balayée par la turbine.
G	Gain du multiplicateur.

---



---

# Liste des figures

---

Fig. 1.1	Les deux types d'éolienne .....	7
Fig. 1.2	Schéma de principe du rotor de Darrieus .....	8
Fig. 1.3	Schéma de principe du rotor de Savonius .....	8
Fig. 1.4	Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal .....	10
Fig. 1.5	Les composants de la nacelle d'une éolienne.....	11
Fig. 1.6	Colonne d'air animée d'une vitesse du vent .....	12
Fig. 1.7	Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur .....	13
Fig. 1.8	Coefficient de puissance .....	14
Fig. 1.9	Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes .....	15
Fig. 1.10	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent .....	16
Fig. 1.11	Bilan des forces sur une section de pale .....	17
Fig. 1.12	Variation de l'angle de calage d'une pale.....	18
Fig. 1.13	Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple .....	18
Fig. 1.14	Machine synchrone à rotor bobiné à vitesse variable.....	19
Fig. 1.15	Génératrice synchrone à aimants avec un convertisseur Boost .....	20
Fig. 1.16	Génératrice synchrone à aimants avec convertisseurs à MLI .....	20
Fig. 1.17	Génératrice asynchrone à double alimentation à rotor bobiné.....	21
Fig. 1.18	Génératrice asynchrone à double alimentation à vitesse variable totalement Commandée .....	21
Fig. 1.19	Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable .....	22
Fig. 1.20	Chaîne de conversion éolienne.....	23
Fig. 2.1	Coupe d'une machine asynchrone à cage.....	26
Fig. 2.2	Principe de la commande par orientation de flux .....	30
Fig. 2.3	Principe de découplage pour la MAS par analogie avec la MCC .....	31
Fig. 2.4	Estimateur de $\hat{\Phi}_r$ et $\theta_s$ .....	32
Fig. 2.5	Commande vectorielle directe de flux d'une MAS .....	33
Fig. 2.6	Schéma de régulation du flux en boucle ouverte .....	34

Fig. 2.7	Schéma de régulation de la vitesse en boucle ouverte.....	35
Fig. 2.8	Schéma de régulation des courants en boucle ouverte .....	38
Fig. 2.9	Représentation de Fresnel du circuit du réseau .....	38
Fig. 2.10	Schéma de régulation coté réseau .....	39
Fig. 2.11	Schéma bloc de la boucle de tension .....	40
Fig. 2.12	Schéma de régulation de la tension du bus continu en boucle ouverte .....	40
Fig. 3.1	Structure de l'onduleur à deux niveaux.....	43
Fig. 3.2	Modèle de connaissance et de commande de l'onduleur de tension à deux niveaux .....	44
Fig. 3.3	Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse .....	46
Fig. 3.4	Modèle connaissance et de commande du redresseur de courant triphasé à deux niveaux .....	47
Fig. 3.5	Tension du bus continu .....	50
Fig. 3.6	Tension de sortie de l'onduleur .....	51
Fig. 3.7	Tension de sortie de l'onduleur avec zoom.....	51
Fig. 3.8	Tension et courant du réseau avec zoom .....	51
Fig. 3.9	Courant du réseau et courant de référence sur deux périodes .....	52
Fig. 3.10	Courant de phase de la machine avec zoom.....	52
Fig. 3.11	Flux direct, flux en quadrature et flux de référence .....	52
Fig. 3.12	Vitesse de rotation de la machine avec sa référence .....	53
Fig. 3.13	Test de robustesse avec augmentation de la résistance statorique de 25% et de la résistance rotorique de 50% .....	56
Fig. 3.14	Test de robustesse avec diminution des inductances de 15% .....	57
Fig. 3.15	Test de robustesse avec diminution des inductances de 40% .....	58
Fig. 3.16	Test de performance avec une réduction de 50% de la tension du réseau.....	59
Fig. 3.17	Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC .....	60
Fig. 3.18	Les différentes configurations d'un bras de l'onduleur à trois niveaux .....	61
Fig. 3.19	Représentation vectorielle des états de l'onduleur NPC .....	66
Fig. 3.20	Les 19 vecteurs formés par les états de l'onduleur .....	67
Fig. 3.21	Principe de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses .....	68
Fig. 3.22	La tension de sortie de l'onduleur.....	70
Fig. 3.23	La tension de sortie de l'onduleur avec zoom .....	70
Fig. 3.24	La tension du bus continu .....	71
Fig. 3.25	La différence des tensions $U_{c1}$ et $U_{c2}$ .....	71
Fig. 3.26	Tension et courant du réseau avec zoom .....	72
Fig. 3.27	Courant de phase de la MAS avec zoom .....	72
Fig. 3.28	Vitesse angulaire de la MAS avec sa référence .....	72
Fig. 3.29	Flux direct, flux en quadrature et flux nominale .....	73
Fig. 4.1	Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent .....	75
Fig. 4.2	Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de l'éolienne .....	77
Fig. 4.3	multiplicateur .....	77

---

Fig. 4.4	Schéma bloc fonctionnel du convertisseur éolien .....	78
Fig. 4.5	Variation de la vitesse mécanique optimale en fonction de la vitesse du vent .....	79
Fig. 4.6	Dispositif de commande avec asservissement de la vitesse .....	80
Fig. 4.7	Variation annuelle de la vitesse du vent dans la région de Tindouf .....	80
Fig. 4.8	Evolution de la vitesse du vent.....	81
Fig. 4.9	Vitesse de rotation de la machine avec sa référence .....	82
Fig. 4.10	Puissance produite par la MAS .....	82

---



---

## Liste des tableaux

---

Tab. 1.1	Classification des éoliennes.....	9
Tab. 3.1	Grandeurs électriques caractérisant chaque configuration possible d'un bras k .....	62
Tab. 3.2	Table d'excitation caractérisant la commande complémentaire utilisée .....	63
Tab. 3.3	Etats possibles de l'onduleur NPC.....	66

---

---

# Introduction générale

---

La consommation d'énergie, toujours en augmentation, fait réduire les réserves en énergies fossiles et rapproche l'échéance de leur épuisement, ou du moins leur extraction à moindre frais. En effet, pour prendre l'exemple du pétrole, les puits sont désormais beaucoup plus profonds et les gisements plus difficiles d'accès ce qui nécessite plus d'infrastructures et de transformation avant de pouvoir être utilisé comme combustible pour être transformé sous une autre forme d'énergie.

Cet exemple montre qu'un jour viendra où les solutions à base d'énergies renouvelables et alternatives qui sont en ce moment trop coûteuses et peu rentables, se révéleront moins chères que les énergies fossiles. Espérons toutefois que nous saurons développer ces énergies renouvelables avant ce jour.

C'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude qui porte sur une des énergies renouvelables en développement en ce moment qui est l'énergie éolienne. Nous allons nous intéresser à l'état actuel des avancées technologiques qui ont permis la construction et le fonctionnement de ces aérogénérateurs.

La conversion d'énergie éolienne en énergie électrique peut être réalisée par divers types de machines. A l'origine, c'était la génératrice asynchrone classique, sans convertisseur d'électronique de puissance associé, qui était la plus largement répandue. Cependant, l'évolution technologique des convertisseurs a progressivement permis de se tourner vers des dispositifs plus complexes.

Une grande partie des éoliennes installées de nos jours sont équipées de machines asynchrones. Cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ceci permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions du vent.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter un état de l'art des différents types d'éoliennes. On verra également les tendances actuelles et les solutions les plus utilisées de nos jours en matière de génératrice et de l'électronique de puissance utilisées. Ceci nous permet de choisir le type de génératrice et la technique utilisée pour l'éolienne.

Le deuxième chapitre est consacré à la production d'énergie électrique par la génératrice qui est dans notre cas une machine asynchrone à cage. Cette dernière présente plusieurs avantages ; elle est de conception simple, robuste, peu coûteuse à l'achat et à l'entretien. Puis, nous passerons à l'élaboration de sa commande. Nous traiterons quelques notions théoriques de la commande vectorielle, mais nous nous baserons surtout sur la commande directe par orientation du flux rotorique. Nous mettrons en œuvre la simulation de cette commande par le logiciel MATLAB.

Dans le chapitre trois, nous nous intéresserons à la liaison du stator avec le réseau. Cette liaison est une cascade composée d'un onduleur de tension commandé par une MLI triangulo-sinusoidale, d'un bus continu composé d'un condensateur lissant la tension et d'un redresseur commandé par une MLI à hystérésis. Cette commande a été prise en compte afin d'éviter de polluer le réseau électrique en lui injectant des courants harmoniques importants. Ensuite, nous étudierons les convertisseurs à trois niveaux à structure NPC. Cette structure permet d'une part de réduire les contraintes sur les interrupteurs et d'autre part d'améliorer la forme de la tension fournie par l'onduleur.

Dans le quatrième chapitre seront abordées ; la modélisation de la turbine et l'élaboration d'une commande adéquate pour transformer le maximum de puissance disponible. Une simulation du modèle global d'une chaîne éolienne est effectuée nous permettant ainsi de vérifier la viabilité d'un tel système dans un dispositif éolien.

# Etat de l'art des aérogénérateurs

---

## **Introduction :**

Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante en particulier ces dernières décennies et notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champs d'application et de création d'emplois.

Le regain d'intérêt que suscite l'énergie éolienne a débuté après la crise pétrolière des années 1970, mais ce n'est qu'à la suite des alertes climatiques et de la ratification de la convention de Kyoto en 1997 que de vrais axes de recherche autour des éoliennes ont émergé. Ainsi, plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent et leurs structures sont de plus en plus performantes. Outre leurs caractéristiques mécaniques, nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

Dans ce qui suit, nous présentons en première partie des généralités sur les différents types d'éoliennes. Cependant, nous donnons plus de détail sur les éoliennes à axe horizontal qui sont non seulement les plus répandues, mais aussi les plus efficaces. Nous présentons également le principe de conversion de l'énergie éolienne et les systèmes de génération d'électricité utilisés au jour d'aujourd'hui.

## 1. Historique :

La possibilité de maîtriser le vent et d'utiliser sa puissance à des fins de production fascine les hommes depuis des milliers d'années. Les premières machines, très rudimentaires, utilisant la force du vent, étaient situées dans les plaines au frontières des actuels Afghanistan et Iran, où le vent souffle une grande partie de l'année dans la même direction. Puis ce type de moulin à vent s'est répandu progressivement à travers le monde arabe. L'histoire nous apprend que Les babyloniens auraient conçu un projet d'irrigation de la riche plaine de Mésopotamie dix sept siècles avant Jésus-Christ en faisant usage de la puissance du vent.

Les premiers moulins à vent firent leur apparition en Europe au cours du XIII siècle avec le retour des croisés, qui les ramenèrent de leurs voyages en Orient. Initialement destiné à moudre le grain, ils firent rapidement utilisés aux actuels Pays-Bas pour assécher les terres inondés.

A la fin du XIX siècle, lorsque l'électricité pris son essor, l'aérogénérateur électrique fit ses premiers pas. Au Danemark, Poul La Cour fut, sans doute, le pionnier en associant une turbine éolienne à une dynamo en 1891[1]. Ensuite, durant la première moitié du XX siècle, les premières éoliennes de grande puissance visant à produire de l'électricité sont apparues. Ces éoliennes sont restées cependant au stade de prototypes. On peut citer le rotor de Darrius conçue dans les années 20, l'éolienne de 1250kW de Smith- Putnam, mise au point à la fin des années 30, et l'éolienne danoise de Gedser de 200 kW, construite en 1957 et reliée au réseau électrique.

Il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier pour alerter les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne et ainsi, relancer les études et les expériences, cette fois ci à plus grande échelle. La génération éolienne a connu son premier marché avec le « Wind rush » californien dans les années 1980. Cette opération volontariste a permis au marché éolien de se créer et d'amorcer une réelle compétitivité économique. L'Amérique du Nord a été leader jusqu'en 1994, puis l'Europe est passée en tête [2].

Actuellement, des milliers d'éoliennes fonctionnent dans diverses régions du monde, avec une capacité totale allant de 93 800 MW en 2007 à 120000 MW a la fin de 2008. Les capacités installées croient en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les États par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont les pays occidentaux (Amérique et Europe). L'Allemagne est l'un des principaux producteurs d'électricité éolienne avec 22 247 MW de puissance installée à la fin de l'année 2007.

Le Maroc, premier producteur d'énergie éolienne du continent africain, produit 140 MW par an. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf qui a une puissance de 50 MW [3].

## 2. Définition de l'énergie éolienne :

L'échauffement différentiel de la surface terrestre par le soleil entraîne le déplacement d'importantes masses d'air sur la terre, c'est-à-dire le vent. Ce vent qui est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air contient une grande quantité d'énergie. L'énergie éolienne est donc l'énergie cinétique du vent transformée en énergie mécanique puis en énergie électrique à l'aide d'un aérogénérateur.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, non dégradée, qui tire son nom d'Éole, Dieu du vent dans la Grèce antique [4]. C'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toute fois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe.

Le vent est défini par sa direction et sa vitesse qui varie selon les zones géographiques et les saisons. Il faut donc connaître la vitesse moyenne du vent ainsi que sa variation en fonction de l'altitude pour déterminer la possibilité ou non d'implanter un parc éolien.

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore). La production en mer présente en effet deux avantages considérables : la réduction de l'impacte visuel et une meilleure productivité (vent plus fort, plus réguliers et plus énergétique).

Hormis l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur lequel elle est implantée permettant ainsi de conserver leurs activités industrielles ou agricoles [5].

Leur principe de fonctionnement est le suivant :

Energie cinétique    ⇒    Energie mécanique    ⇒    Energie électrique    ⇒    Consommation  
« Vent »                      « turbine »                      « génératrice »

L'énergie cinétique contenue dans le vent est captée par les pales aérodynamiques de l'éolienne qui freine le vent. En freinant le vent, les pales de l'éolienne sont soumises au dessus et en dessous à un système de pressions qui génère la rotation du rotor. Cette rotation crée une énergie mécanique qui est transmise à l'arbre de la génératrice afin de produire une électricité utilisable.

## 3. Usage de l'énergie électrique produite par l'éolienne :

L'énergie éolienne peut alimenter des sites isolés raccordés ou non au réseau électrique. Il s'agit donc d'une énergie décentralisée. Elle peut également fournir de l'énergie sur le réseau en tant que producteur autonome.

### **3.1. Besoin d'électricité sur un site non raccordé au réseau :**

Pour une fourniture d'électricité sur un site non équipé en électricité (péniche, grange isolée...), l'éolienne électrique de petite puissance, de 50 W à 10 kW, est suffisante dans la plupart des cas. L'éolienne produit du courant qui est régulé et stocké dans des batteries qui assurent l'autonomie pendant les jours de vent faible. On utilise ensuite soit directement le courant continu venant des batteries, soit le courant alternatif produit par un onduleur alimenté par les batteries.

### **3.2. Fourniture d'électricité sur un site raccordé au réseau électrique :**

Il s'agit ici d'utiliser l'énergie éolienne pour alimenter une usine ou une ferme par exemple, déjà alimentée par le réseau électrique.

Dans ce cas, l'énergie produite par l'éolienne viendra diminuer la facture d'électricité sur le site. L'éolienne est raccordée sur le réseau interne de l'utilisateur : l'énergie éolienne produite est utilisée en priorité par celui-ci. Si la production est trop faible, le réseau électrique fournit le complément. Aucun automatisme n'est à prévoir, l'énergie sera appelée sur le réseau quand cela sera nécessaire. Généralement, la puissance installée de ce type d'installation va de 10 kW et ne dépasse pas 200 – 300 kW.

### **3.3. Production d'énergie éolienne vendue sur le réseau :**

Ce type d'usage correspond à l'installation d'une centrale électrique ; toute l'énergie produite est achetée par le réseau comme s'il s'agissait d'une centrale hydroélectrique ou d'une centrale au charbon.

La stratégie actuelle conduit à regrouper plusieurs machines sur un même site afin de constituer une « Centrale Eolienne » ou « Wind Farm ». Ces installations atteignent plusieurs MW de puissance totale. Les recherches se tournent, à présent, vers des centrales installées en mer (offshore). Ce développement devrait permettre à l'éolien de représenter un moyen de production significatif.

## **4. Les différents types d'éoliennes :**

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice on classe les éoliennes en deux types ; les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal (**Fig. 1.1**). Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice [6].



Eolienne à axe horizontal



Eolienne à axe vertical

**Fig. 1.1-** Les deux types d'éolienne.

#### **4.1. Les éoliennes à axe vertical :**

Les éoliennes à axes vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal.

Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence.

##### **4.1.1. Le rotor de Darrieus :**

C'est la structure la plus répandue; le fonctionnement de son rotor est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (**Fig. 1.2**).

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe.

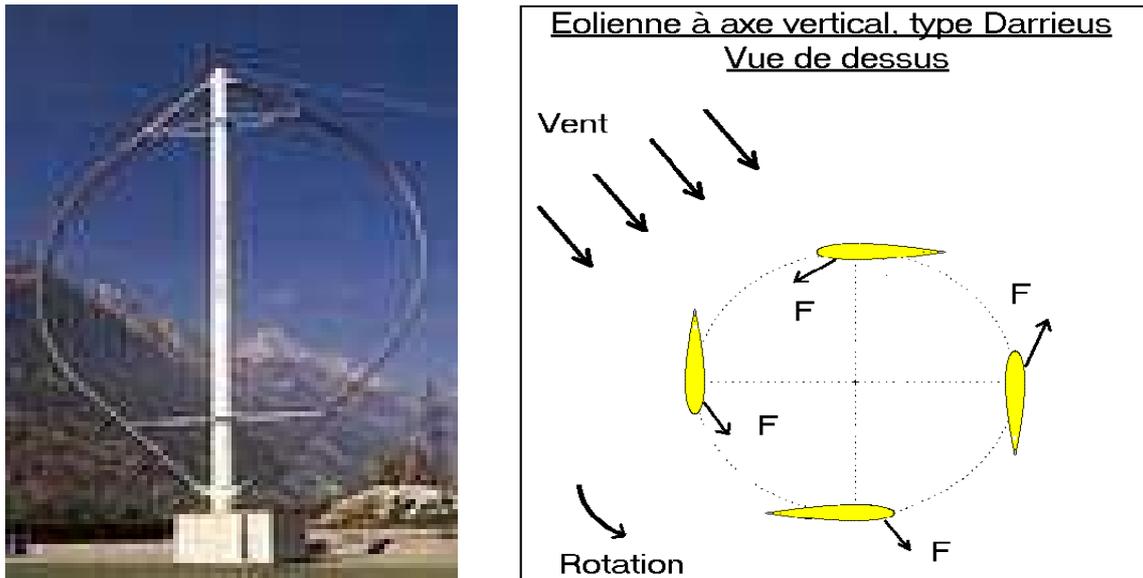
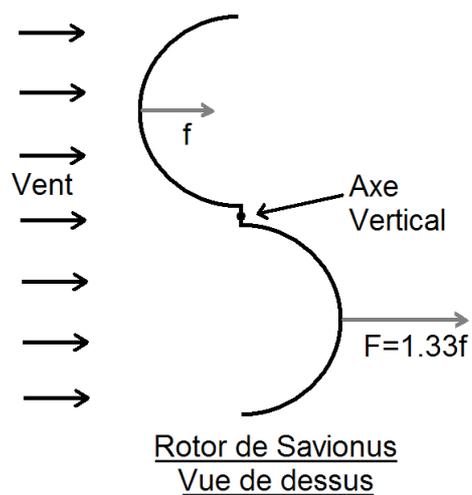


Fig. 1.2- Schéma de principe du rotor de Darrieus.

#### 4.1.2. Le rotor de Savonius :

Son fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble (Fig. 1.3). L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [1].



$$F > f \Rightarrow \text{couple moteur}$$

Fig1.3- Schéma de principe du rotor de Savonius.

#### 4.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituée d'une à trois pales profilées aérodynamiquement et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine. Le plus souvent, le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales [8].

Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et permet donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde car ; leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Les éoliennes à axe horizontal peuvent être classifiées selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leurs hélices (**Tab. 1.1**).

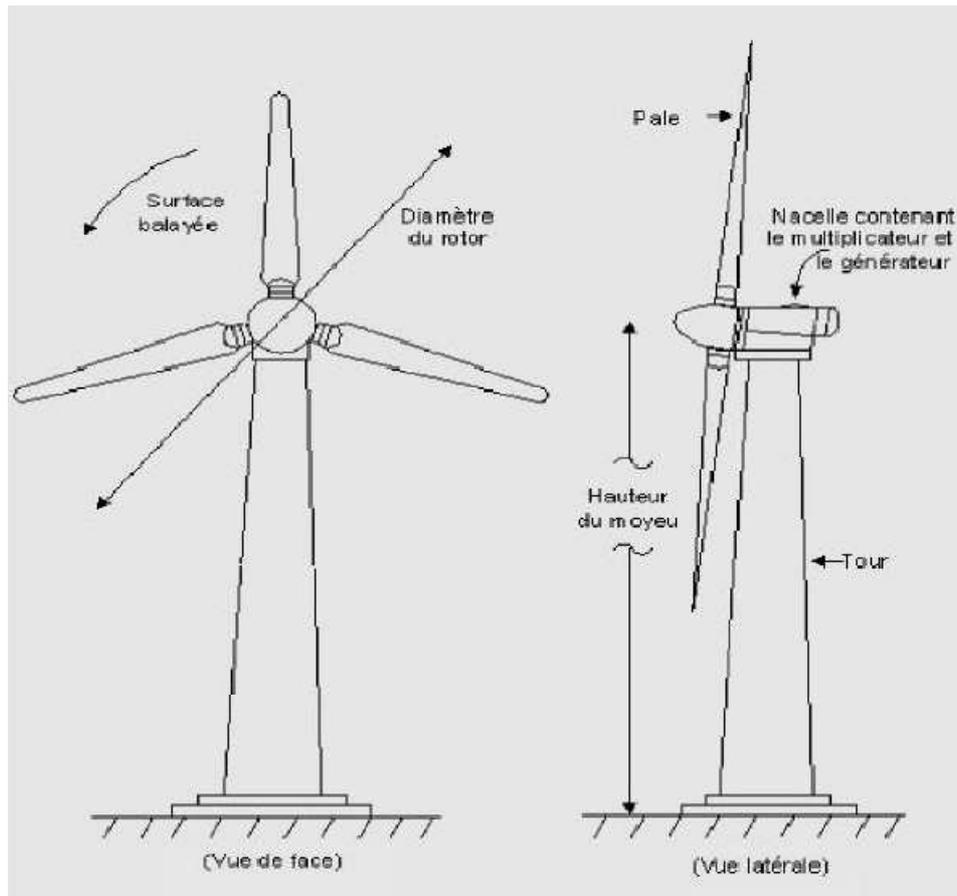
Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

**Tab. 1.1-** Classification des éoliennes.

#### 5. Composants de l'aérogénérateur :

En générale, une éolienne rapide est constituée de trois éléments principaux ; La tour (mat), la nacelle et les pales qui sont supportées par le moyeu [7]. Chacune de ces parties doit être modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement (**Fig. 1.4**).

- **La tour :** C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation de puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol et permettre l'utilisation de pales plus longues. La tour a une forme conique ou cylindrique. A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.

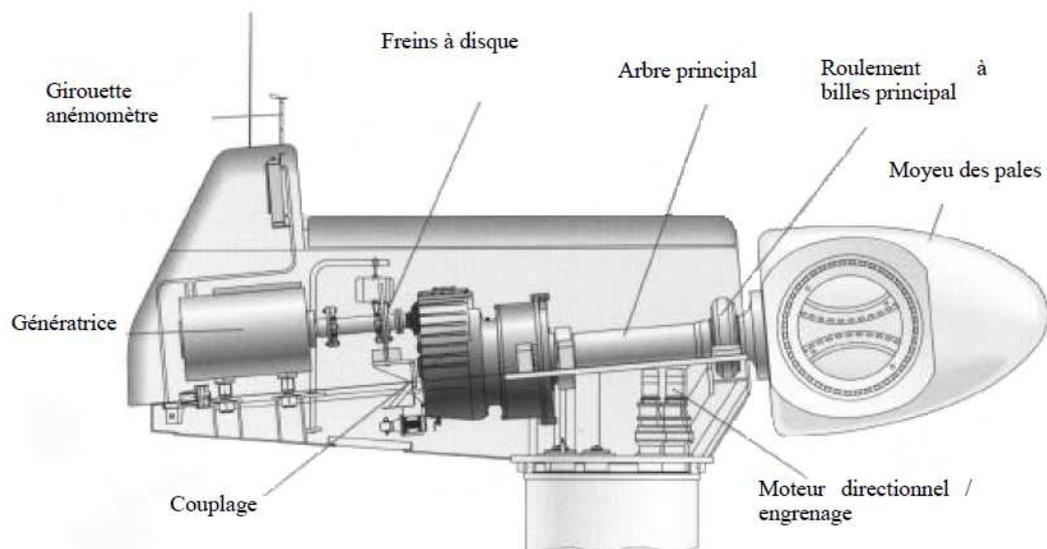


**Fig. 1.4-** Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal.

- **La nacelle :** C'est le coffret qui se trouve en haut de la tour. IL contient et protège les différents composants mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (**Fig. 1.5**).
  - **Arbre de transmission :** Il reçoit le mouvement de rotation du moyeu afin d'entraîner la génératrice électrique. Sur l'arbre de transmission se trouve le frein qui sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance.
  - **Un multiplicateur :** Appelé aussi *transmission*, il adapte la vitesse de rotation de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. On ne trouve pas ce composant dans les éoliennes munies des génératrices synchrones (transmission direct).
  - **La génératrice :** La fonction de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Dans notre cas c'est une génératrice asynchrone à cage d'écureuil.
  - **Le système de refroidissement :** Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le

multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement par air ou par eau.

- **Anémomètre** : Il mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et elle est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h) pour assurer la protection de l'éolienne.
- **Le système de contrôle** : Le système de contrôle de l'éolienne est composé d'un certain nombre d'ordinateurs qui surveillent sans cesse l'état de l'éolienne, tout en recueillant des statistiques sur son fonctionnement. Il est possible de surveiller ou de régler entre 100 et 500 paramètres différents dans une éolienne moderne.



**Fig. 1.5-** Les composants de la nacelle d'une éolienne.

- **Le moyeu** : C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure. Il transmet le mouvement de rotation à l'arbre de transmission qui lui est solidaire.
- **Les pales** : La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.

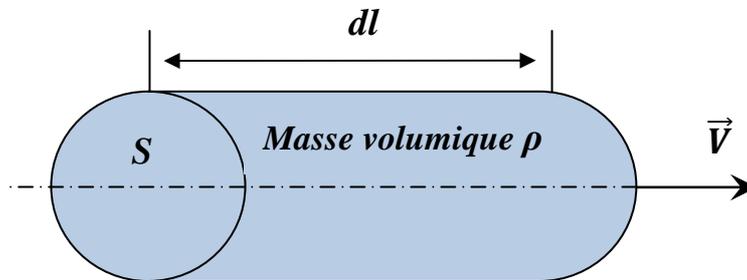
Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante [8]. Elles permettent de capter la puissance du

vent et la transférer au rotor. Leur nombre est de trois pales dans la plupart des aérogénérateurs, car cette condition constitue un compromis entre les performances de la machine et des raisons de stabilité. Elles sont inclinables de façon à adapter automatiquement les caractéristiques mécaniques de l'éolienne à la vitesse du vent.

## 6. Conversion de l'énergie éolienne :

### 6.1. La puissance théorique :

On considère une colonne d'air de longueur  $dl$ , de section  $S$  et de masse volumique  $\rho$  ( $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$ ), animée d'une vitesse  $V$  conformément à la figure (1.6) :



**Fig. 1.6-** Colonne d'air animée d'une vitesse du vent

En supposant que cette colonne représente la quantité d'air traversant la surface  $S$  pendant le temps  $dt$ , l'énergie cinétique de cette colonne peut s'exprimer en fonction de  $V$ ,  $S$ ,  $\rho$  et  $dt$  :

$$dW_c = \frac{1}{2} dm V^2 \quad ; \quad \text{avec: } dm = \rho S dl \quad (1.1)$$

La puissance théoriquement disponible due à un vent de vitesse  $V$  a travers une surface  $S$  perpendiculaire à sa direction peut se mettre sous la forme suivante :

$$P = \frac{dW_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (1.2)$$

### 6.2. Théorie de BETZ :

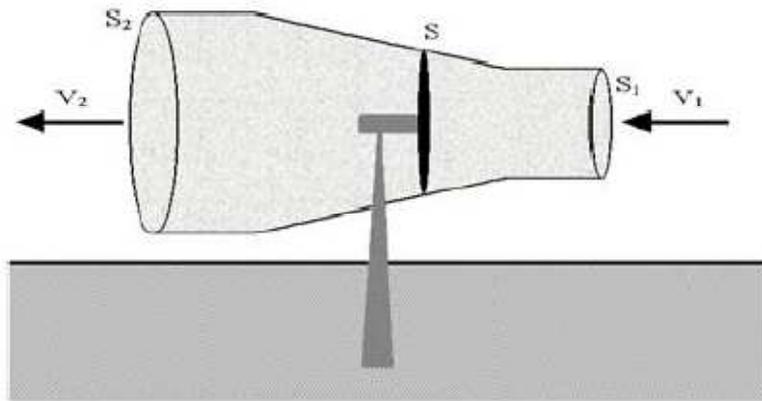
Une éolienne ne peut exploiter toute l'énergie contenue dans le courant d'air qui la traverse. En 1926, le physicien allemand Albert Betz a prouvé qu'une éolienne ne peut récupérer au maximum que  $(16/27)^{\text{ième}}$  de l'énergie contenue dans le vent.

Nous considérons que le flux d'air qui va traverser la surface balayée par les pales est assimilé à un tube (une veine de vent).

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté à la figure (1.7) où on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse  $V_2$  en aval. Désignons par  $V$  la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par  $S_1$  et  $S_2$  les sections amont et aval du tube d'air et par  $S$  la surface balayée par l'hélice [9].

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aérogénérateur. En réalité, la totalité de la vitesse du vent n'est pas utilisée pour faire tourner les pales, puisque le vent continu à souffler à la vitesse  $V_2$  après avoir traversé l'aérogénérateur.

Nous pouvons dire que pendant une seconde, le volume d'air déplacé est égal à la surface de la section du tube (surface balayée par les pales)  $S$ , multiplié par la vitesse  $V$ .



**Fig. 1.7-**Veine de vent à la traversée de l'aéromoteur.

La masse d'air en amont de l'éolienne est donc égale à :

$$m_1 = \rho S_1 V_1 \quad (1.3)$$

L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit [9] :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (1.4)$$

On peut donc dire que :

$$m_1 = m = m_2 \quad (1.5)$$

D'après (1.1), l'énergie cinétique contenue en amont de l'éolienne est donc donnée par l'expression suivante :

$$E_1 = \frac{1}{2} m V_1^2 \quad (1.6)$$

De la même manière, l'énergie contenue dans la même masse de vent ralenti à la vitesse  $V_2$  est égale à :

$$E_2 = \frac{1}{2} m V_2^2 \quad (1.7)$$

L'énergie cinétique perdue par cette masse de vent est celle qui a été transformée en énergie mécanique (la rotation des pales rotor) :

$$E_r = E_1 - E_2 \quad (1.8)$$

$$E_r = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (1.9)$$

Si nous considérons maintenant que la masse d'air franchit le rotor de l'éolienne à une vitesse moyenne de  $(V_1 + V_2)/2$ , l'expression de cette masse devient :

$$m = \frac{1}{2} \rho S (V_1 + V_2) \quad (1.10)$$

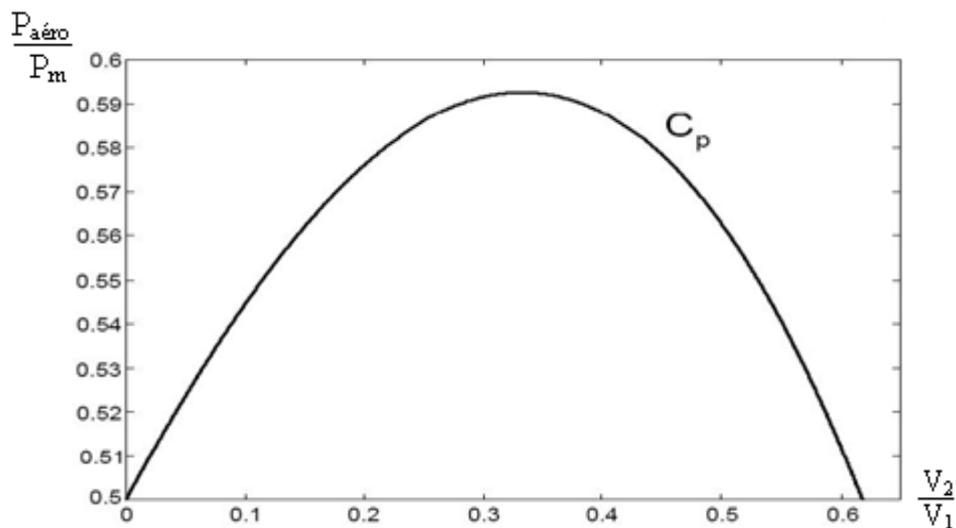
En réinjectant l'expression (1.10) dans celle de l'énergie captée par le rotor (1.9), nous aboutissons à :

$$E_r = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (1.11)$$

Nous avons maintenant à notre disposition la valeur de l'énergie captée par le rotor, en fonction des vitesses en amont et en aval du rotor de notre éolienne.

Finalement, le rapport entre la puissance extraite par la turbine éolienne et la puissance disponible en amont est appelé *coefficient de puissance* :  $C_p$ , il est exprimé par :

$$\frac{P_{aéro}}{P_m} = \frac{E_r}{E_1} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \left[ 1 + \frac{V_2}{V_1} \right] \quad (1.12)$$



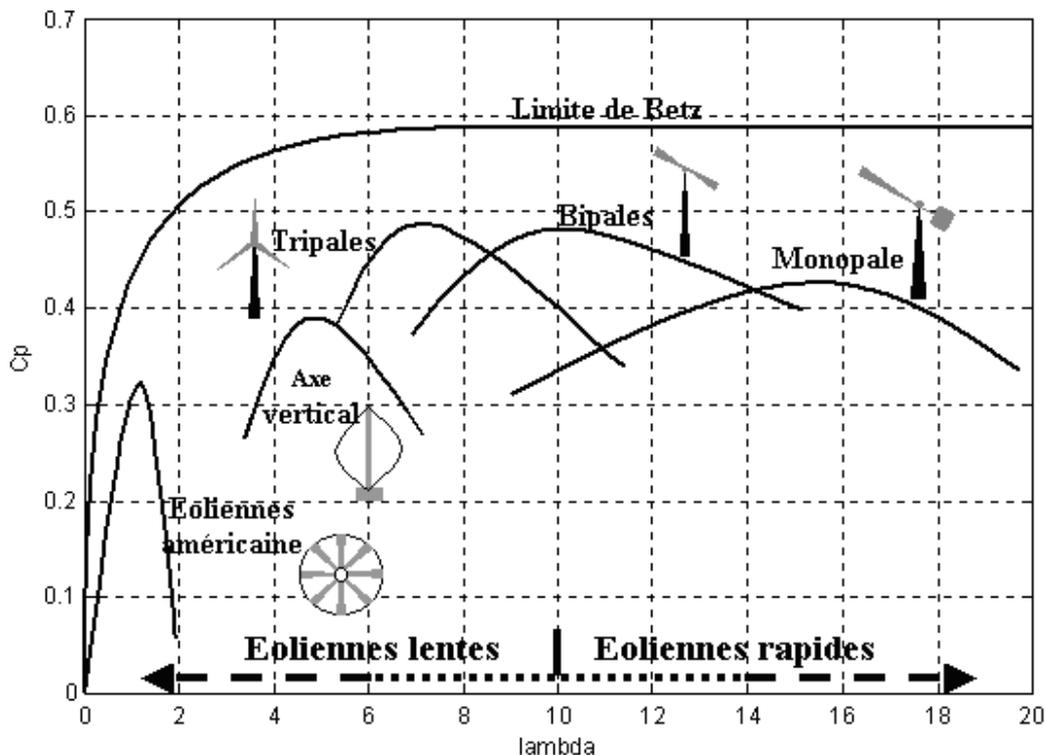
**Fig1.8-** Coefficient de puissance.

En représentant la caractéristique correspondante à l'équation (1.12), on s'aperçoit que  $C_p$  présente un maximum égale à  $16/27$ ; soit 0,59 appelée limite de Betz. Cette limite fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée, mais en réalité, elle n'est jamais atteinte [7].

On introduit une variable sans dimension appelée *vitesse spécifique*  $\lambda$  pour caractériser les performances aérodynamiques d'une éolienne. Chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent (**Fig. 1.8**).

Sur un plan aérodynamique, on peut comparer les différents types de turbines en comparant leurs coefficients de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$  (**Fig. 1.9**). On peut noter ainsi que [10]:

- Les courbes  $C_p(\lambda)$  montrent l'avantage intrinsèque des turbines à axe horizontal en terme de puissance.
- Les courbes  $C_p(\lambda)$  sont plus plates pour les éoliennes à axe horizontal à faible nombre de pales (1, 2, 3) par rapport celles à axes vertical ou aux multipales. Elles sont donc moins sensibles aux variations de  $\lambda$  autour de  $\lambda_{opt}$ .

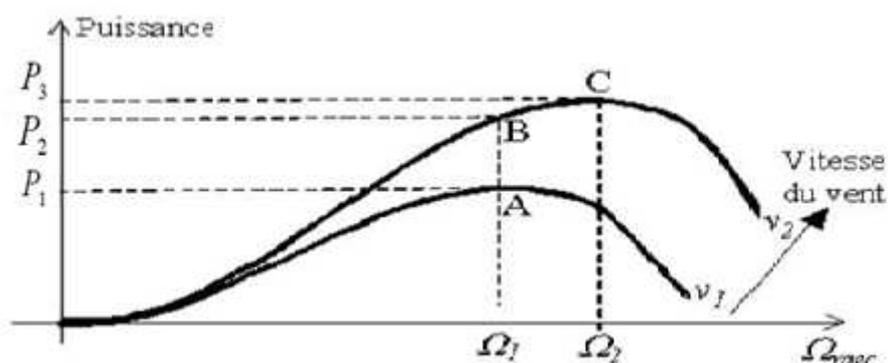


**Fig. 1.-** Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

## 7. Intérêt de la vitesse variable :

Les premières éoliennes à avoir été adoptées, dans les années 90, fonctionnaient à vitesse fixe. Malgré la simplicité, la robustesse et le faible coût de réalisation, ce type de fonctionnement présentait quelques inconvénients tels que la consommation en énergie réactive non contrôlée et le contrôle limité de la qualité de puissance. Mais depuis quelques années, les éoliennes fonctionnant à vitesse variable sont devenues le type prédominant parmi les installations éoliennes actuelles.

Les éoliennes à vitesse variables sont conçues de sorte à extraire un maximum de puissance dans une large gamme de vitesse de vent.



**Fig. 1.10-** Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent.

D'après la figure (1.10), on peut voir que, pour une vitesse du vent  $V_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$ , on obtient une puissance maximale  $P_1$  (point A). Si la vitesse du vent passe de  $V_1$  à  $V_2$ , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (vitesse fixe), une puissance  $P_2$  est transmise (point B) alors que la puissance maximale se trouve ailleurs sur la caractéristique (point C). Si on désire extraire une puissance maximale, il est nécessaire d'augmenter la vitesse de la génératrice à une vitesse  $\Omega_2$ . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent [5].

Grâce au caractère variable de la vitesse, on peut de façon continue extraire un maximum de puissance, accroître l'énergie captée et donc, améliorer le rendement énergétique.

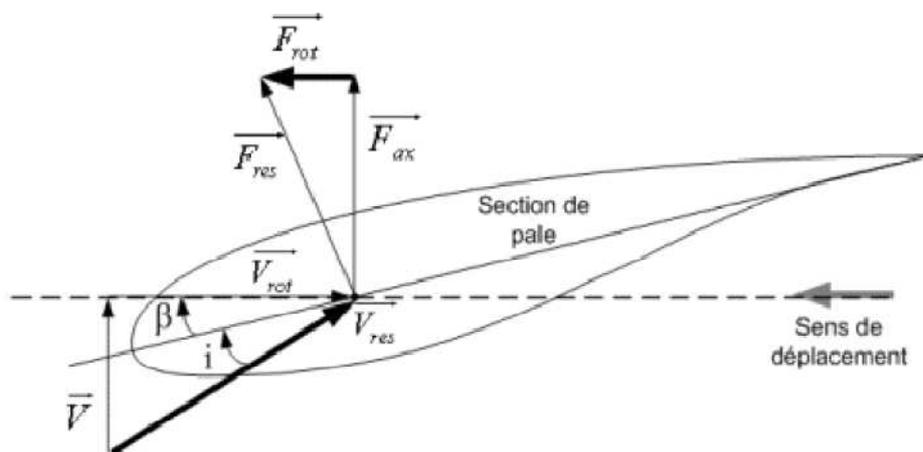
## 8. Stratégie de fonctionnement de l'aérogénérateur :

### 8.1. Bilan des forces sur la pale :

La figure (1.11) représente la section d'une pale d'aérogénérateur [11]. 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 mât et une poussée  $F_{rot}$  en direction de la rotation qui produit effectivement le déplacement.



**Fig. 1.11-** Bilan des forces sur une section de pale.

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

Il est à noter que  $\beta$  et  $i$  sont respectivement l'angle de calage et l'angle d'incidence [12].

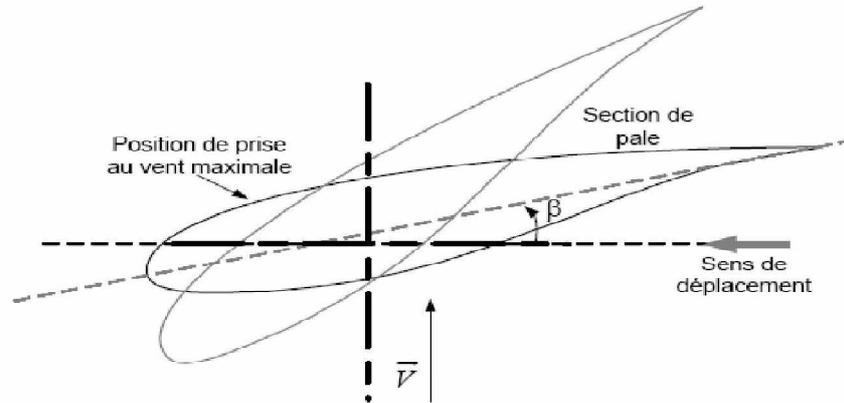
## 8.2. Moyens de réglage de la conversion de l'énergie :

Dans la phase d'exploitation, compte tenu du caractère très fluctuant du vent et aussi de la résistance limitée de la structure, on est amené à opérer deux types de réglage. En effet, pour garantir un captage maximal (optimal) de l'énergie incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent et l'angle d'incidence des pales.

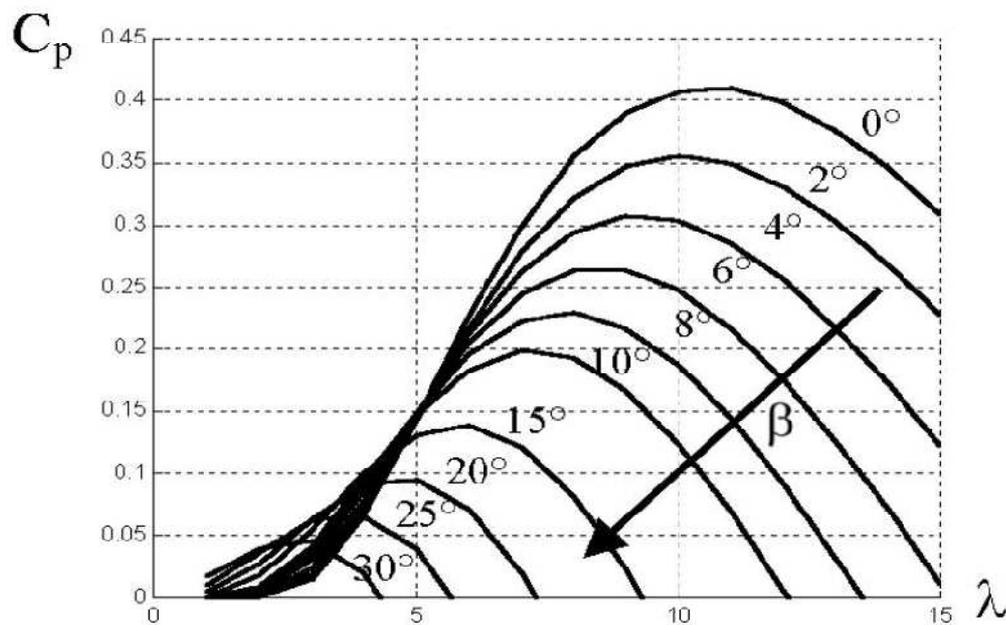
### 8.2.1. Système à pas variable ou à calage variable ou système « pitch » :

Sur une éolienne contrôlée à calage variable (appelée aussi une éolienne à pas variable), le contrôleur électronique vérifie plusieurs fois par seconde la puissance de sortie de l'éolienne. En cas de puissance de sortie trop élevée, le contrôleur électronique de l'éolienne envoie une commande au dispositif de calage qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité (**Fig. 1.12**).

Concevoir une éolienne à pas variable suppose une ingénierie très avancée afin d'assurer le positionnement exact des pales. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à assurer le meilleur rendement possible à tout moment (**Fig. 1.13**).



**Fig. 1.12-** Variation de l'angle de calage d'une pale.



**Fig. 1.13-** Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance.

### 8.2.2. Système à décrochage aérodynamique ou système « stall » :

C'est le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux. Les pales ont un profil optimisé pour obtenir le décrochage.

Cette solution est utilisée surtout quand la génératrice et le couplage conduisent à une vitesse de rotation peu variable (génératrice asynchrone à couplage direct sur le réseau).

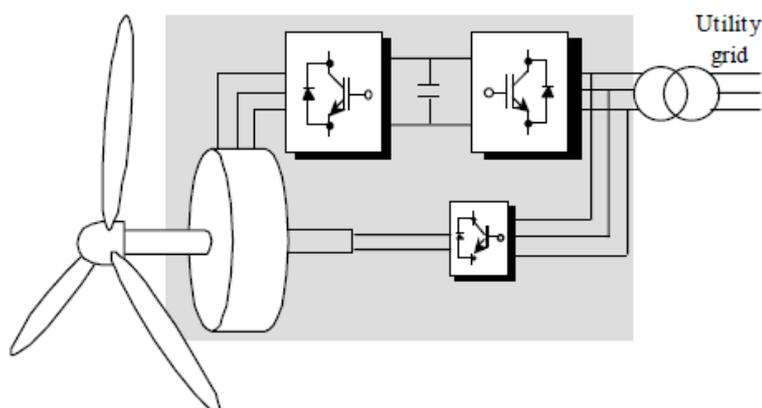
Il existe également des dispositifs intermédiaires qualifiés de « stall actif » dans lesquels un très faible réglage de l'angle de calage est associé à un profil de pale optimisé.

## 9. Chaînes de conversion électromécanique :

Diverses chaînes de production coexistent pour la production d'électricité par aérogénérateurs. Les configurations les plus utilisées sont les suivantes [12] :

### 9.1. Génératrice synchrone :

- Génératrice synchrone à rotor bobiné :

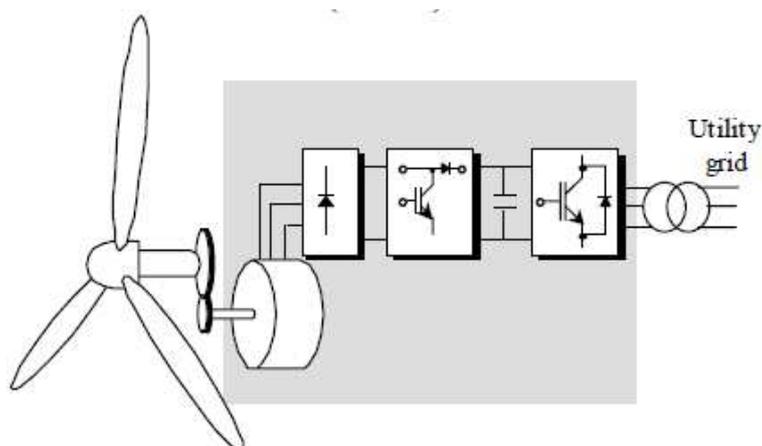


**Fig. 1.14-** Machine synchrone à rotor bobiné à vitesse variable.

Le système éolien basé sur la génératrice synchrone est montré sur la figure (1.14). Le stator est connecté au réseau électrique à travers un convertisseur AC-DC-AC. Le convertisseur coté machine permet de réguler le couple électromagnétique. Alors que le convertisseur coté réseau permet de réguler la puissance active et réactive délivrées par l'aérogénérateur.

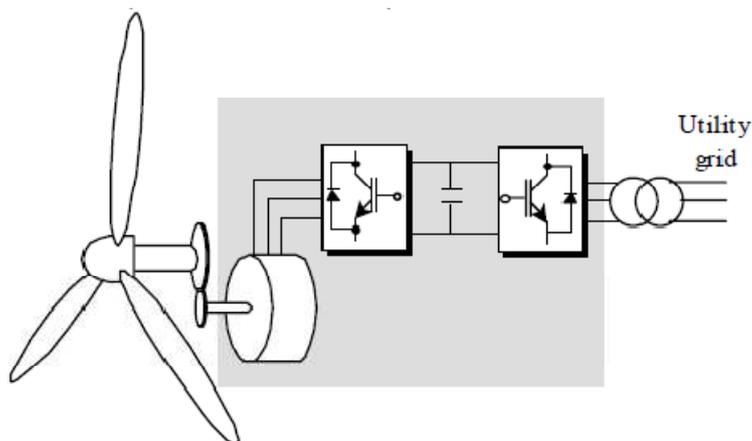
L'avantage de la machine synchrone à pôles saillants est qu'elle permet le control direct du facteur de puissance de la machine [13]. Cependant, l'existence des enroulements au rotor peut représenter un inconvénient, comparé à la machine synchrone à aimants permanents.

- Génératrice synchrone à aimants permanents :



**Fig. 1.15-** Génératrice synchrone à aimants avec un convertisseur Boost.

La figure (1.15) montre un système éolien où une machine synchrone à aimants permanents est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un convertisseur Boost. Dans ce cas le convertisseur Boost contrôle le couple électromagnétique. Le convertisseur coté réseau permet de réguler la tension du bus continu et de contrôler le facteur de puissance. Un des inconvénients de cette configuration est l'utilisation d'un convertisseur à diodes qui augmente l'amplitude du courant et les distorsions de la machine [14]. Cette configuration est utilisée pour les petites machines (< 50 kW).

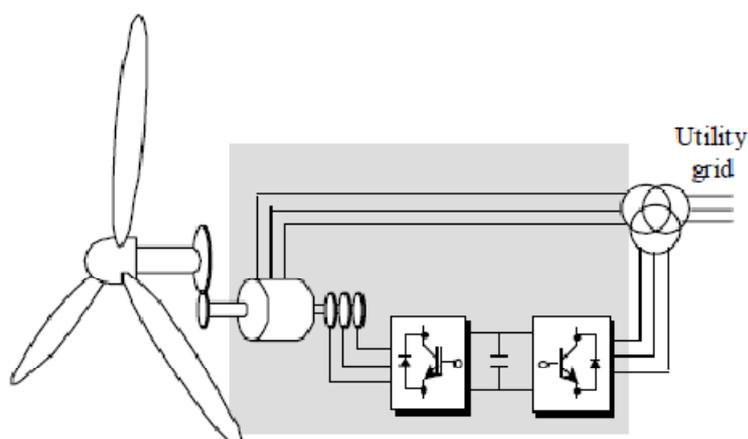


**Fig. 1.16-** Génératrice synchrone à aimants avec convertisseurs à MLI.

Une autre configuration utilisant la machine synchrone à aimants permanents est schématisée à la figure (1.16). Le redresseur à MLI est placé entre la machine et le bus continu et l'onduleur à MLI est connecté au réseau. Les avantages que présente ce système par rapport à celui de la figure (1.15) est l'utilisation de la commande à flux orienté qui permet à la machine d'opérer à son point de fonctionnement optimal [15]. L'inconvénient majeur de l'utilisation de la machine synchrone à aimants permanents est l'impossibilité de contrôler le facteur de puissance.

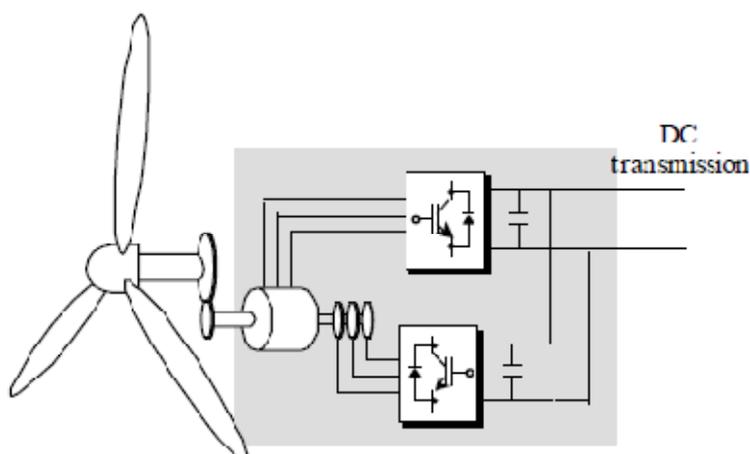
## 9.2. Génératrice asynchrone :

- Machine asynchrone à double alimentation :



**Fig. 1.17-** Génératrice asynchrone à double alimentation à rotor bobiné.

La chaîne de conversion représentée à la figure (1.17) est basée sur une génératrice asynchrone à double alimentation. Son principe de fonctionnement est issu de celui de la cascade hyposynchrone : le stator est directement connecté au réseau alors que le rotor est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Généralement, la commande du convertisseur coté rotor permet de contrôler le couple électromagnétique et la commande du convertisseur coté réseau permet de maintenir la tension du bus continu à une valeur constante. Toutefois, La robustesse des machines à double alimentation est diminuée par la présence de système à bagues et à ballais [13].

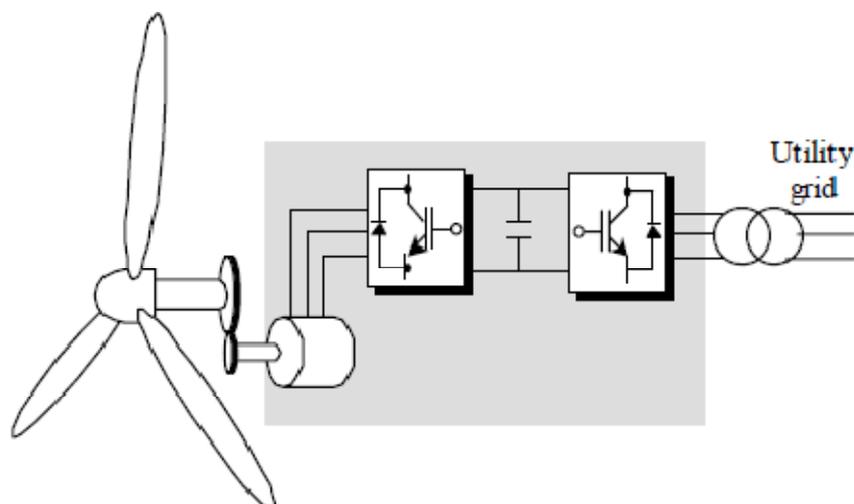


**Fig. 1.18-** Génératrice asynchrone à double alimentation à vitesse variable totalement commandée.

La figure (1.18) montre une utilisation de la machine asynchrone à double alimentation totalement commandée. Cette configuration permet de contrôler les

tensions et les fréquences du rotor et du stator. Ce système est utilisé dans les sites offshore. Il présente toutefois, un faible facteur de puissance.

- Génératrice à cage d'écureuil :



**Fig. 1.19-** Génératrice asynchrone à cage à vitesse variable.

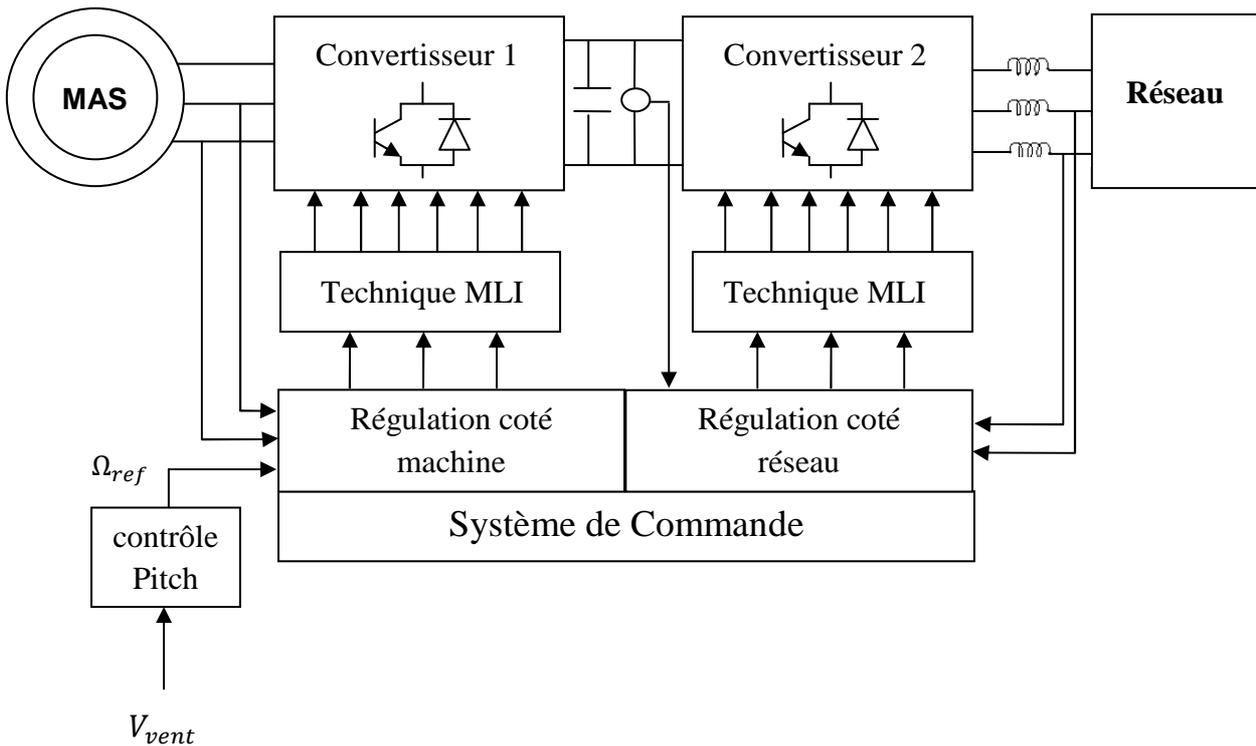
Le système éolien basé sur la machine asynchrone à cage est représentée à la figure (1.19). Le stator est connecté au réseau à travers deux convertisseurs connectés par un bus continu. Le système de contrôle du convertisseur coté stator permet de réguler le couple électromagnétique. Quand au convertisseur coté réseau, il permet de réguler la puissance active et réactive transmise et de maintenir la tension du bus continu à la valeur voulue. Le principal avantage de l'utilisation de la machine à cage est sa robustesse, sa simple construction et son faible coût [16].

## 10. Description du système étudié :

L'objectif général de ce mémoire est de proposer une chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

A partir d'un réseau présentant une tension et une fréquence fixes, il est possible, moyennant l'utilisation d'un variateur de fréquence, de piloter un moteur électrique à tension et fréquence variables. Avec un variateur adapté, le système peut être réversible. En partant d'une tension et fréquence variables, il est possible de restituer de l'énergie sur un réseau à tension et fréquence fixes. Le rotor de l'éolienne soumis à des variations de vitesse du vent génère au niveau du générateur auquel il est raccordé une tension et une fréquence variables.

Le montage (**Fig. 1.20**) décrit le schéma du système énergétique utilisé dans la production de l'énergie éolienne :



**Fig. 1.20** -Chaîne de conversion éolienne.

L'aérogénérateur étudié dans ce mémoire est une éolienne tripale à axe horizontal et à régulation pitch. Elle est munie d'un multiplicateur de vitesse et d'une génératrice électrique de type asynchrone à cage d'écureuil, à laquelle est ajouté un convertisseur de puissance de type (AC/DC/AC) qui comprend à un onduleur et un redresseur commandés par la technique de modulation de largeur d'impulsion (M.L.I.) ; connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

Le convertisseur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivré par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. Nous proposons dans ce qui suit une description plus détaillée de chacune des parties qui viennent d'être citées.

## 11. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un bref historique sur le développement des éoliennes et leur introduction progressive dans le marché de l'énergie électrique.

Après avoir donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans la production d'énergie électrique, nous avons porté notre attention sur l'éolienne à axe horizontal. Nous avons d'abord décrit les différents éléments constitutifs de la turbine, puis nous avons présenté la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ainsi

que les modes de régulation de la puissance disponible dans le but d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes.

Nous avons également cité quelques exemples parmi les nombreuses innovations, développées actuellement, dans le domaine de l'éolien en matière de l'électronique de puissance et des génératrices utilisées.

Pour finir, on a représenté le système éolien qui sera étudié plus en détail dans les chapitres qui suivent.

# Commande et régulation du système

---

## **Introduction :**

Pour notre étude, nous avons choisi une éolienne à axe horizontal munie d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil connectée à un convertisseur de puissance de type (AC/DC/AC). Ce convertisseur comprend un onduleur et un redresseur qui sont commandés par la technique de modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) et connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue.

Le problème majeur induit par l'intégration de l'éolienne dans le réseau électrique est dû à sa production aléatoire et difficilement prévisible (variations de la vitesse du vent). Pour cela, la tension et la fréquence du générateur sont toujours variables.

Le système de commande de l'éolienne peut être divisé en trois sous systèmes : Le premier sous système concerne le pitch control que nous avons traité dans le chapitre 1, le second décrit la commande de la machine asynchrone pour obtenir un fonctionnement en vitesse variable et le troisième contrôle le transfert de l'énergie électrique de la machine au réseau électrique.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord présenter le modèle mathématique de la machine asynchrone à cage afin de pouvoir effectuer sa commande par la suite. Puis, nous détaillerons les deux sous systèmes cités précédemment qui concernent respectivement la régulation coté machine et la régulation coté réseau.

## 1. Modélisation de la machine asynchrone :

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications. La machine asynchrone présente l'avantage d'être robuste, de construction simple et peu coûteuse [17]. A l'origine, elle était uniquement utilisée en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.

### 1.1. Description de la MAS :

Une machine asynchrone à cage se présente sous la forme d'un carter entourant le circuit magnétique, ferromagnétique, statorique qui accueille dans des encoches l'enroulement statorique polyphasé (généralement triphasé) bobiné en fil de cuivre isolé. A l'intérieur de ce circuit magnétique, qui se présente comme un cylindre creux, séparé par un entrefer, tourne le circuit magnétique rotorique. Celui-ci accueille dans ses encoches les barreaux de la cage rotorique, en aluminium coulé ou en cuivre, court-circuités à chaque extrémité par des anneaux réalisés dans le même matériau. Le circuit magnétique rotorique est traversé par l'arbre qui repose sur des paliers montés dans les flasques fixées au carter (Fig. 2.1) [11].

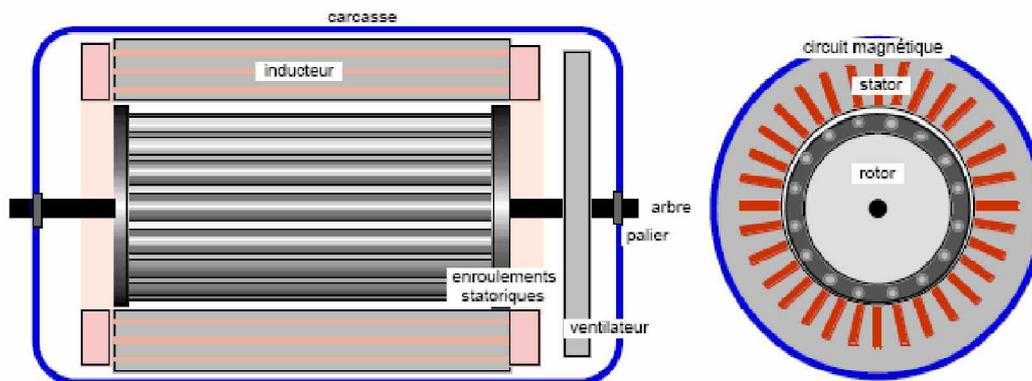


Fig. 2.1- Coupe d'une machine asynchrone à cage.

### 1.2. Principe de fonctionnement :

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques. La vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme.

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux. Une force électromotrice induite apparaît et crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux (lois de Lenz). Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique. La

différence entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée glissement.

Lorsque la machine asynchrone tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator, on a un fonctionnement de type moteur. Si la vitesse de rotation du rotor devient égale à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator. Enfin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator (fonctionnement hypersynchrone), la machine fonctionne en générateur. Mais son stator doit être forcément relié au réseau pour créer le champ magnétique nécessaire au fonctionnement de la génératrice [7].

### 1.3. Hypothèses :

La machine asynchrone comprend une répartition des enroulements et une géométrie très complexe. Par conséquent, pour une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [5].

- On suppose que le circuit magnétique n'est pas saturé. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaire.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault ainsi que l'effet de la température sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.
- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de force magnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme, les inductances propres sont constantes et les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.

### 1.4. Mise sous forme d'équations d'état :

Les expressions des tensions et des flux de la MAS, écrites dans le plan (d, q) (**Annexe B**), sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

Avec :

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

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

$L_m = \frac{3}{2} \cdot M_{sr}$  : inductance cyclique mutuelle.

Nous avons exprimé les équations de la machine dans un repère (d, q) qui fait un angle  $\theta_s$  avec le stator et qui fait également un angle électrique  $\theta_r$  avec le rotor mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est arbitraire.

Dans notre étude, la MAS est représentée par un modèle lié au stator caractérisé par  $\theta_s = 0$ , et par conséquent  $\theta_r = -\theta$ . L'intérêt de ce modèle est que les grandeurs électriques restent sinusoïdales car la transformation effectuée est une transformation linéaire et non pas trigonométrique. Les équations (2.1) et (2.2) deviennent alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + \omega \cdot \Phi_{qr} \\ 0 = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \omega \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (2.5)$$

En utilisant la méthode du bilan des puissances instantanées (**Annexe C**), nous obtenons plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{cases} C_e = P \cdot (\Phi_{qr} \cdot I_{dr} - \Phi_{dr} \cdot I_{qr}) \\ C_e = P \cdot (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \\ C_e = P \cdot L_m \cdot (I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{ds} \cdot I_{qr}) \\ C_e = P \cdot \frac{L_m}{L_r} \cdot (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) \end{cases} \quad (2.6)$$

L'équation mécanique de la MAS est donnée par :

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_{frot} + C_{arbre} \quad (2.7)$$

En utilisant les expressions (2.5), (2.6) et (2.7), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} \frac{dI_{ds}}{dt} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) \cdot I_{ds} + \frac{1-\sigma}{\sigma L_m T_r} \cdot \Phi_{dr} + \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \cdot \Phi_{qr} \cdot \omega + \frac{1}{\sigma L_s} \cdot V_{ds} \\ \frac{dI_{qs}}{dt} = -\left(\frac{1}{\sigma T_s} + \frac{1-\sigma}{\sigma T_r}\right) \cdot I_{qs} + \frac{1-\sigma}{\sigma L_m T_r} \cdot \Phi_{qr} - \frac{1-\sigma}{\sigma L_m} \cdot \Phi_{dr} \cdot \omega + \frac{1}{\sigma L_s} \cdot V_{qs} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = \frac{M}{T_r} \cdot I_{ds} - \frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{dr} - \omega \cdot \Phi_{qr} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = \frac{M}{T_r} \cdot I_{qs} - \frac{1}{T_r} \cdot \Phi_{qr} + \omega \cdot \Phi_{dr} \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{L_m P^2}{J L_r} \cdot (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) - \frac{f}{J} \cdot \omega + \frac{P}{J} \cdot C_r \end{cases} \quad (2.8)$$

Avec:

$$T_s = \frac{L_s}{R_s} : \text{constante de temps statorique.}$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} : \text{constante de temps rotorique.}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} : \text{coefficient de dispersion.}$$

## 2. Régulation coté machine :

### 2.1. Commande vectorielle de la MAS :

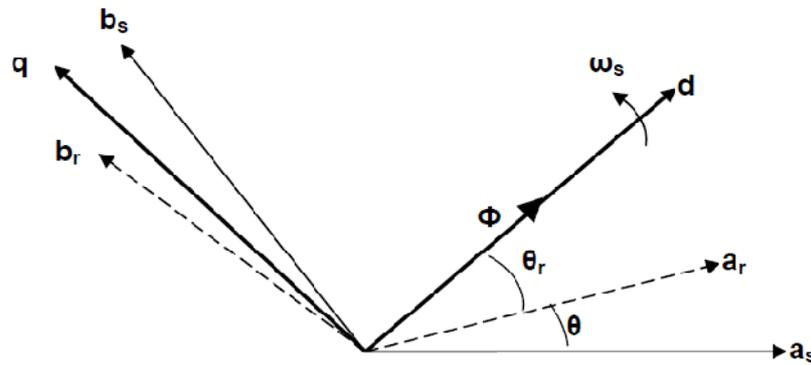
Pour un modèle de la machine asynchrone, plusieurs stratégies de commande sont envisageables en fonction du flux et de la vitesse que l'on désire réguler. Dans le cadre de notre travail, nous utilisons la commande vectorielle.

L'essentiel des travaux de recherche dans le domaine de la commande de la machine asynchrone a été consacré à l'amélioration des performances du contrôle dynamique des variables couple, flux et vitesse. Historiquement est apparue la commande scalaire reposant sur de simples lois statiques basées sur un modèle de la machine asynchrone en régime permanent. Puis à partir des équations différentielles issues d'un modèle dynamique de la machine, se sont généralisées des commandes dynamiques qualifiées de vectorielles basées sur le calage d'un référentiel d'étude avec un vecteur flux choisi [18].

### 2.1.1. Principe de la commande vectorielle :

La commande par orientation du flux (ou commande vectorielle) consiste à régler le flux par une des deux composantes du courant et le couple par l'autre composante. Pour cela, il faut choisir un système d'axes (d, q) et une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux [19].

Pour simplifier la commande, il est nécessaire de faire un choix judicieux de référentiel. On se place donc dans un référentiel (d, q) lié au champ tournant tel que l'axe d coïncide avec la direction désirée du flux (**Fig. 2.2**).



**Fig. 2.2-** Principe de la commande par orientation de flux.

Le flux à orienté peut être le flux statorique, rotorique ou celui de l'entrefer. Dans ce projet, nous utilisons l'orientation du flux rotorique, d'où :  $\Phi_{dr} = \Phi_r$  et  $\Phi_{qr} = 0$ .

Les hypothèses sur l'orientation du repère et sur l'annulation de la composante quadratique du flux rotorique qui en résulte engendrent des relations particulières entre les grandeurs.

$$V_{ds} = R_s I_{ds} + \sigma L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Phi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s I_{qs} \quad (2.9)$$

$$V_{qs} = R_s I_{qs} + \sigma L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega_s \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Phi_r}{dt} + \omega_s \sigma L_s I_{ds} \quad (2.10)$$

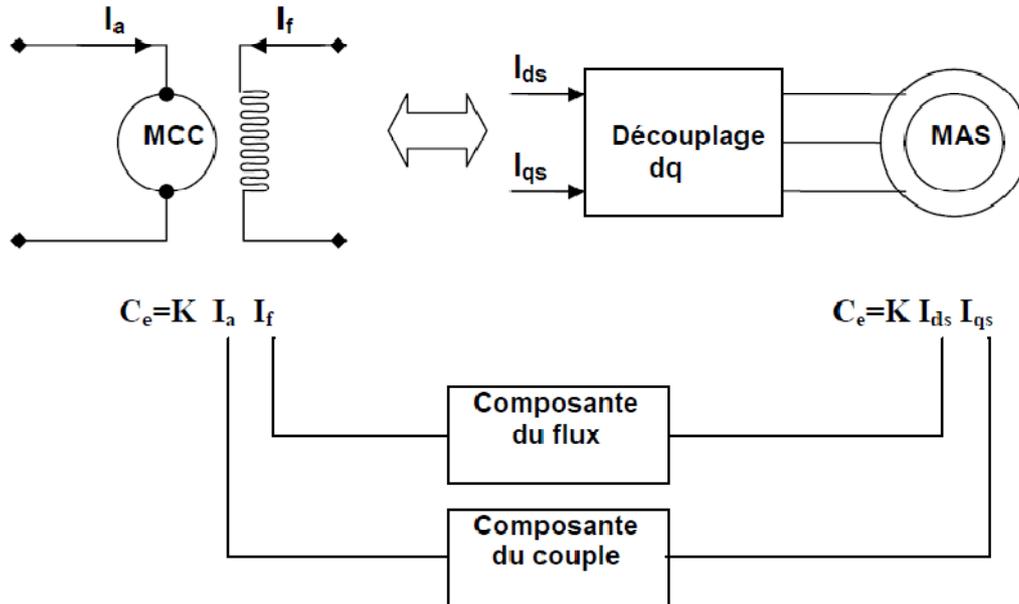
$$\frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{L_m}{T_r} I_{ds} - \frac{1}{T_r} \Phi_r \quad (2.11)$$

$$\omega_s = P \Omega_{mec} + \frac{L_m}{T_r} \frac{I_{qs}}{\Phi_r} \quad (2.12)$$

$$C_{em} = P \frac{L_m}{L_r} \Phi_r I_{qs} \quad (2.13)$$

D'après les relations (2.11) et (2.13), on voit bien que le courant  $I_{ds}$  fixe le flux et le couple ne dépend que du courant  $I_{qs}$  si le flux rotorique est maintenu constant. Il est possible alors d'agir indépendamment sur le flux rotorique et le couple électromagnétique par

l'intermédiaire des composantes du courant statorique  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$  respectivement. On retrouve ainsi une structure semblable à celle de la machine à courant continu (**Fig. 2.3**).



**Fig. 2.3-** Principe de découplage pour la MAS par analogie avec la MCC.

La commande de la MAS nécessite une connaissance de la position du flux à orienter à tout instant pour le faire coïncider avec l'axe direct d. Cette dernière peut être déterminée par deux approches différentes [20].

- Contrôle indirect, où la phase du flux rotorique est estimée à partir d'une relation donnant la vitesse de glissement, le principe de cette méthode consiste à ne pas utiliser l'amplitude du flux rotorique mais seulement sa position.
- Contrôle direct, où la phase du flux est mesurée par un capteur physique ou estimée en utilisant le modèle dynamique. Cette méthode de commande nécessite une bonne connaissance du module du flux et de sa phase et celles-ci doivent être vérifiées quel que soit le régime de fonctionnement.

Dans le cadre de notre travail, nous utiliserons la commande directe car elle est simple de mise en œuvre. Elle permet de découpler totalement le couple et le flux de la machine avec une loi de commande qui nécessite peu de calculs.

## 2.1.2. Commande directe à flux rotorique orienté :

### 2.1.2.1. Estimation de $\Phi_r$ et $\theta_s$ :

Le principe des estimateurs consiste à utiliser les équations du modèle pour calculer une estimation d'une grandeur difficilement mesurable (difficilement accessible) pour des raisons techniques (c'est le cas du flux) ou pour des problèmes de coût [21].

- Calcul du flux :

Le flux peut être reconstitué par des estimateurs utilisés en boucle ouverte, ces estimateurs reposent sur l'utilisation de la représentation de la machine sous forme d'équations de Park. Ils sont obtenus par une résolution directe des équations associées à ce modèle.

La relation (2.11) permet d'estimer le flux  $\hat{\Phi}_r$  :

$$\hat{\Phi}_r = \frac{L_m}{1 + s.T_r} \cdot I_{ds} \quad (2.14)$$

- Calcul de  $\theta_s$  :

D'après l'équation (2.12), La pulsation statorique s'écrit :

$$\omega_s = P \cdot \Omega + \frac{L_m}{T_r} \cdot \frac{I_{qs}}{\hat{\Phi}_r} \quad (2.15)$$

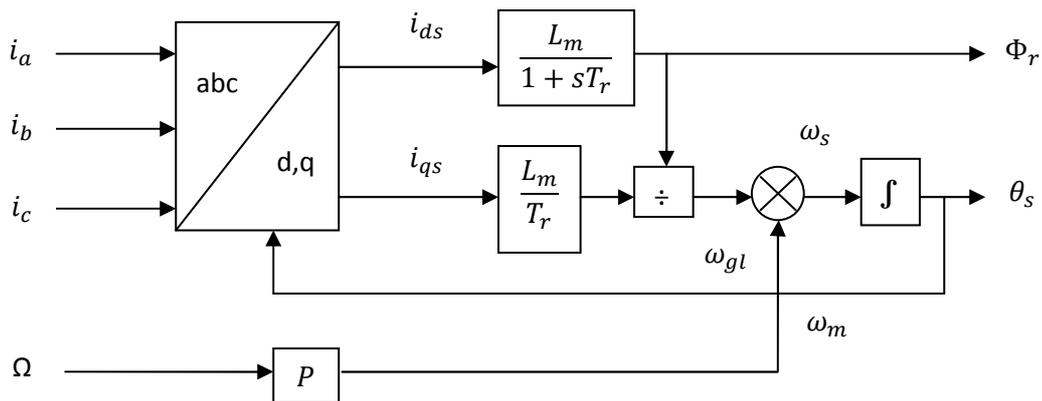
L'angle statorique est obtenu par intégration de la pulsation statorique :

$$\theta_s = \frac{1}{s} \cdot \omega_s \quad (2.16)$$

On peut écrire aussi :

$$\theta_s = \frac{1}{s} \omega_s \cdot \text{mod}[2\pi] \quad (2.17)$$

La figure (2.4) illustre les blocs d'estimation du flux rotorique et de sa phase.



**Fig. 2.4-** Estimateur de  $\hat{\Phi}_r$  et  $\theta_s$ .

Pour notre étude, nous n'avons pas besoin de l'estimation du couple électromagnétique car ce dernier est directement imposé à la machine asynchrone par la turbine.



## 2.2. Calcul des régulateurs :

### 2.2.1. Régulation du flux :

Pour avoir un bon fonctionnement de la machine, le flux est maintenu à sa valeur nominale.

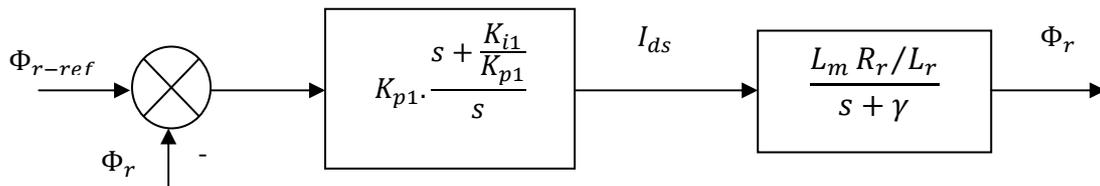
Le découplage permet d'écrire :

$$\frac{\Phi_r}{I_{ds}} = \frac{L_m R_r / L_r}{s + \gamma} \quad (2.18)$$

Avec :  $\gamma = \frac{R_r}{L_r}$

Le régulateur Proportionnel Intégral (PI) utilisé pour commander la machine asynchrone en génératrice est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [22]. C'est pour cela qu'il a retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien.

L'utilisation d'un régulateur PI donne le schéma en boucle ouverte suivant :



**Fig. 2.6-** Schéma de régulation du flux en boucle ouverte.

La fonction de transfert en boucle ouverte avec le régulateur s'écrit de la manière suivante :

$$BO(s) = K_{p1} \cdot \frac{s + \frac{K_{i1}}{K_{p1}}}{s} \cdot \frac{L_m R_r / L_r}{s + \gamma} \quad (2.19)$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_{i1}}{K_{p1}} = \gamma \quad (2.20)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte se simplifie et donne :

$$BO(s) = \frac{K_{p1} \cdot L_m \cdot R_r / L_r}{s} \quad (2.21)$$

En boucle fermée, la fonction de transfert vaut alors :

$$BF(s) = \frac{1}{1 + \tau_1 \cdot s} \quad (2.22)$$

On constate que le système bouclé va se comporter comme un premier ordre dont la constante de temps est :

$$\tau_1 = \frac{1}{K_{p1} \cdot L_m \cdot R_r / L_r} \quad (2.23)$$

Or, nous savons que pour un système de 1<sup>er</sup> ordre, la sortie atteint 63% de sa valeur finale au bout de  $\tau_1$ , et 95% de sa valeur finale au bout de  $3\tau_1$  [22].

Donc, pour un temps de réponse  $t_{rep1(5\%)}$  imposé, nous obtenons la condition suivante :

$$t_{rep1(5\%)} = 3\tau_1 = 3 \frac{1}{K_{p1} \cdot L_m \cdot R_r / L_r} \quad (2.24)$$

On peut désormais exprimer les coefficients du correcteur en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_{p1} = 3 \cdot \frac{1}{t_{rep1(5\%)} \cdot L_m \cdot R_r / L_r} \quad (2.25)$$

$$K_{i1} = \gamma \cdot K_{p1} \quad (2.26)$$

### 2.2.2. Régulation de la vitesse :

Nous avons:

$$\frac{\omega}{I_{qs}} = \frac{p^2 \frac{L_m}{J \cdot L_r} \cdot \Phi_{rn}}{s + \frac{f}{J}} \quad (2.27)$$

L'utilisation d'un régulateur PI classique donne le schéma en boucle ouverte suivant :

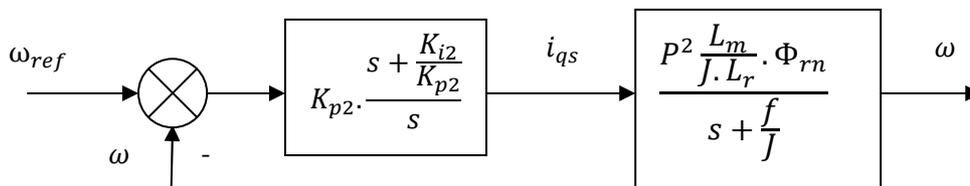


Fig. 2.7- Schéma de régulation de la vitesse en boucle ouverte.

De la même manière, on compense le pôle  $(s + \frac{f}{J})$  par  $(s + \frac{K_{i2}}{K_{p2}})$ , et ainsi on a :

$$\frac{K_{i2}}{K_{p2}} = \frac{f}{J} \quad (2.28)$$

En boucle fermée, nous obtenons une réponse du 1<sup>er</sup> ordre avec la constante de temps suivante :

$$\tau_2 = \frac{1}{K_{p2} \cdot P^2 \frac{L_m}{J \cdot L_r} \cdot \Phi_{rn}} \quad (2.29)$$

Les paramètres du régulateur sont alors :

$$K_{p2} = 3 \cdot \frac{1}{t_{rep2(5\%)} \cdot P^2 \frac{L_m}{J \cdot L_r} \cdot \Phi_{rn}} \quad (2.30)$$

$$K_{i2} = \frac{f}{J} \cdot K_{p2} \quad (2.31)$$

### 2.2.3. Calcul de $C_{em}$ et $I_{q\_ref}$ :

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivante :

$$C_{em} = C_{turbine} - C_{frot} - P^2 \frac{L_m}{J L_r} \cdot \Phi_{rn} \cdot i_{qsref1} \quad (2.32)$$

Avec :

$$C_{turbine} = \frac{P}{J} \cdot C_r \quad (2.33)$$

$$C_{frot} = \frac{f}{J} \cdot \omega \quad (2.34)$$

A partir du couple électromagnétique, on peut déterminer le courant  $I_{qs\_ref}$  tel que :

$$\text{si : } C_{em} < 0 \quad \Rightarrow \quad I_{qs\_ref} = 0$$

$$\text{et si : } C_{em} > 0 \quad \Rightarrow \quad I_{qs\_ref} = - \frac{C_{em}}{P^2 \frac{L_m}{J \cdot L_r} \cdot \Phi_{rn}}$$

### 2.2.4. Régulation des courants $I_{qs}$ et $I_{ds}$ :

Le flux  $\Phi_r$  étant orienté sur l'axe  $d$ , les tensions  $V_{ds}$  et  $V_{qs}$  sont exprimées par les relations suivantes :

$$V_{ds} = \sigma L_s \cdot \frac{dI_{ds}}{dt} + \left( R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} R_r \right) I_{ds} - \sigma L_s \omega_s I_{qs} - \frac{L_m R_r}{L_r^2} \Phi_r \quad (2.35)$$

$$V_{qs} = \sigma L_s \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} + \left( R_s + \frac{L_m^2}{L_r^2} R_r \right) I_{qs} - \sigma L_s \omega_s I_{ds} + \frac{L_m}{L_r^2} \omega_s \cdot \Phi_r \quad (2.36)$$

Notre objectif est, dans la mesure du possible, de limiter l'effet d'une entrée sur une seule sortie. Nous pouvons alors modéliser le processus sous la forme d'un ensemble de systèmes monovariables évaluant en parallèle. Les commandes sont donc non interactives.

Afin d'éviter le couplage entre les deux équations précédentes, nous allons faire la régulation des courants en négligeant les termes de couplage. Ces derniers sont rajoutés à la sortie des correcteurs de courants pour obtenir les tensions nécessaires pour le réglage [23].

Le principe revient à définir deux nouvelles variables  $V_{ds1}$  et  $V_{qs1}$ , telles que :

$$V_{ds} = V_{ds1} - e_{ds} \quad (2.37)$$

$$V_{qs} = V_{qs1} - e_{qs} \quad (2.38)$$

Avec :

$$e_{ds} = \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot I_{qs} + \frac{L_m}{L_r^2} \cdot R_r \cdot \Phi_r \quad (2.39)$$

$$e_{qs} = -\omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot I_{ds} - \frac{L_m}{L_r} \cdot \omega_s \cdot \Phi_r + \frac{L_m^2}{L_r T_r} I_{qs} \quad (2.40)$$

Nous obtenons alors un nouveau système pour lequel :

$$V_{ds1} = \sigma \cdot L_s \cdot \frac{dI_{ds}}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} \right) I_{ds} \quad (2.41)$$

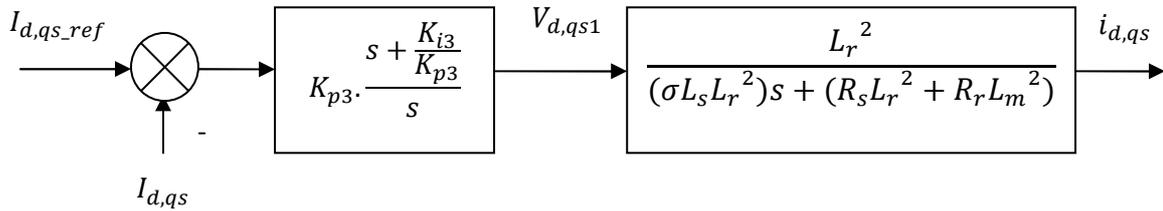
$$V_{qs1} = \sigma \cdot L_s \cdot \frac{dI_{qs}}{dt} + \left( R_s + R_r \frac{L_m^2}{L_r^2} \right) I_{qs} \quad (2.42)$$

Les fonctions de transfert  $I_{ds}/V_{ds1}$  et  $I_{qs}/V_{qs1}$  sont respectivement données par :

$$\frac{I_{ds}}{V_{ds1}} = \frac{L_r^2}{(\sigma L_s L_r^2) s + (R_s L_r^2 + R_r L_m^2)} \quad (2.43)$$

$$\frac{I_{qs}}{V_{qs1}} = \frac{L_r^2}{(\sigma L_s L_r^2) s + (R_s L_r^2 + R_r L_m^2)} \quad (2.44)$$

On peut noter que ces deux fonctions de transfert sont identiques. Nous utiliserons alors le même correcteur PI pour réguler les courants  $I_{ds}$  et  $I_{qs}$ .



**Fig. 2.8-** Schéma de régulation des courants en boucle ouverte.

En suivant les mêmes démarches que pour le calcul des régulateurs du flux et de la vitesse, on retrouve les paramètres suivants :

$$K_{p3} = \frac{3\sigma L_s}{t_{rep3(5\%)}} \quad (2.45)$$

$$K_{i3} = \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} \quad (2.46)$$

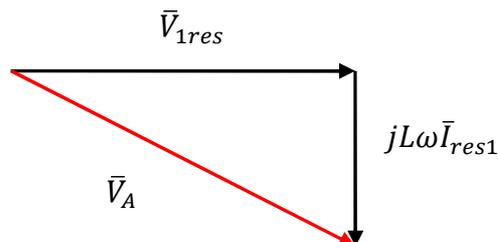
### 3. Régulation coté réseau :

Le but du convertisseur coté réseau est de réguler la tension continue  $V_{dc}$  et de maintenir l'équilibre entre la puissance du bus continu et celle fournie au réseau électrique.

La bidirectionnalité de la puissance entre la machine asynchrone et le réseau est possible à travers un niveau de tension du bus continu supérieur à la valeur crête de la tension du réseau [24], cette condition doit être vérifiée à chaque instant. On peut voir cela clairement en faisant la représentation de Fresnel pour le circuit du réseau (**fig. 2.9**).

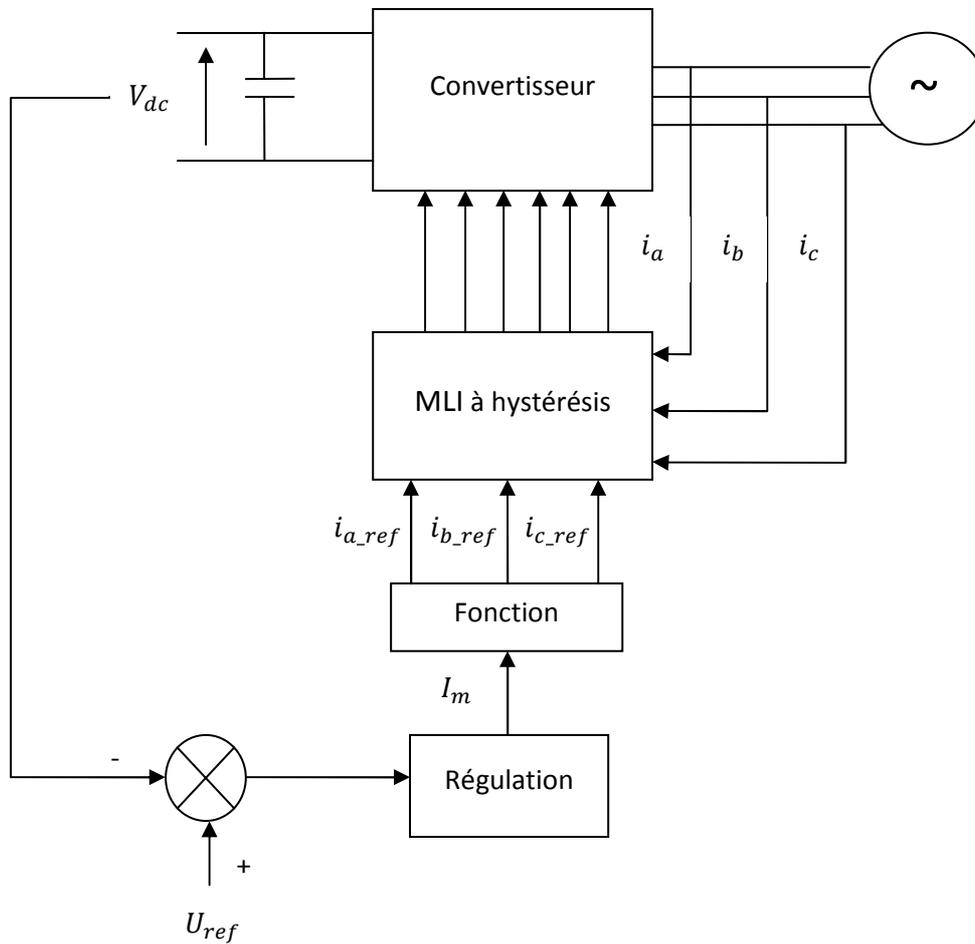
La relation entre les grandeurs complexes du réseau est donnée par :

$$\bar{V}_A = \bar{V}_{1res} - jL\omega\bar{I}_{res1} \Rightarrow |\bar{V}_A|^2 = V_{max}^2 + (L\omega I_{max})^2 \quad (2.47)$$



**Fig. 2.9-** Représentation de Fresnel du circuit du réseau.

Ainsi, une boucle de régulation est effectuée (**Fig. 2.10**), elle permet de générer la référence du courant à injecter dans le réseau.



**Fig. 2.10-** Schéma de régulation coté réseau.

### 3.1. Régulation du bus continu :

Pour modéliser la boucle de tension, on utilise le principe de la conservation de la puissance avec l'hypothèse d'un convertisseur sans pertes.

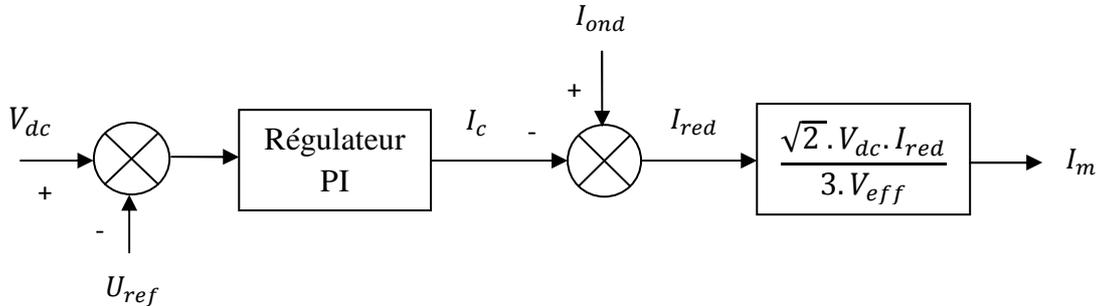
$$\begin{cases} P_{réseau} = 3 \cdot V_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos \varphi \\ P_{bus} = V_{dc} \cdot I_{red} \end{cases} \quad (2.48)$$

Où  $V_{dc}$  est la tension aux bornes de la capacité,  $P_{réseau}$  la puissance coté réseau et  $P_{bus}$  la puissance coté continu.

En imposant un facteur de puissance unitaire, on obtient :

$$I_{eff} = \frac{V_{dc} \cdot I_{red}}{3 \cdot V_{eff}} \quad (2.49)$$

D'où, le schéma bloc suivant :

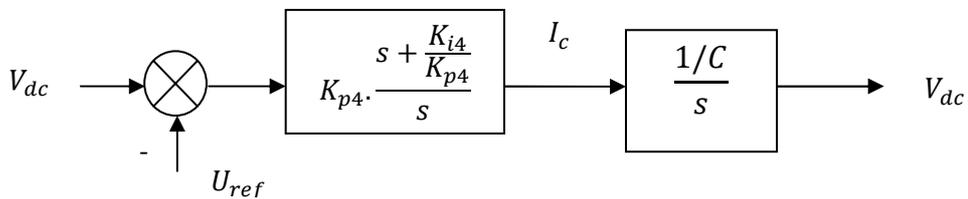


**Fig. 2.11-** Schéma bloc de la boucle de tension.

L'équation électrique de la branche du condensateur nous permet d'écrire :

$$\frac{V_{dc}}{I_c} = \frac{1/C}{s} \quad (2.50)$$

En utilisant un régulateur proportionnel-Intégral classique, on représente la boucle ouverte de régulation suivante :



**Fig. 2.12-** Schéma de régulation de la tension du bus continu en boucle ouverte.

Ainsi, on trouve :

$$K_{i4} = 0 ; K_{p4} = 3 \cdot \frac{C}{t_{rep4(5\%)}} \quad (2.51)$$

#### 4. Conclusion :

Dans ce chapitre, un modèle adéquat de la machine a été réalisé dans le but d'établir une commande directe à flux rotorique orienté ayant pour principe le découplage entre le couple électromagnétique et le flux. Avec cette orientation du flux, nous avons obtenu un modèle

découplé de la machine asynchrone. Puis, nous avons effectué un réglage conventionnel à base de régulateurs proportionnels intégrateurs PI.

Une autre commande a été établie au moyen d'une boucle de régulation qui génère la référence du courant à injecter dans le réseau. Cette commande permet de maintenir la tension du bus continu à la valeur voulue.

Les résultats de simulation de notre système de commande seront présentés dans le chapitre qui suit après l'étude détaillée des convertisseurs.

# Etude de la cascade onduleur-bus continu-redresseur

---

## **Introduction :**

Dans ce chapitre, nous allons étudier la cascade : redresseur triphasé- bus continu-onduleur triphasé connecté au stator d'une machine asynchrone à cage d'écureuil. Cette cascade constitue une alimentation réelle du réseau à laquelle elle est connectée.

Il existe plusieurs structures pour les deux convertisseurs qui viennent d'être cités où, chacune correspond à un type d'application déterminé ou permet des performances recherchées.

Dans ce qui suit, nous utiliserons deux types de cascade ; la première, avec des convertisseurs à deux niveaux et la deuxième, avec des convertisseurs à trois niveaux. Nous présenterons d'abord l'onduleur de tension à deux niveaux commandé par la MLI à une porteuse, ainsi que le redresseur de courant à deux niveaux commandé par la MLI à hystérésis. Ensuite, nous passerons à l'onduleur à trois niveaux à structure NPC commandé par la MLI à deux porteuses et au redresseur à trois niveaux qui est également commandé par la MLI à hystérésis.

Des simulations seront effectuées pour montrer les performances de la structure de la chaîne de transmission et des stratégies de commande utilisées.

## 1. Onduleur-redresseur à deux niveaux :

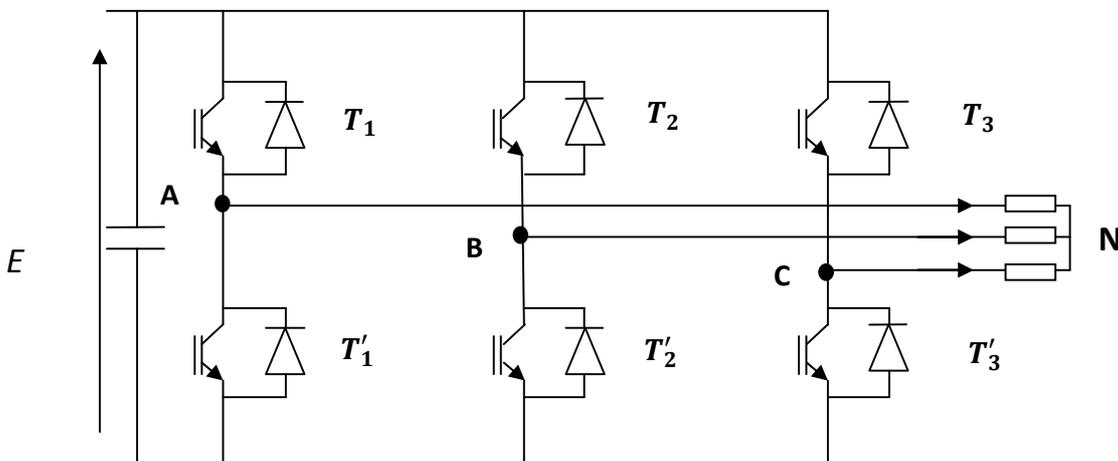
### 1.1. Onduleur de tension à deux niveaux :

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs de l'électronique de puissance, ils sont présents dans les domaines d'applications les plus variés. La forte évolution de ces convertisseurs s'est appuyée d'une part, sur le développement des composants à semi-conducteurs (entièrement commandables, puissants, robustes et rapides). Et d'autre part, sur l'utilisation quasi-généralisée des techniques dites de *modulation de largeur d'impulsion*.

#### 1.1.1. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux :

L'onduleur est un convertisseur statique d'énergie qui permet de générer des tensions alternatives à partir de la tension du bus continu.

L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est constitué de trois bras. Chaque bras comprend deux interrupteurs. Et pour chaque interrupteur, une diode de récupération est montée en tête-bêche avec le semi-conducteur contrôlable (**Fig. 3.1**).



**Fig. 3.1-** Structure de l'onduleur à deux niveaux.

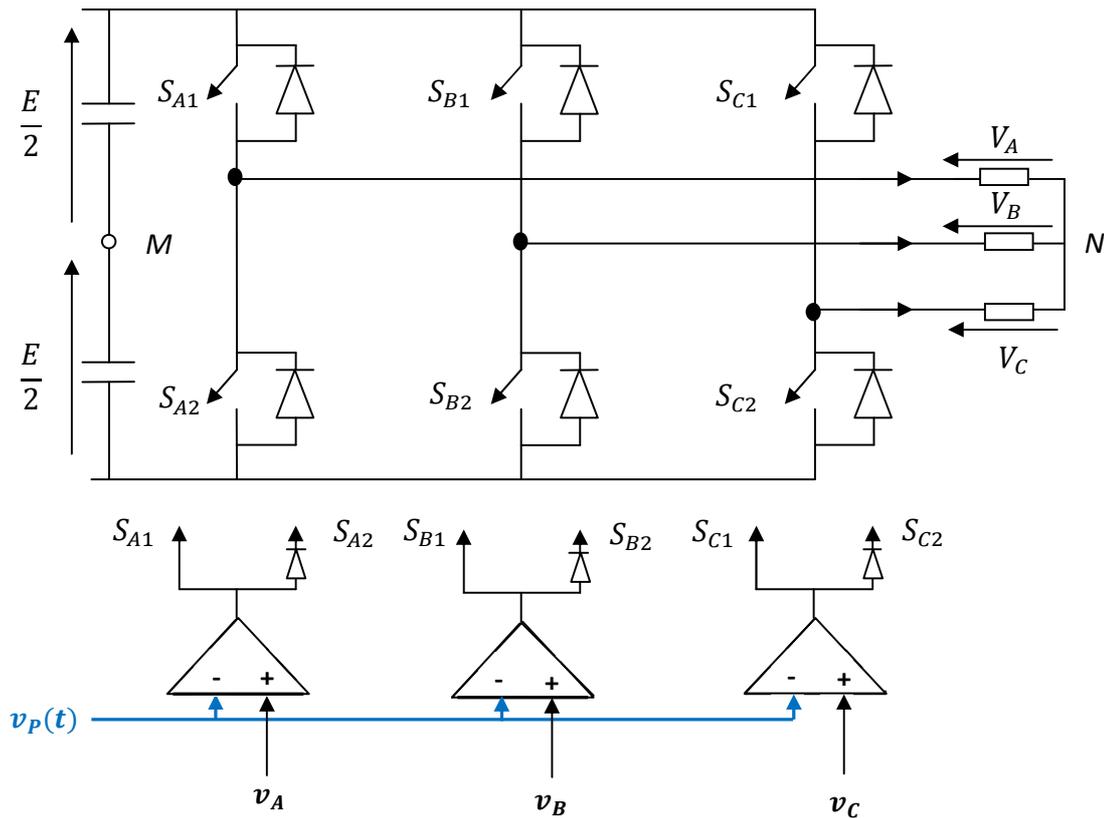
#### 1.1.2. Modélisation et commande de l'onduleur de tension à deux niveaux :

D'une façon générale, il existe deux moyens d'action pour réaliser cette conversion :

- Le premier, qu'on peut appeler *la commande externe* s'appuie sur l'utilisation directe de la cellule de base et consiste à régler la fréquence et la durée des interconnexions de la

source avec la sortie. Il est donc plutôt temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion. C'est cette commande que nous utiliserons par la suite.

- Le second définit par *la commande interne* revient à contrôler les signes des courants du bras et des tensions aux bornes des semi-conducteurs.



**Fig. 3.2-** Modèle de connaissance et de commande de l'onduleur de tension à deux niveaux.

En nous appuyons sur le schéma de la figure (3.2), pour simplifier notre étude, nous supposons que :

- La source d'entrée est parfaitement continue.
- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.

Le récepteur étant équilibré, les tensions de phases  $V_A$ ,  $V_B$  et  $V_C$  ont nécessairement une somme nulle. Pour assurer la continuité des courants alternatifs et éviter le court-circuit de la source, les paires d'interrupteurs ( $S_{A1}$  et  $S_{A2}$ ), ( $S_{B1}$  et  $S_{B2}$ ) et ( $S_{C1}$  et  $S_{C2}$ ) doivent être contrôlées de manière complémentaire.

Les états des interrupteurs, supposés parfaits, sont représentés en théorie par trois grandeurs de commande  $S_K$  ( $k = A, B, C$ ) telles que :

- $S_K = 1$  : l'interrupteur du haut est fermé et par conséquent celui du bas est ouvert.
- $S_K = 0$  : l'interrupteur du haut est ouvert et par conséquent celui du bas est fermé.

La relation entre le vecteur  $[S_A \ S_B \ S_C]^t$  et le vecteur des tensions des lignes  $[U_{AB} \ U_{BC} \ U_{CA}]^t$  est donnée par :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = E \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Si on considère que les tensions sont équilibrées, on peut déduire les expressions des tensions de lignes par rapport aux tensions composées :

$$\begin{cases} V_A = \frac{U_{AB} - U_{CA}}{3} \\ V_B = \frac{U_{BC} - U_{AB}}{3} \\ V_C = \frac{U_{CA} - U_{BC}}{3} \end{cases} \quad (3.2)$$

A partir des équations (3.1) et (3.2), le vecteur des tensions de phase est donné par :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = 1/3 \cdot E \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

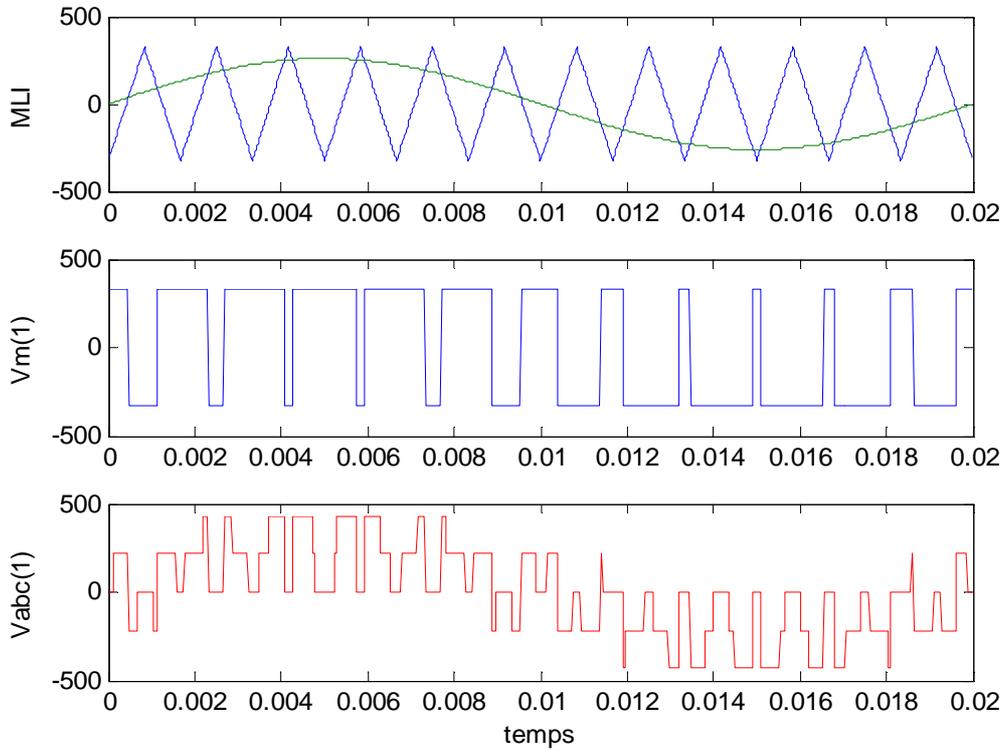
#### 1.1.2.1. Stratégie de commande :

La limitation des valeurs des harmoniques dans la machine asynchrone nécessite le choix d'une bonne stratégie de commande de l'onduleur. Ceci permet d'améliorer les performances du système [25].

On commande l'onduleur par la technique à MLI triangulo-sinusoïdale. Cette dernière présente plusieurs avantages.

- Elle permet de générer les ordres de commande des interrupteurs de manière simple et extrêmement rapide (un processeur peu coûteux est donc suffisant).
- Elle repousse vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie.
- Elle permet d'obtenir un fondamental de tension variable en amplitude et en fréquence.

Le principe de la commande à MLI triangulo-sinusoidale est basé sur la comparaison de trois sinusoides de référence à un signal triangulaire de haute fréquence, dans notre cas, on choisit une porteuse bipolaire avec une amplitude  $U_p$ .



**Fig. 3.3-** Principe de fonctionnement de la MLI triangulo-sinusoidale à une porteuse.

### 1.1.2.2. Algorithme de commande :

On peut définir l'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoidale pour un onduleur à deux niveaux pour un bras  $k$  ( $k= A, B, C$ ) par les deux étapes suivantes [26] :

- Etape 1 :

$$\begin{cases} V_{refK} \geq U_p & \Rightarrow S_K = 1 \\ V_{refK} < U_p & \Rightarrow S_K = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

- Etape 2 :

$$\begin{cases} S_K = 1 & \Rightarrow V_K = \frac{E}{2} \\ S_K = 0 & \Rightarrow V_K = -\frac{E}{2} \end{cases} \quad (3.9)$$

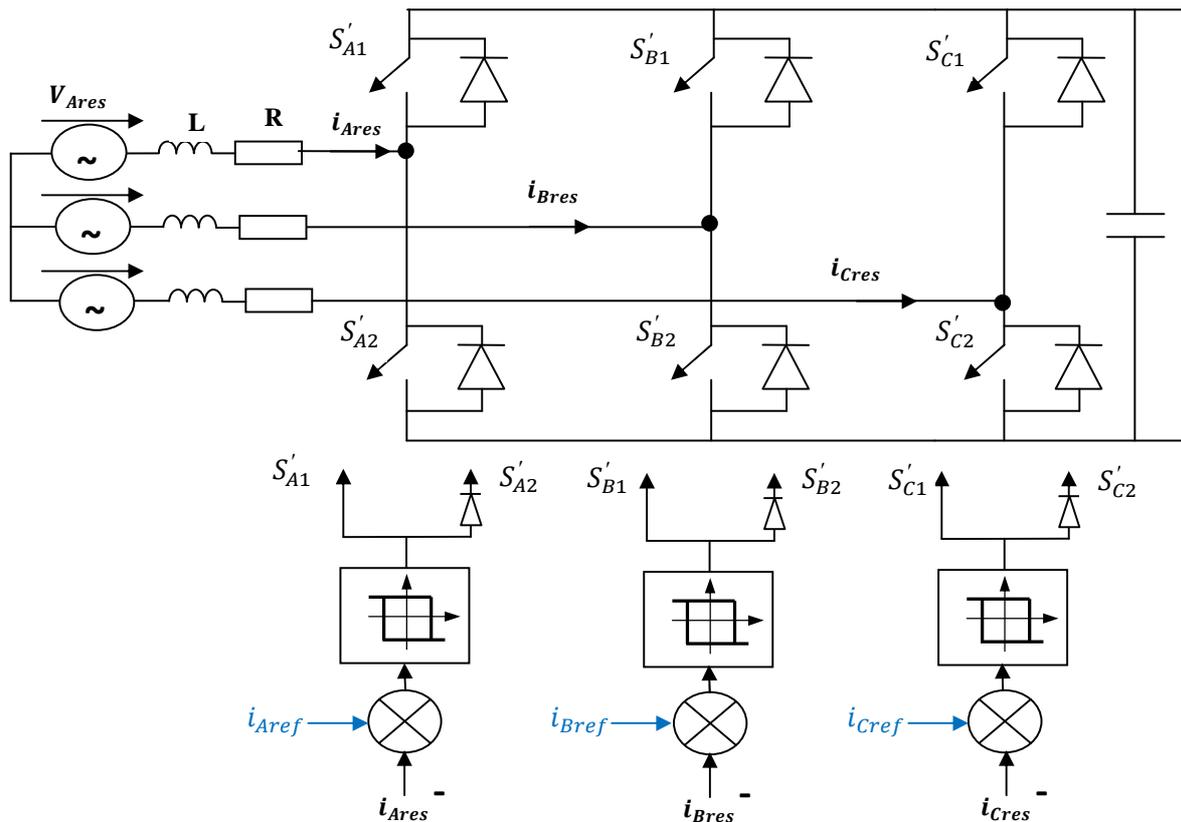
**1.2. Le redresseur à deux niveaux :**

Dans notre étude, nous utilisons un redresseur de courant triphasé commandé avec la MLI à hystérésis. Ce redresseur a la même architecture que celle de l'onduleur étudié précédemment. Son rôle est de fournir une tension continue à partir de la tension alternative du réseau. La commande du redresseur permet le réglage des courants autour de leurs valeurs de référence à l'aide des bascules à hystérésis.

**1.2.1. Modélisation et commande du redresseur à deux niveaux :**

L'inductance du réseau étant faible et mal connue, elle est généralement insuffisante pour atténuer l'ondulation du courant. Il est donc nécessaire d'ajouter une inductance plus importante en série. Cela permet de négliger celle du réseau et de réduire l'effet de ses variations.

On adopte la convention génératrice pour la source de courant et la convention récepteur pour la source de tension. Un tel redresseur est illustré par la figure (3.4).



**Fig. 3.4-** Modèle connaissance et de commande du redresseur de courant triphasé à deux niveaux

Le redresseur étant à deux niveaux, son modèle est identique à celui de l'ondeur étudié précédemment. Les tensions simples sont données par :

$$\begin{bmatrix} V'_A \\ V'_B \\ V'_C \end{bmatrix} = 1/3 \cdot E \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S'_A \\ S'_B \\ S'_C \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Et le courant redressé s'exprime au moyen des fonctions de connexions et des courants triphasés, comme suit :

$$I_{red} = \begin{bmatrix} S'_A & S'_B & S'_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

- **Stratégie de commande:**

On utilise la technique de la MLI à hystérésis pour commander le redresseur. Cette commande présente une bonne dynamique et une implantation simple, il suffit d'utiliser trois bascules à hystérésis, une par bras, où le courant circulant dans la phase raccordée à ce bras est comparé à celui désiré dans cette même phase (**Fig. 3.4**).

Les courants de référence qu'on désire avoir sont :

$$\begin{cases} i_{Aref} = \sqrt{2}I_{eff} \sin(\omega t - \varphi) \\ i_{Bref} = \sqrt{2}I_{eff} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi) \\ i_{Cref} = \sqrt{2}I_{eff} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3} - \varphi) \end{cases} \quad (3.12)$$

Les courants circulant dans les phases du réseau sont donnés par le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} V_{Ares} = V_A + Ri_{Ares} + L \frac{di_{Ares}}{dt} \\ V_{Bres} = V_B + Ri_{Bres} + L \frac{di_{Bres}}{dt} \\ V_{Cres} = V_C + Ri_{Cres} + L \frac{di_{Cres}}{dt} \end{cases} \quad (3.13)$$

L'algorithme de la commande par hystérésis est le suivant :

$$\begin{cases} \text{si : } \varepsilon_K \geq \Delta i & \Rightarrow S_K = 0 \\ \text{si : } \varepsilon_K < \Delta i & \Rightarrow S_K = 1 \end{cases} \quad (3.14)$$

Avec :

$\varepsilon_K$  : l'écart entre le courant de référence et le courant réel pour une phase K

$$\varepsilon_K = i_{Kres} - i_{Kref} \quad \text{avec: } K = A, B, C$$

$\Delta i$  : la largeur de la bande d'hystérésis.

### 1.3. Simulations et interprétations :

Considérons une vitesse du vent de 3.75 m/s, la machine asynchrone tourne alors à une vitesse mécanique de 150 rd/s et subit un couple exercé par la turbine qui vaut 28 N.m (les paramètres de la MAS sont donnés dans l'Annexe 1).

La MAS à cage d'écureuil est connectée à un onduleur triphasé à deux niveaux. Ce dernier est commandé par la MLI triangulo-sinusoïdale à une porteuse avec un indice d'amplitude  $r = 0.8$  et un indice de modulation  $m = 42$ .

Le redresseur triphasé à deux niveaux est commandé par la MLI à hystérésis avec une largeur de bande  $\Delta i = 0.1$  A. Il est connecté au réseau électrique caractérisé par une tension simple de 220V et une fréquence de 50 Hz.

La valeur de référence de la tension du bus continu est fixée à 650V.

Pour illustrer les performances de notre commande, nous avons simulé le fonctionnement du système avec les conditions qui viennent d'être citées. Cette simulation a été réalisée sur le logiciel MATLAB.

Les résultats de simulations (**Fig. 3.5** à **Fig. 3.7**) représentent les grandeurs caractérisant la cascade onduleur-bus continu-redresseur.

On peut voir que la tension aux bornes du condensateur est presque constante (650V) mais qu'elle présente quelques ondulations car la valeur de la capacité reste assez faible pour arriver à éliminer toutes les perturbations. Toutefois, elle permet à la tension du bus continu d'atteindre sa référence en un temps plus court que lorsque la valeur de la capacité est plus élevée. Il y a donc un compromis à faire entre la qualité de la tension du bus continu et la durée du régime transitoire lors du choix de la valeur de la capacité.

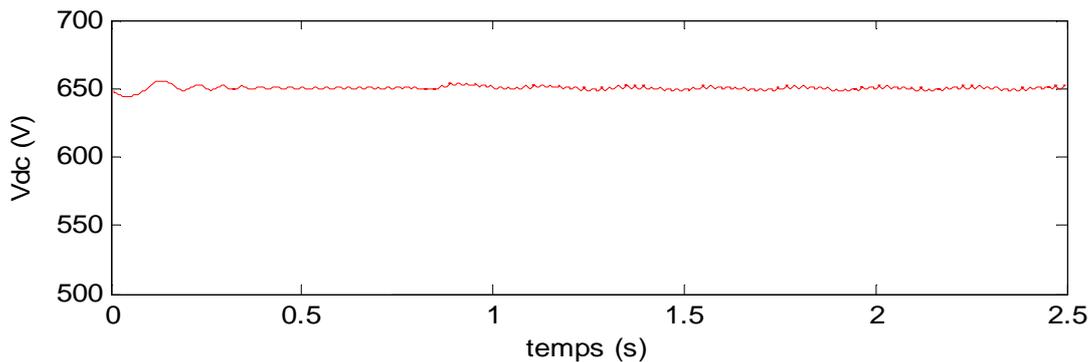
Les grandeurs caractérisant le réseau sont illustrées sur la figure (3.8). On remarque que le courant et la tension d'une phase du réseau sont sinusoïdaux et qu'ils sont en phase mais en

opposition, ce qui montre que la machine asynchrone est bien en fonctionnement générateur (le transfert d'énergie va de la MAS vers le réseau) et que le facteur de puissance du réseau est unitaire.

D'après la figure (3.9), il est constaté que le courant du réseau suit son courant de référence imposé par la commande à hystérésis de courant pour une hystérèse de 0.1A, et il présente de petites oscillations autour du courant de référence, ceci est dû aux commutations des interrupteurs commandés par l'hystérésis de courant.

Les figures (3.10) à (3.12) illustrent les grandeurs caractérisant la MAS. Nous voyons clairement que le courant de la phase statorique est sinusoïdal.

Il est à noter aussi que la vitesse angulaire atteint sa valeur nominale (consigne). On peut également constater que le flux rotorique suit sa référence suivant l'axe « d » avec une composante en quadrature nulle. Ceci nous permet de conclure que le découplage entre le flux et le couple est bien effectué.



**Fig. 3.5-** Tension du bus continu.

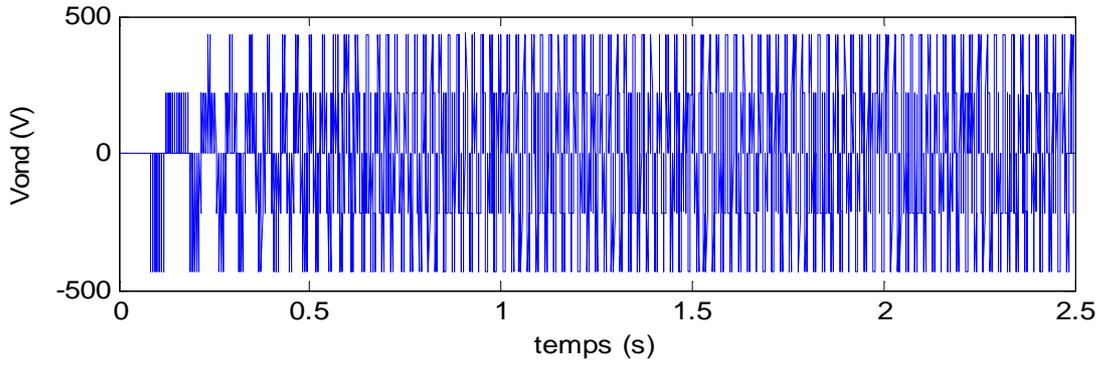


Fig. 3.6- Tension de sortie de l'onduleur.

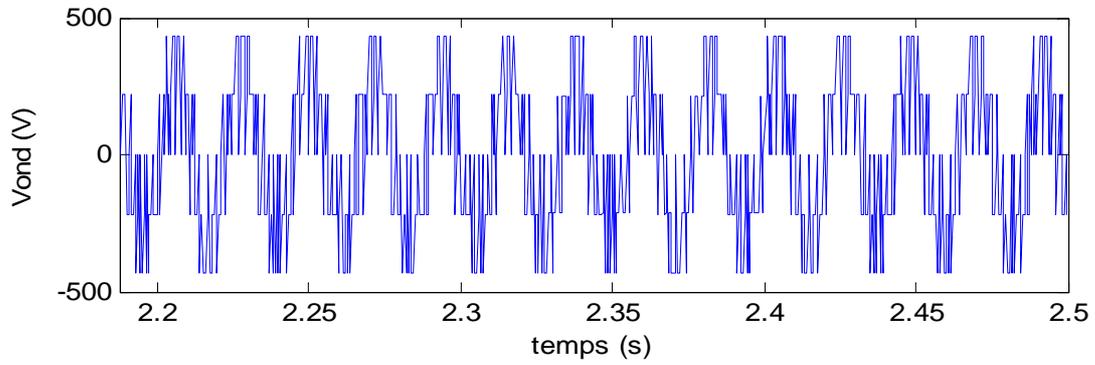


Fig. 3.7- Tension de sortie de l'onduleur avec zoom.

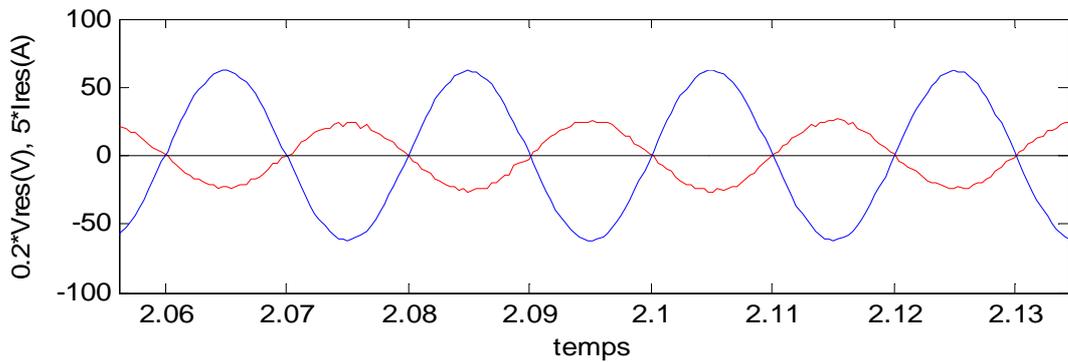
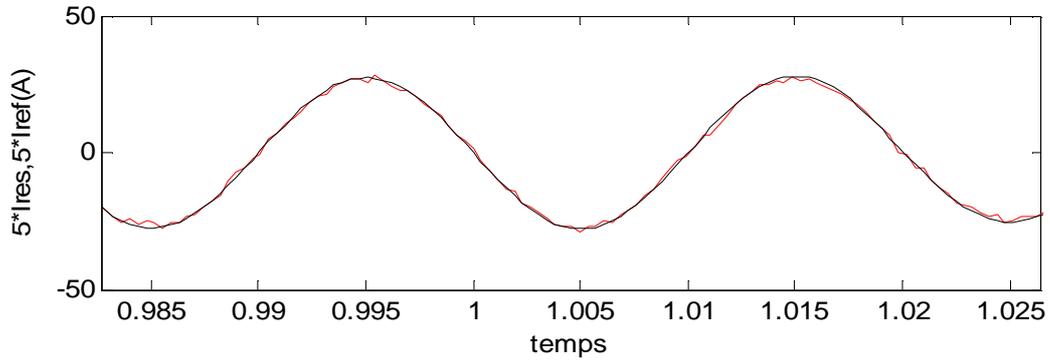
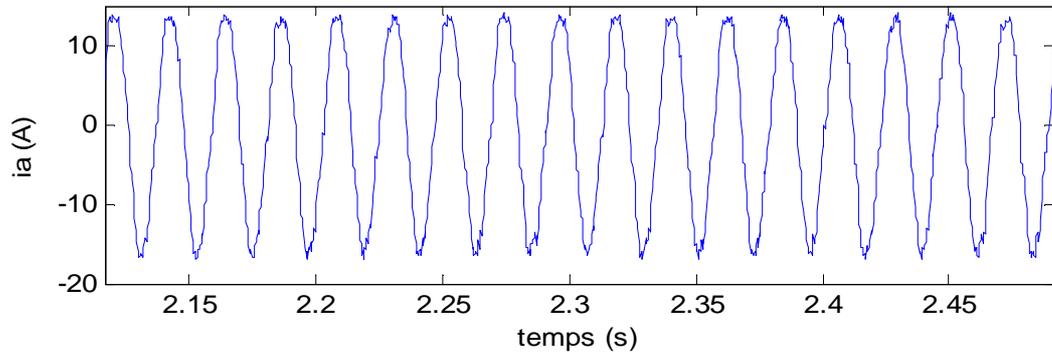


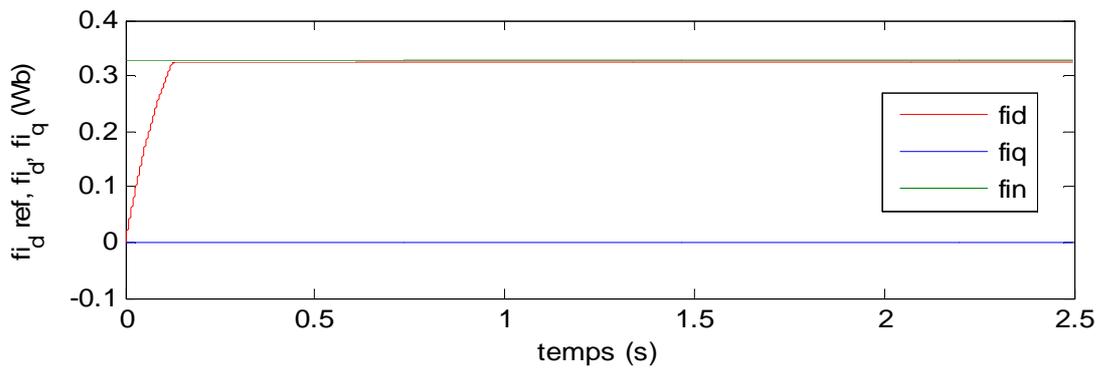
Fig. 3.8- Tension et courant du réseau avec zoom.



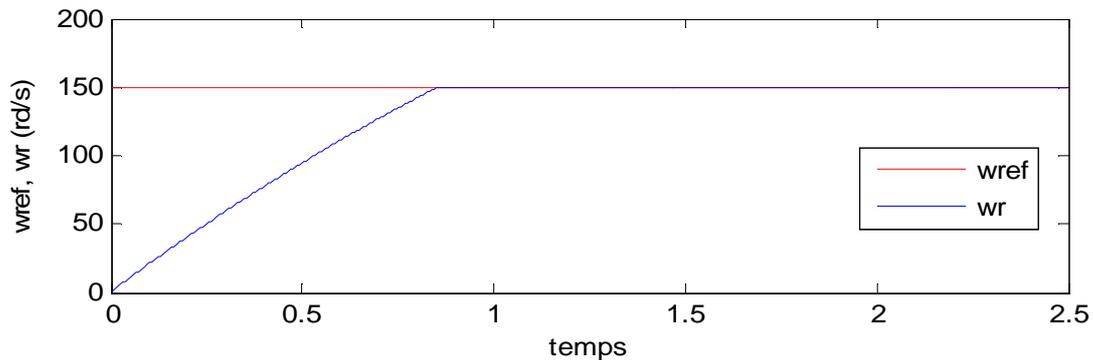
**Fig. 3.9-** Courant du réseau et courant de référence sur deux périodes.



**Fig. 3.10-** Courant de phase de la MAS avec zoom.



**Fig. 3.11-** Flux direct, flux en quadrature et flux de référence.



**Fig. 3.12-** Vitesse de rotation de la machine avec sa référence.

#### 1.4. Robustesse de la régulation :

La robustesse des commandes est un point important, surtout pour les systèmes comportant plusieurs entités en interaction ou les systèmes à forte variation de paramètres. Il en est de même si la mesure des paramètres ne peut s'effectuer avec précision.

##### 1.4.1. Variation des paramètres de la machine :

Dans un système réel, les paramètres de la machines sont soumis à des variations causées par différents phénomènes physiques notamment la saturation et l'échauffement.

Nous allons effectuer des essais (simulations) pour tester la robustesse de notre commande. Ces essais consistent à faire varier les paramètres du modèle de la machine et de voir si la régulation reste dans les limites des contraintes fixées par le cahier de charge.

##### 1.4.1.1. Conditions d'essais :

Afin de faire une analyse objective de la robustesse de la commande, il est impératif de mettre celle-ci dans les conditions les plus défavorables admises par le constructeur [27]. Pour cela, nous allons augmenter les résistances et diminuer les inductances de 50% pour simuler les effets respectifs de l'échauffement et de la saturation.

En raison des relations qui lient les différentes inductances, il est nécessaire de procéder à leur diminution de manière identique.

- Essai 1 : La résistance statorique augmente de 25% et la résistance rotorique de 50%.
- Essai 2 : Les inductances diminuent de 15%.
- Essai 3 : Les inductances diminuent de 40%.

#### 1.4.1.2. Résultats et interprétations :

Lors des variations des résistances statorique et rotorique (**Fig. 3.13**), nous n'avons constaté aucun effet sur le suivi des consignes et cela pour des augmentations qui peuvent atteindre jusqu'à 50% pour la valeur de la résistance rotorique et 25% pour celle de la résistance statorique. Ce qui montre la robustesse du système durant l'échauffement.

Pour une diminution des inductances jusqu'à 15%, on n'observe aucune variation dans les résultats de simulation (**Fig. 3.14**), le système est donc robuste durant la saturation.

Dans le cas d'une variation des inductances de 40% (**Fig. 3.15**), une erreur statique apparaît dans le suivi de la consigne de la composante directe du flux rotorique. Celle-ci est due à la forte diminution des inductances qui fausse l'estimation du flux rotorique à partir des courants.

Cette erreur apparaît dans la composante directe du flux rotorique mais pas dans la vitesse de rotation de la machine en raison du changement avec la même proportion de l'inductance cyclique mutuelle et de l'inductance cyclique statorique. Ce changement garde le rapport  $L_m/L_r/T_r$  constant et par conséquent n'a pas d'influence sur le résultat de la relation (2.15) qui estime  $\omega_s$  à partir de  $I_{qs}$ . Si le changement n'avait pas été réalisé avec les mêmes proportions, le rapport  $L_m/L_r/T_r$  aurait été modifié et donc l'estimation de  $\omega_s$  faussée.

Malgré l'erreur qui apparaît au niveau du flux rotorique, on ne remarque aucun impact sur le suivi des consignes des autres caractéristiques. Le système demeure donc robuste même pour une diminution de 50% des inductances.

#### 1.1.1. Variation des paramètres du réseau :

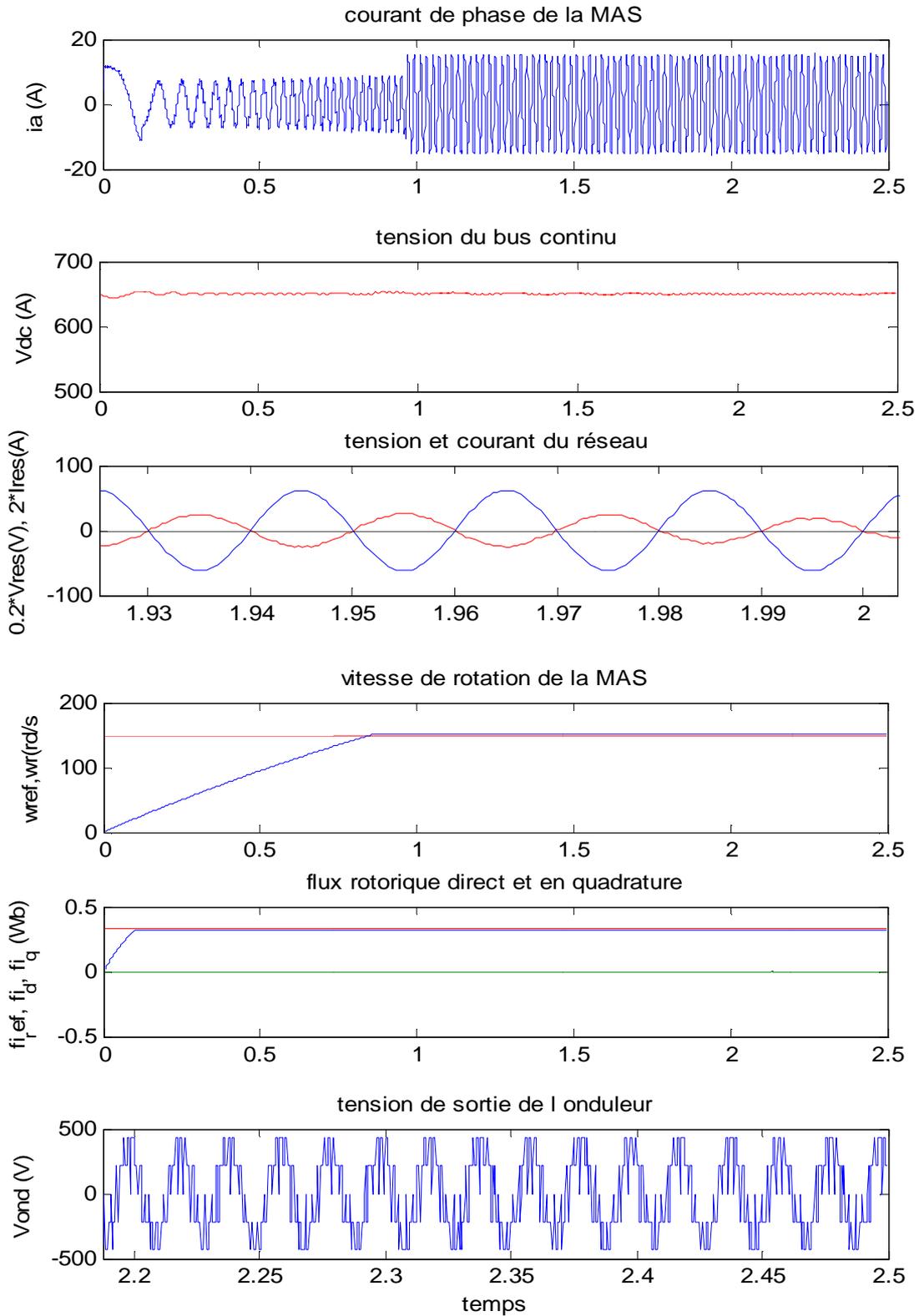
Nous voulons tester le système de conversion d'énergie connecté au réseau pour une chute de tension. Pour cela, nous allons réduire la tension du réseau de 50% pendant 200 ms, à  $t=1$  s.

### 1.1.1.1. Résultats et interprétations :

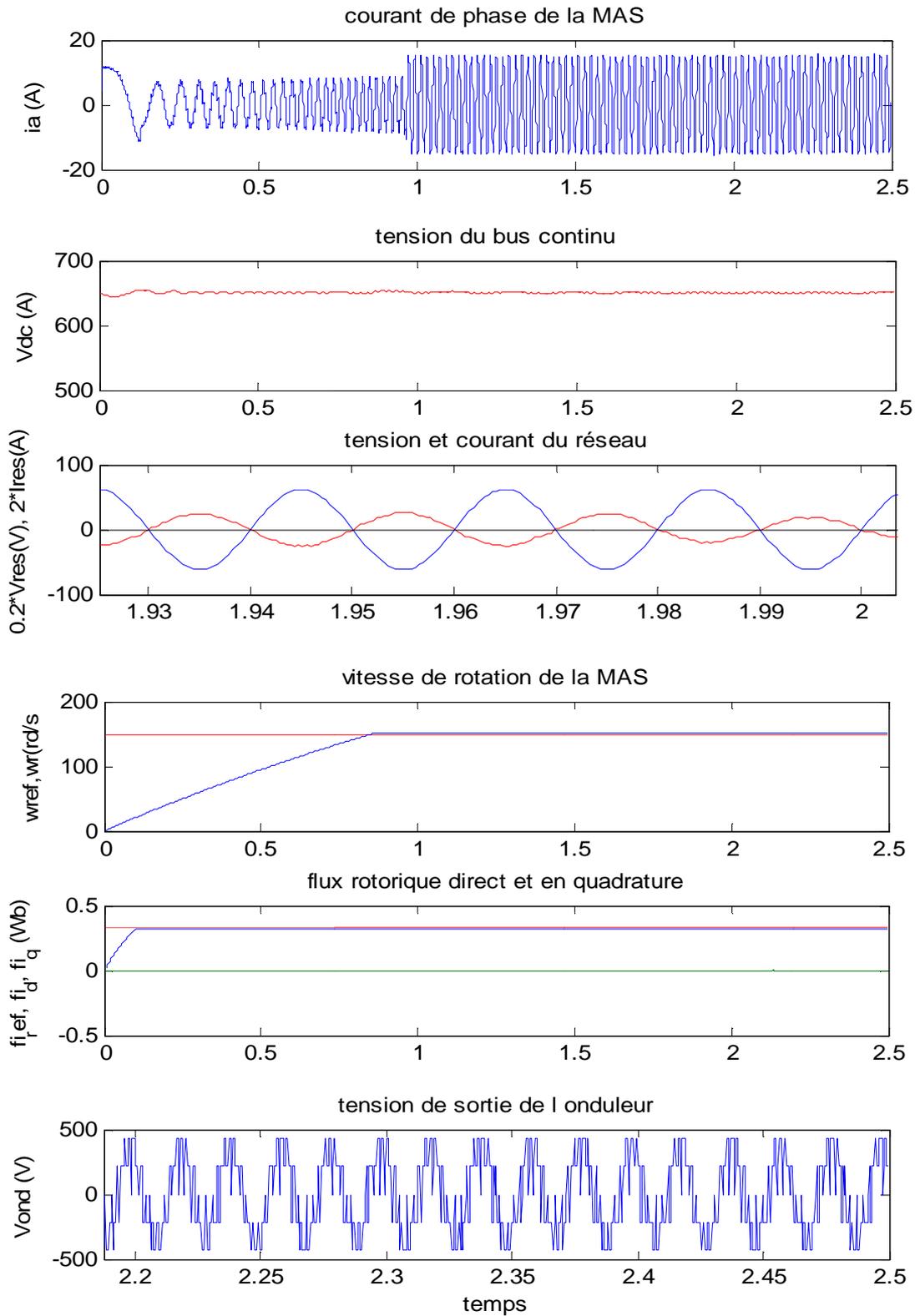
Dans la figure (3.16), le second graphe représente la tension du bus continu  $V_{dc}$ . On peut voir que durant les 200 ms de la chute de tension au niveau du réseau, on assure toujours le maintien de celle-ci autour de sa valeur de consigne, soit 650V.

De plus, on n'observe aucune variation pour le suivi des consignes des autres caractéristiques, ce qui montre le découplage parfait entre le générateur et le réseau ; la machine ne sent pas qu'il y a une chute de tension.

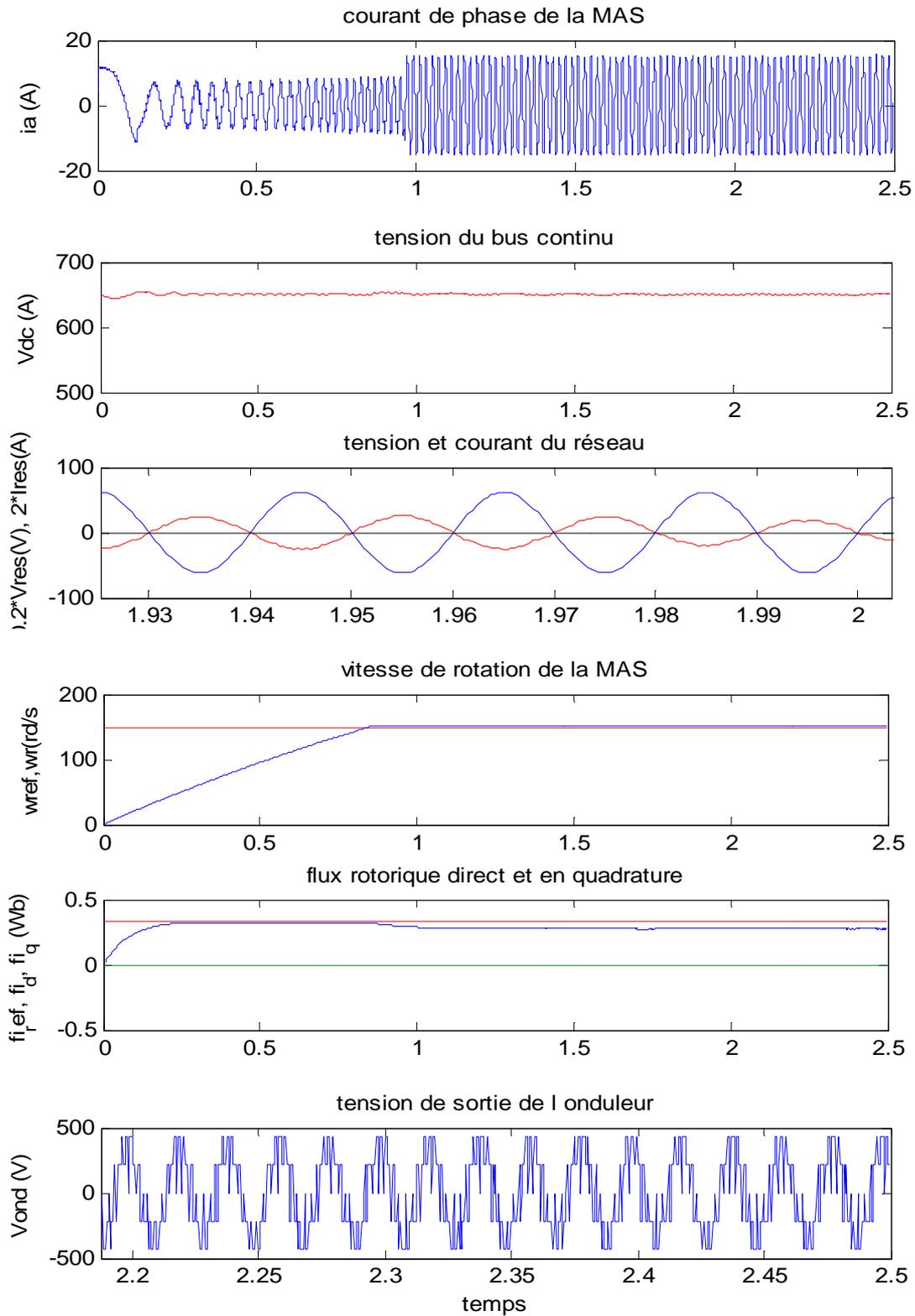
La tension du bus continu est un résultat très représentatif, il montre la robustesse du système pour une réduction de 50% de la tension du réseau. Ce ci est une caractéristique très désirable durant de fortes chutes de tension.



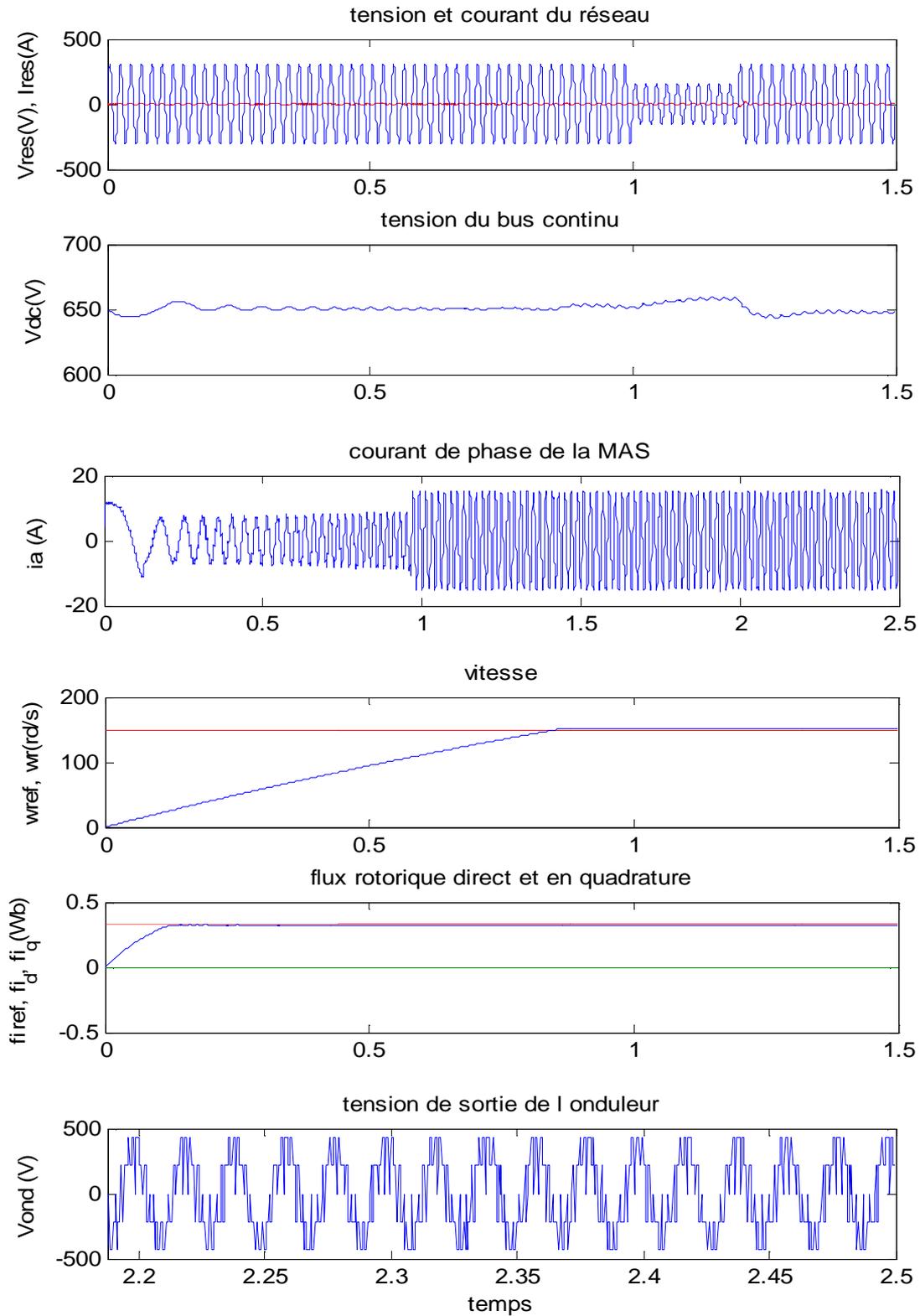
**Fig. 3.13** -Test de robustesse avec augmentation de la résistance statorique de 25% et de la résistance rotorique de 50%



**Fig. 3.14-** Test de robustesse avec diminution des inductances de 15%.



**Fig. 3.15-** Test de robustesse avec diminution des inductances de 40%.



**Fig. 3.16-** Test de performance avec une réduction de 50% de la tension du réseau.

## 2. Onduleur-redresseur à trois niveaux :

### 2.1. Onduleur à trois niveaux :

#### 2.1.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux :

Plusieurs structures sont possibles pour réaliser un onduleur triphasé à trois niveaux. Nous avons choisit d'étudier la structure NPC (Neutral Point Clamped) c'est-à-dire une structure à point milieu.

Les études faites sur les onduleurs triphasés à trois niveaux à structure NPC ont montré que l'onduleur à trois niveaux peut être considéré comme l'association de deux onduleurs à deux niveaux [28].

Cette structure est représentée sur la figure (3.17). Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série ( $C1$  et  $C2$ ), formant un point milieu noté ( $O$ ) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux. La tension totale du bus continu vaut  $E$  ; dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension  $E/2$  à leurs bornes : c'est l'hypothèse que l'on retiendra par la suite.

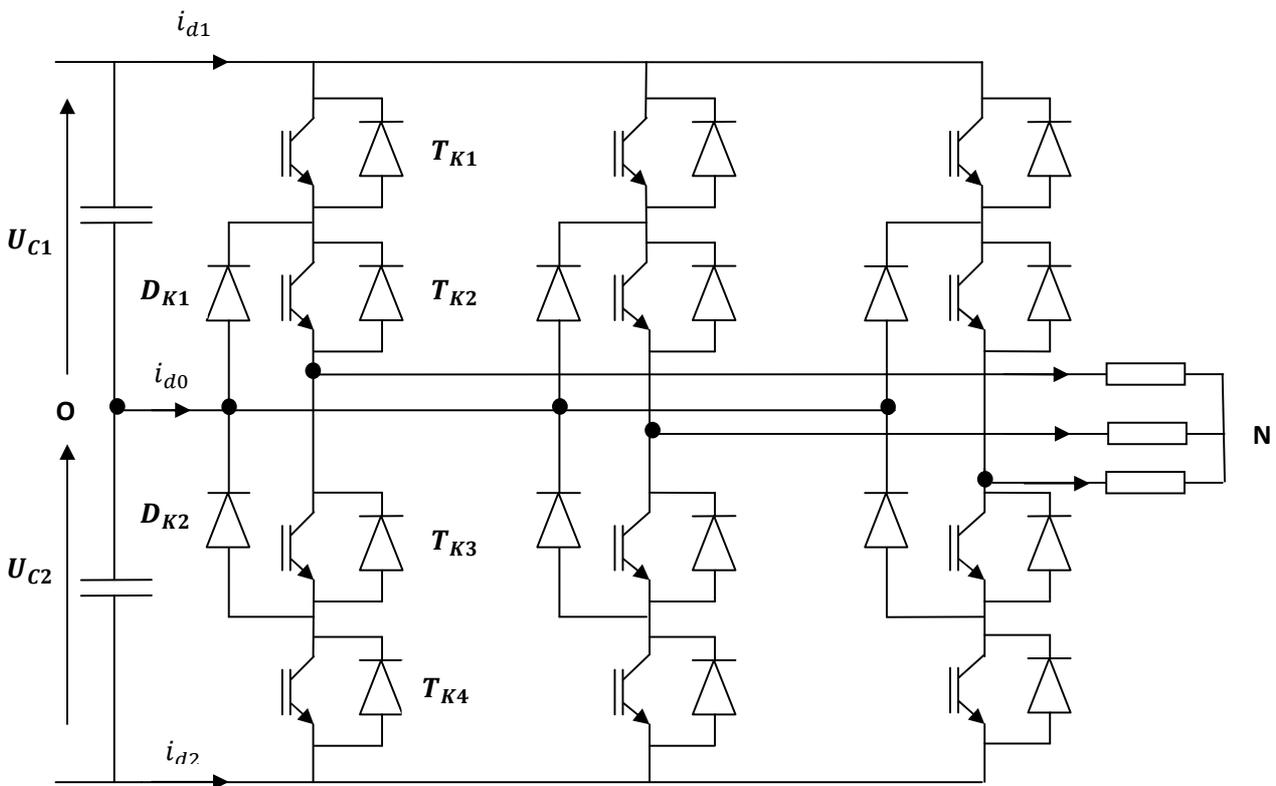
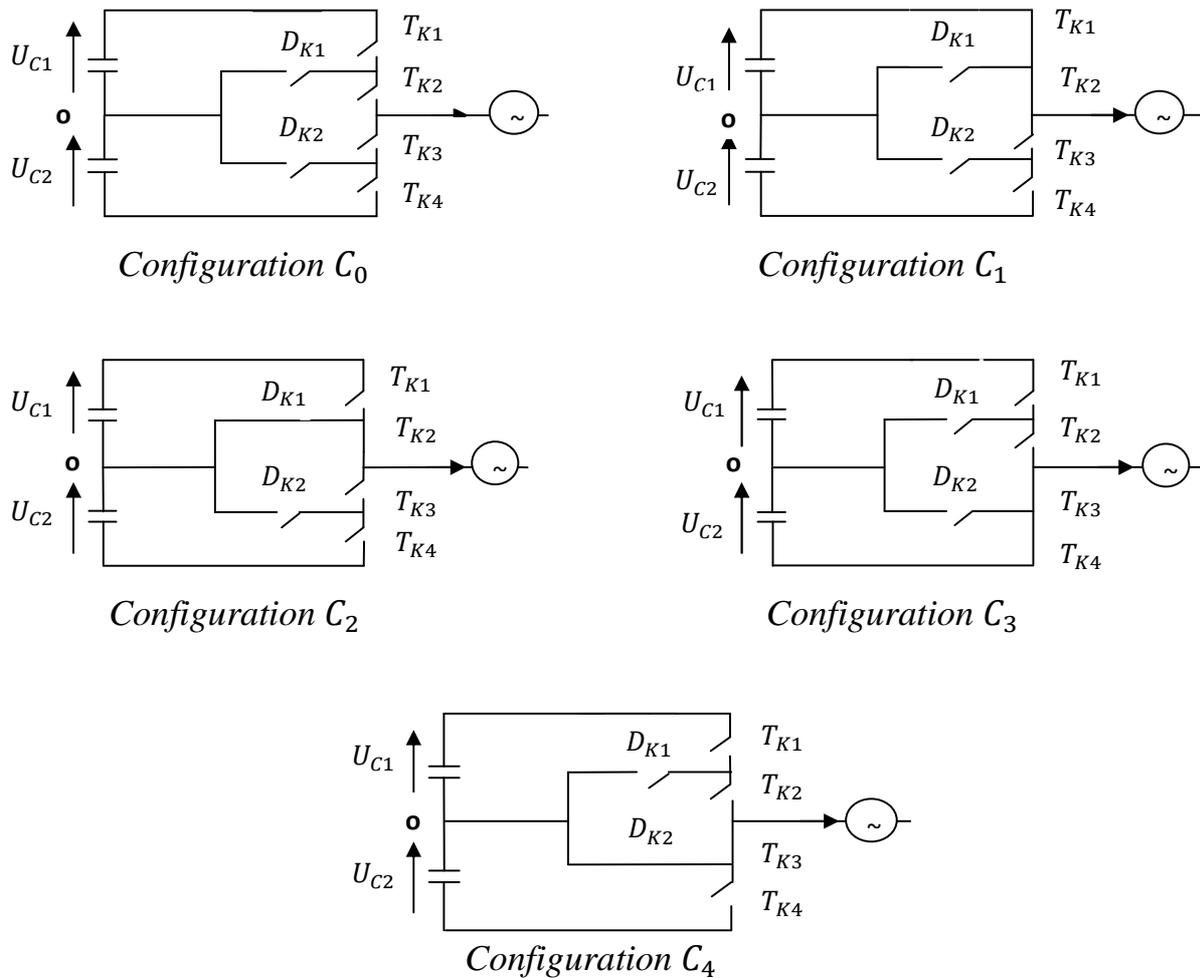


Fig. 3.17- Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux à structure NPC.

Chacun des trois bras (A, B, C) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés ( $D_{A1}, D_{A2}, D_{A3}, D_{A4}$  pour le bras A) et deux diodes  $D_{K1}$  et  $D_{K2}$  connectées au point milieu du bus continu et permettant l'obtention du zéro de la tension  $V_{KO}$ . Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

**2.1.2. Fonctionnement d'un bras d'onduleur à trois niveaux :**

En fonction de la commutation des interrupteurs, chaque tension simple ( $V_{AO}, V_{BO}, V_{CO}$ ) entre une phase (A, B ou C) et le point milieu (O) du bus continu peut prendre les valeurs  $U_{c1}, 0, -U_{c2}$ . Ainsi un bras de l'onduleur définit cinq configurations possibles. Ces différentes configurations sont représentées par la figure (3.18). Le tableau (3.2) donne les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations.



**Fig. 3.18-** Les différentes configurations d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.

Configuration	Grandeur électrique qui la caractérise
$C_0$	$I_K = 0$
$C_1$	$V_{KO} = U_{c1}$
$C_2$	$V_{KO} = 0$
$C_3$	$V_{KO} = -U_{c2}$
$C_4$	$V_{KO} = 0$

**Tab. 3.1-** Grandeurs électriques caractérisant chaque configuration possible d'un bras k.

### 2.1.3. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux :

#### 2.1.3.1. Commandabilité de l'onduleur à trois niveaux :

De même que pour l'onduleur à deux niveaux, l'ouverture ou la fermeture des interrupteurs dépend de :

- La commande externe (l'ordre d'amorçage ou de blocage des semi-conducteurs  $T_{KS}$ ).
- La commande interne (grandeurs électriques).

Dans le cadre de notre étude, la condition de Commandabilité implique que les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe et non plus des commandes internes, donc le convertisseur est dit en mode commandable et par la suite on a une conduction continue de ce convertisseur.

Nous supposons par la suite que cette condition est toujours vérifiée. De ce fait, on peut définir les fonctions de connexion en utilisant les hypothèses suivantes :

- La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est supposée faible (négligeable devant  $E$ ).
- La charge est triphasée, couplée en étoile avec neutre isolé, alors on a :

$$\begin{cases} V_A + V_B + V_C = 0 \\ i_A + i_B + i_C = 0 \end{cases} \quad (3.15)$$

Avec :

$V_A, V_B, V_C$  : Les tensions alternatives simples à la sortie de l'onduleur.

$i_A, i_B, i_C$  : Les courants à la sortie de l'onduleur.

Pour éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui peut engendrer leur destruction par croissance du courant lors du court-circuit, ou une surtension dans le cas de l'ouverture de tous les interrupteurs, on définit la commande complémentaire suivante :

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases} \quad (3.16)$$

Avec :  $B_{KS}$ , le signal de la commande du transistor  $T_{KS}$  du bras K.

Le tableau (3.3) représente la table d'excitation qui correspond à cette commande complémentaire.

$T_{K1}$	$T_{K2}$	$T_{K3}$	$T_{K4}$	$V_{KO}$
0	0	1	1	$-U_{c2}$
0	1	0	1	Inconnue
1	0	1	0	0
1	1	0	0	$U_{c1}$

**Tab. 3.2-** Table d'excitation caractérisant la commande complémentaire utilisée.

### 2.1.3.2. Fonctions de connexion :

#### 2.1.3.2.1. Fonctions de connexion des interrupteurs :

On définit la fonction de connexion de chaque interrupteur  $T_{KS}$  comme étant une fonction qui décrit l'état ouvert ou fermé de celui-ci.

$$\begin{cases} F_{KS} = 1 & \text{si } T_{KS} \text{ est fermé} \\ F_{KS} = 0 & \text{si } T_{KS} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (3.17)$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras K, on trouve :

$$\begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases} \quad (3.18)$$

La commande complémentaire est exprimée pour les trois bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{11} = 1 - F_{14} & F_{21} = 1 - F_{24} & F_{31} = 1 - F_{34} \\ F_{12} = 1 - F_{13} & F_{22} = 1 - F_{23} & F_{32} = 1 - F_{33} \end{cases}$$

### 2.1.3.2.2. Fonctions de connexion des demi-bras :

La fonction de connexion  $F_{Km}^b$  est associée au demi bras  $m$  avec  $m = 1$  pour le demi bras du haut et  $m = 0$  pour le demi bras du bas.

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{K1}^b = F_{K1} \cdot F_{K2} \\ F_{K0}^b = F_{K3} \cdot F_{K4} \end{cases} \quad (3.19)$$

### 2.1.3.3. Fonctions de conversion :

Pour l'onduleur à trois niveaux, les potentiels des nœuds A, B et C par rapport au point milieu O s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs et des tensions d'entrée comme suit :

$$\begin{cases} V_{AO} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{c1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{c2} \\ V_{BO} = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{c1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{c2} \\ V_{CO} = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{c1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{c2} \end{cases} \quad (3.20)$$

En introduisant les fonctions de connexion des demi-bras, on obtient :

$$\begin{cases} V_{AO} = F_{11}^b \cdot U_{c1} - F_{10}^b \cdot U_{c2} \\ V_{BO} = F_{21}^b \cdot U_{c1} - F_{20}^b \cdot U_{c2} \\ V_{CO} = F_{31}^b \cdot U_{c1} - F_{30}^b \cdot U_{c2} \end{cases} \quad (3.21)$$

Les tensions composées sont données par le système suivant :

$$\begin{cases} U_{AB} = V_{AO} - V_{BO} \\ U_{BC} = V_{BO} - V_{CO} \\ U_{CA} = V_{CO} - V_{AO} \end{cases} \quad (3.22)$$

En utilisant la relation (3.21), le système (3.22) se met sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad (3.23)$$

En utilisant les relations (3.2) et (3.19), les tensions simples sont données par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad (3.24)$$

Les courants d'entrée  $i_{d1}$  et  $i_{d2}$  de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment en fonction des courants de charge comme suit :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11} \cdot F_{12} \cdot i_A + F_{21} \cdot F_{22} \cdot i_B + F_{31} \cdot F_{32} \cdot i_C \\ i_{d2} = F_{13} \cdot F_{14} \cdot i_A + F_{23} \cdot F_{24} \cdot i_B + F_{33} \cdot F_{34} \cdot i_C \end{cases} \quad (3.25)$$

D'où :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_A + F_{21}^b \cdot i_B + F_{31}^b \cdot i_C \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_A + F_{20}^b \cdot i_B + F_{30}^b \cdot i_C \end{cases} \quad (3.26)$$

Le courant  $i_{d0}$  est lié aux courants de la charge tel que :

$$i_{d0} = F_{11} \cdot F_{13} \cdot i_A + F_{21} \cdot F_{23} \cdot i_B + F_{31} \cdot F_{33} \cdot i_C \quad (3.27)$$

A partir des relations (3.26) et (3.27) on peut déduire que  $i_{d0}$  s'écrit sous la forme suivante :

$$i_{d0} = i_A + i_B + i_C - i_{d1} - i_{d2} \quad (3.28)$$

D'où :

$$i_{d0} = (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) \cdot i_A + (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) \cdot i_B + (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \cdot i_C \quad (3.29)$$

#### 2.1.4. Représentation vectorielle des états en $(\alpha, \beta)$ :

On symbolisera les différents états des configurations par la notation 1, 0 ou -1 correspondant respectivement aux niveaux de la tension  $E/2$ , 0,  $-E/2$  du bras  $V_{KO}$ .

Chacun des trois bras de l'onduleur pouvant prendre indépendamment les trois états 1, 0 ou -1, l'ensemble des possibilités pour l'onduleur complet s'élève à  $3^3$ , soit 27 états. Ceux-ci sont répertoriés dans le tableau (3.3).

Ainsi, les 27 états définis dans le tableau (3.3) imposent des tensions  $V_A$ ,  $V_B$  et  $V_C$  qui ne sont pas indépendantes. Dès lors, ces états peuvent se représenter dans un espace à seulement deux dimensions à l'aide de la transformation de Concordia. C'est ainsi qu'est construit le diagramme vectoriel classique de la figure (3.19).

Comme pour l'onduleur à deux niveaux, l'onduleur à trois niveaux ne peut fournir de façon exacte et instantanée que des tensions de type  $(V)_i$  avec  $(i=1, \dots, 27)$ . Les tensions qu'il génère peuvent être lues par projection sur les deux axes  $\alpha$  et  $\beta$ .

Etats des bras								
A	B	C	A	B	C	A	B	C
1	1	1	0	1	1	-1	1	1
1	1	0	0	1	0	-1	1	0
1	1	-1	0	1	-1	-1	1	-1
1	0	1	0	0	1	-1	0	1
1	0	0	0	0	0	-1	0	0
1	0	-1	0	0	-1	-1	0	-1
1	-1	1	0	-1	1	-1	-1	1
1	-1	0	0	-1	0	-1	-1	0
1	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1

Tab. 3.3- Etats possibles de l'onduleur NPC.

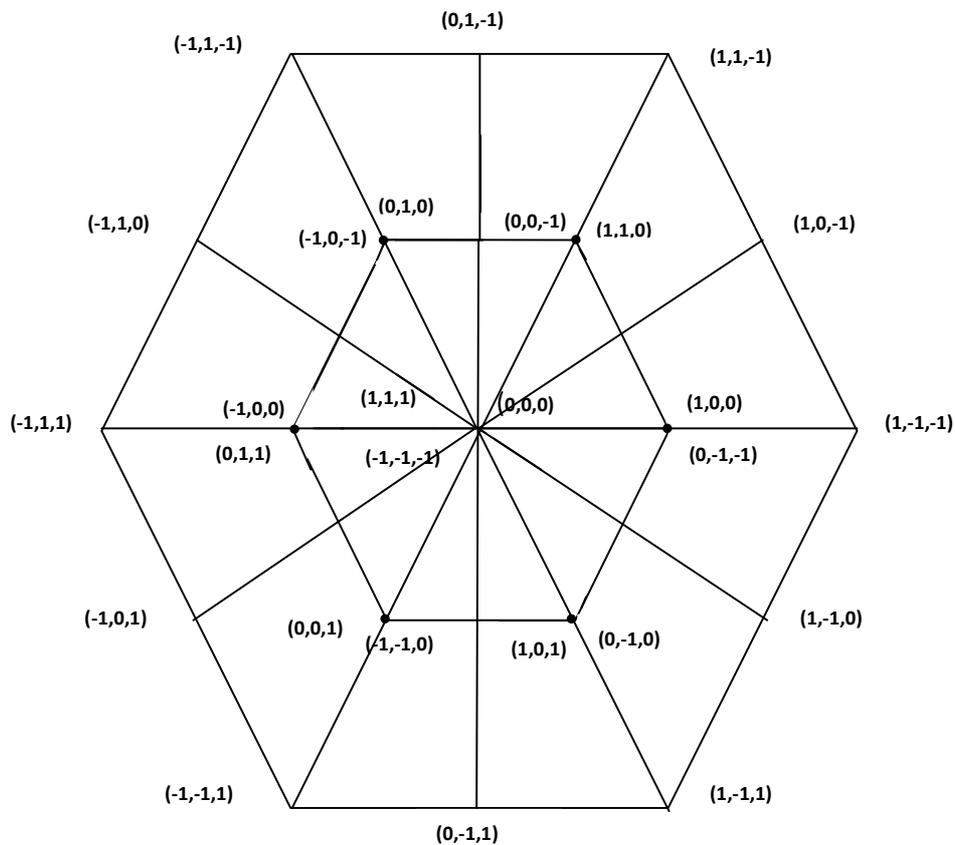
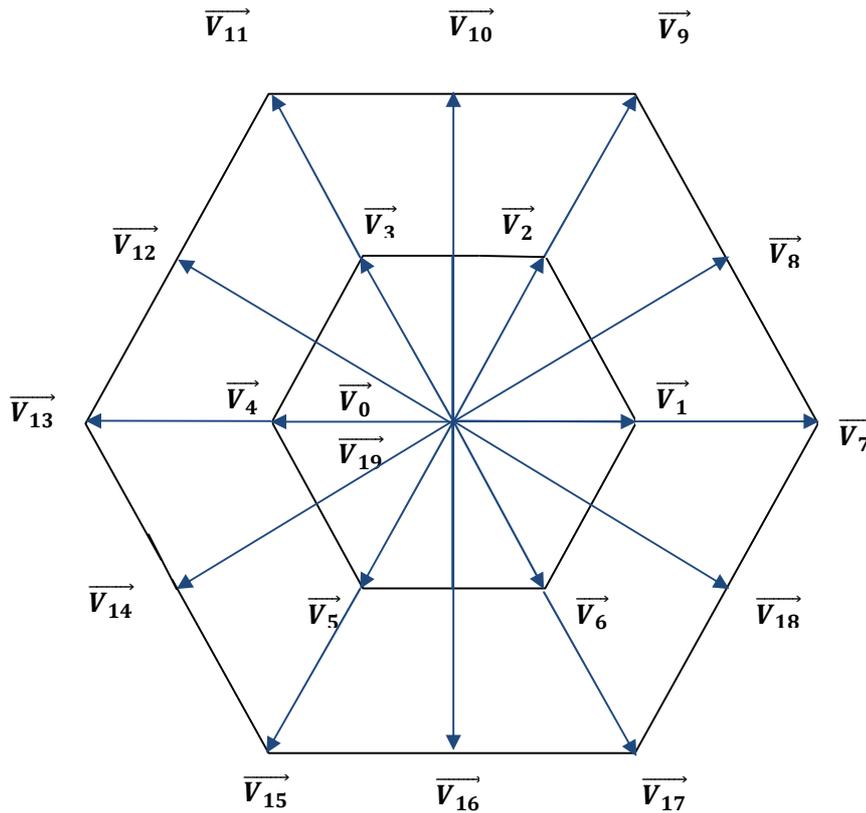


Fig. 3.19- Représentation vectorielle des états de l'onduleur NPC.

Mais, on constate que seuls 19 vecteurs sont formés par les 27 états de l'onduleur. Cela est dû aux redondances d'états qui apparaissent près du centre de la figure (3.20) ; le vecteur  $\vec{V}_1$  par exemple, peut être construit à partir de deux états différents (1, 0, 0) ou (0, -1, -1). De la même manière, tous les vecteurs situés sur l'hexagone intérieur de la figure (de  $\vec{V}_1$  à  $\vec{V}_6$ ) peuvent être obtenus par deux états distincts, qui sont représentés dans les deux séries suivantes :

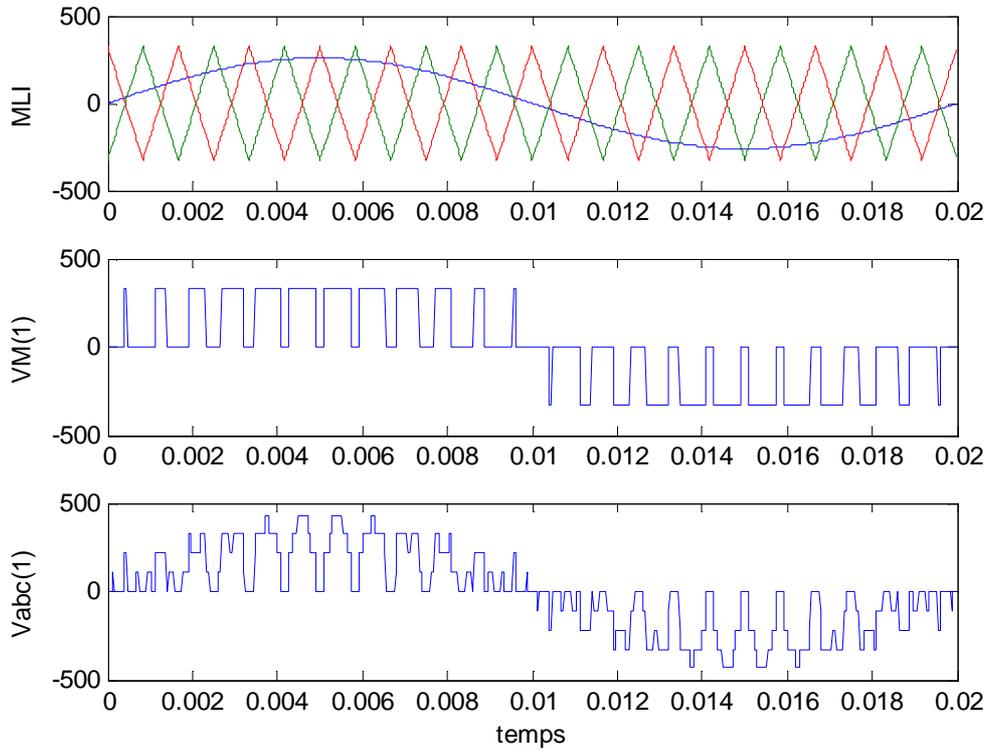


**Fig. 3.20-** Les 19 vecteurs formés par les états de l'onduleur.

L'utilisation adéquate des états redondants permet de réguler le point milieu capacitif du bus continu et d'avoir un équilibre de charges des deux condensateurs. Quand l'onduleur délivre une tension qui correspond à un vecteur de l'hexagone intérieur, les tensions des deux condensateurs sont comparées. Si la valeur absolue de la tension du condensateur supérieur est supérieure à celle du condensateur inférieur, cela veut dire que cette tension est obtenue à partir d'un état de commutation de la première série {1 1 0 , 1 0 1 , 1 0 0 , 0 1 1 , 0 1 0 , 0 0 1}, sinon, elle sera obtenue à partir de son état redondant donné dans la deuxième série {0 0 -1 , 0 -1 0 , 0 -1 -1, -1 0 0, -1 0 -1, -1 -1 0}.

### 2.1.5. Stratégie de commande :

Pour l'onduleur à trois niveaux, nous allons utiliser la technique à MLI à deux porteuses en dents de scie unipolaires (**Fig. 3.21**).



**Fig. 3.21-** Principe de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses.

L'algorithme de commande de la stratégie triangulo-sinusoidale à deux porteuses de l'onduleur à trois niveaux pour un bras K peut être résumé en deux étapes :

- Détermination des signaux intermédiaire  $V_{K1}$  et  $V_{K2}$  :

$$\begin{cases} V_{refK} \geq U_{P1} \Rightarrow V_{K1} = U_{c1} \\ V_{refK} < U_{P1} \Rightarrow V_{K1} = 0 \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\begin{cases} V_{refK} \geq U_{P2} \Rightarrow V_{K2} = 0 \\ V_{refK} < U_{P2} \Rightarrow V_{K2} = -U_{c2} \end{cases} \quad (3.31)$$

Avec :  $U_{c1} = U_{c2} = E/2$

- Détermination du signal  $V_{K0}$  :

$$V_{K0} = V_{K1} + V_{K2} \quad (3.32)$$

Les ordres de commande  $B_{KS}$  des interrupteurs sont déduits comme suit :

$$\begin{cases} V_{K0} = U_{c1} & \Rightarrow B_{K1} = 1, B_{K2} = 1 \\ V_{K0} = -U_{c2} & \Rightarrow B_{K1} = 0, B_{K2} = 0 \\ V_{K0} = 0 & \Rightarrow B_{K1} = 1, B_{K2} = 0 \end{cases} \quad (3.33)$$

La génération des impulsions de commande des interrupteurs du bras K est également représentée par la figure (3.21).

## 2.2. Redresseur à trois niveaux :

La structure de l'onduleur à trois niveaux est réversible par sa conception. Ceci lui permet aussi de fonctionner en redresseur.

Pour commander le redresseur à trois niveaux, nous choisirons la stratégie de commande par hystérésis qui a le même principe que celle utilisée pour le redresseur à deux niveaux et dont l'algorithme de commande est le suivant :

$$\begin{cases} [(\varepsilon_K \geq \Delta i) \& (\varepsilon_K \leq 2. \Delta i)] \text{ or } [(\varepsilon_K \leq -\Delta i) \& (\varepsilon_K \geq -2. \Delta i)] & \Rightarrow B_{K1} = 1 \& B_{K2} = 0 \\ \varepsilon_K > 2. \Delta i & \Rightarrow B_{K1} = 0 \& B_{K2} = 0 \\ \varepsilon_K < -2. \Delta i & \Rightarrow B_{K1} = 1 \& B_{K2} = 1 \end{cases} \quad (3.34)$$

Avec :

$\varepsilon_K$  : l'écart entre le courant de référence  $i_{refK}$  et le courant réel  $i_{resK}$  tel que :

$$\varepsilon_K = i_{Kres} - i_{Kref} \quad \text{avec : } K = A, B, C$$

$\Delta i$  : largeur de la bande d'hystérésis.

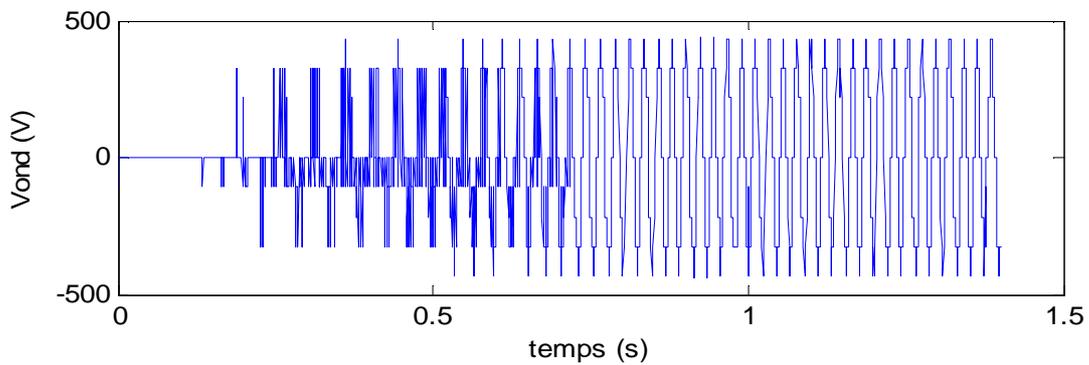
## 2.3. Simulations et interprétations :

Nous avons simulé le fonctionnement de ce système sur le logiciel MATLAB, sous les mêmes conditions précédentes. Mais cette fois-ci, l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux est commandé par une MLI triangulo-sinusoïdale à deux porteuses.

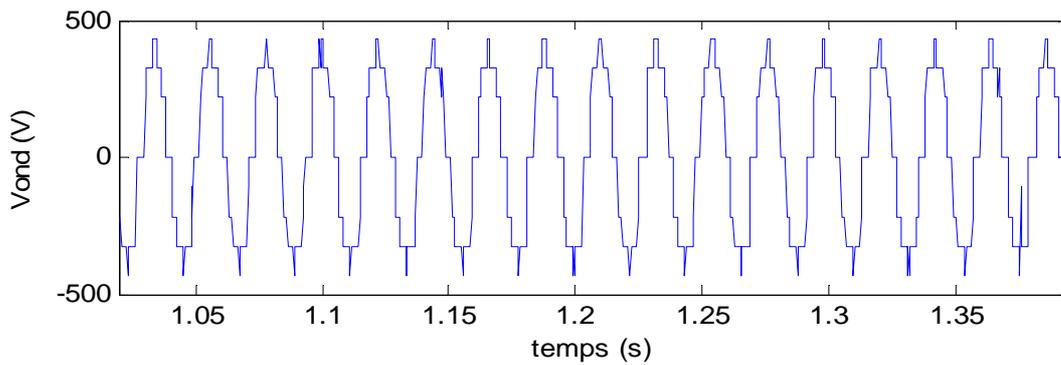
Les résultats de simulations (**Fig3.22** à **Fig3.25**), représentent les grandeurs caractérisant la cascade onduleur-bus continu-redresseur.

D'après l'évolution obtenue de  $U_{c1}$  et  $-U_{c2}$ , les tensions  $U_{c1}$  et  $U_{c2}$  sont très proches et elles suivent leur référence  $E/2$ , et leur différence présente une valeur nulle ce qui montre qu'on a bien assuré l'équilibre de charges des deux condensateurs. Leur somme qui est représentée juste au dessus suit également sa référence qu'on a fixée à 650V.

En ce qui concerne les grandeurs caractérisant la MAS (**Fig3.27** à **Fig3.29**), et celles caractérisant le réseau (**Fig. 3.26**), elles restent inchangées comparées à celles obtenues lorsque les convertisseurs utilisés sont à deux niveaux.



**Fig. 3.22-** La tension de sortie de l'ondeur.



**Fig. 3.23-** La tension de sortie de l'ondeur avec zoom.

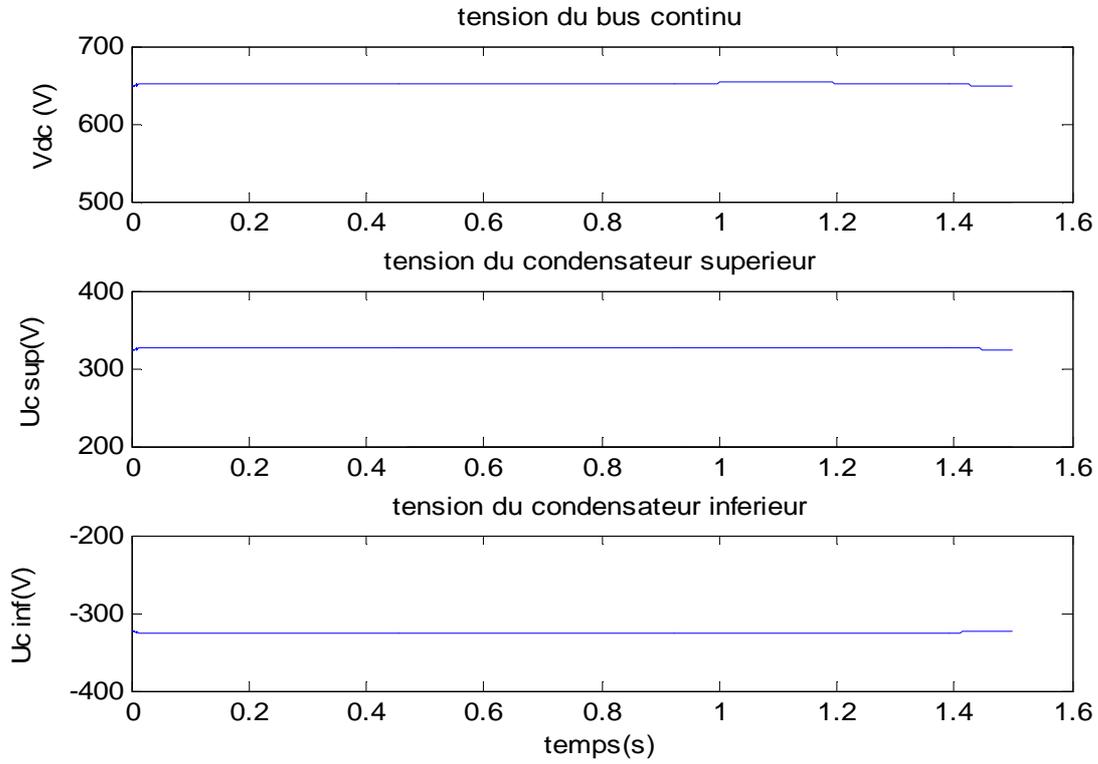


Fig. 3.24- La tension du bus continu.

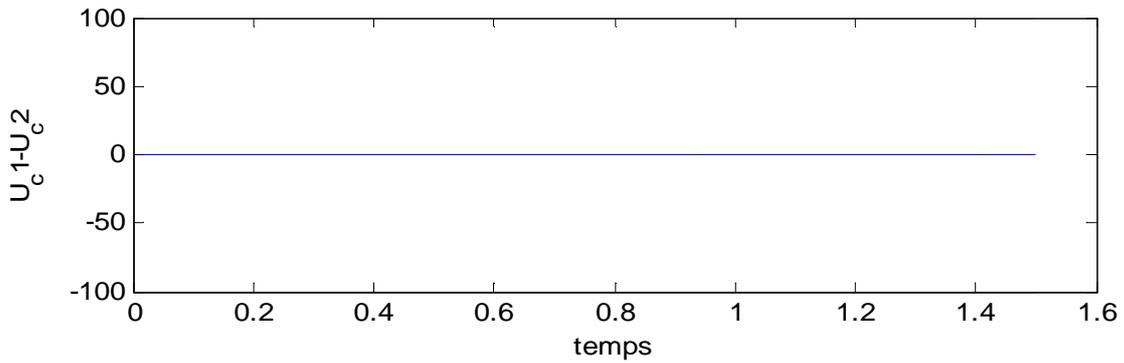
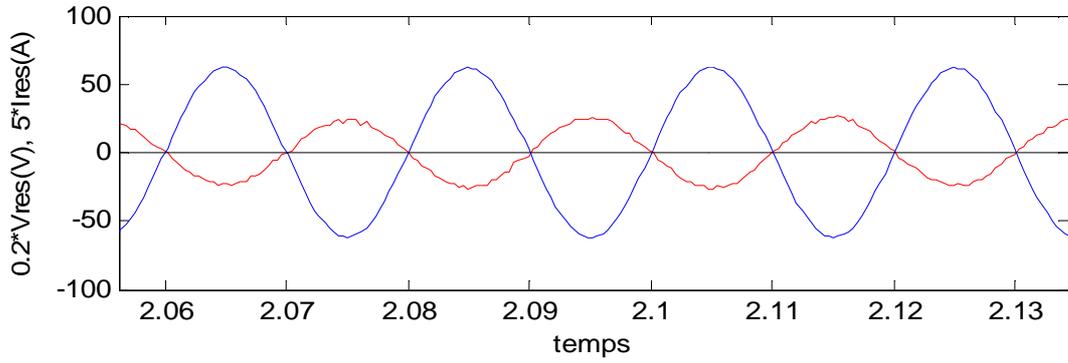
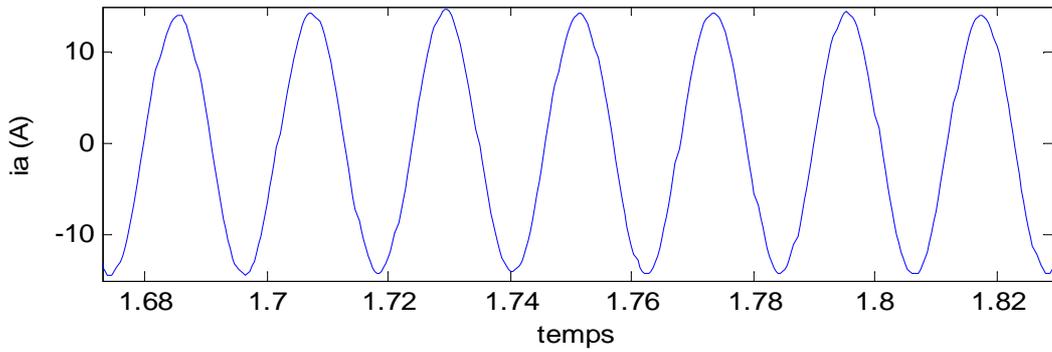


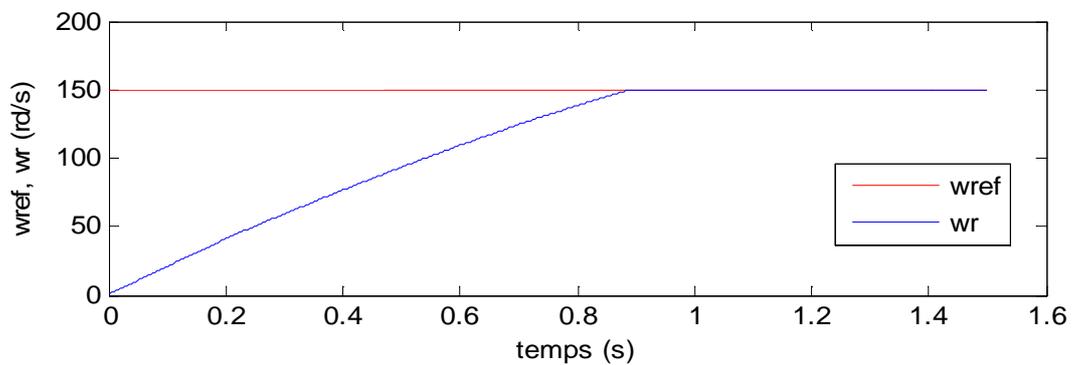
Fig. 3.25- La différence des tensions  $U_{c1}$  et  $U_{c2}$ .



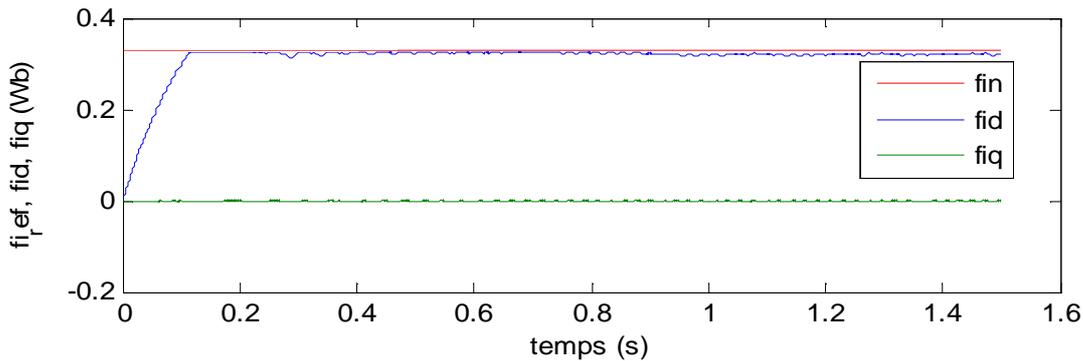
**Fig. 3.26-** Tension et courant du réseau avec zoom.



**Fig. 3.27-** Courant de phase statorique de la MAS avec zoom.



**Fig. 3.28-** Vitesse de rotation de la MAS avec sa référence.



**Fig. 3.29-** Flux direct, flux en quadrature et flux nominale.

### 3. Conclusion :

Pour les deux structures de la cascade, nous avons d'abord modélisé les convertisseurs en développant les différents modèles mathématiques régissant leurs fonctionnements et cela sous certaines hypothèses simplificatrices justifiées.

Une étude sur les onduleurs connectés aux machines a été établie. Ceux-ci sont commandés par une commande à modulation de largeur d'impulsion triangulo-sinusoïdale respectivement à une et deux porteuses. Ces onduleurs sont eux-mêmes alimentés par des bus continus dont la valeur de la tension est maintenue constante grâce à des redresseurs commandés par une MLI à hystériser. Pour l'étude de cette commande, nous avons imposé une référence adéquate aux bascules à hystérésis afin de ne pas dégrader la qualité du réseau. Cette référence doit prendre en compte le maintien de la tension du bus continu à la valeur voulue.

Les résultats de simulations de ces études ont montré que les convertisseurs à trois niveaux offrent une grande amélioration de la qualité des tensions et des courants de la machine, de même que pour la qualité des courants injectés dans le réseau.

Les essais effectués ont également montré que la commande qu'on a appliquée est bien robuste, ce qui augmente la fiabilité de notre système de régulation.

# Optimisation de la puissance produite

---

## **Introduction :**

Les générateurs éoliens sont des générateurs dont la source primaire d'énergie est le vent. Il est bien connu que ce dernier a des caractéristiques très fluctuantes et imprévisibles. La puissance générée par une turbine éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, ainsi, une petite variation de la vitesse du vent engendre une variation considérable de la puissance générée par la turbine. Comme la puissance mécanique débitée par la turbine est très fluctuante, la puissance générée par le générateur éolien le sera aussi.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une commande robuste de la génératrice qui puisse optimiser la production de l'éolienne, c'est-à-dire, améliorer la qualité de l'énergie produite et le rendement énergétique. La commande doit donc tenir compte du comportement du système dans son ensemble. De même, les perturbations provenant du vent doivent également être considérées.

## 1. Régulation de la puissance d'une éolienne :

Le caractère aléatoire du vent pose le problème de la régulation de l'énergie fournie au réseau par les aérogénérateurs. De manière générale, les objectifs de la commande sont présentés selon les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne [8].

D'autant plus, pour extraire de manière efficace la puissance du vent tout en maintenant le système en sécurité, l'éolienne doit être exploitée selon les quatre zones qui relient la vitesse du vent à la puissance désirée (Fig. 4.1) :

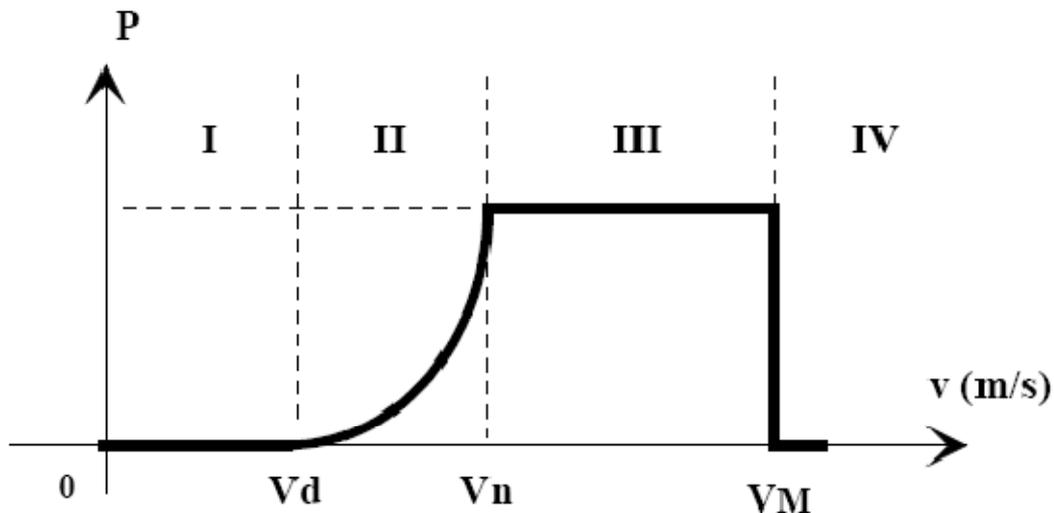


Fig. 4.1- Courbe typique de puissance en fonction de la vitesse du vent.

- **Zone I** : Où la vitesse du vent est très faible et insuffisante pour faire fonctionner l'aérogénérateur, et par conséquent insuffisante pour générer une énergie électrique. L'éolienne est hors service, et aucune commande n'est alors appliquée à cette dernière. L'approvisionnement en énergie électrique peut se faire à travers des sources annexes (photovoltaïque ou thermique), et on parlera alors d'installations hybrides.
- **Zone II** : La vitesse de vent est suffisante (vitesse de démarrage) pour faire fonctionner l'éolienne, en générant des puissances considérables. C'est la zone pour laquelle une extraction maximale de la puissance est réalisée en adaptant la vitesse de la génératrice à celle du vent. La vitesse mécanique est très variable et correspond à une grande plage de variation de la puissance électrique produite. L'angle de calage des pales est optimisé à chaque instant grâce au contrôle pitch. Donc, nos objectifs de commande dans cette zone concernent l'optimisation de la production en énergie.
- **Zone III** : La vitesse du vent est assez importante dans cette zone. Les courants, tensions et vitesses angulaires risquent de dépasser leurs valeurs nominales. Les objectifs de commande dans cette zone sont plutôt orientés vers la sécurité du système.

Il s'agit de maintenir les variables à des valeurs constantes avoisinant les grandeurs nominales de l'éolienne, c'est une régulation par limitation de la puissance.

- **Zone IV** : Pour des vitesses de vent trop importantes (tempête) qui risquent d'endommager l'éolienne, cette dernière doit être protégée et être mise hors fonctionnement. Une fois arrêtée, l'éolienne peut résister à des vents beaucoup plus importants suivant la conception de l'éolienne.

## 2. Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne :

La turbine étudiée comprend trois pales identiques. Elles sont fixées à un arbre d'entraînement qui est relié à un multiplicateur de rapport  $G$ . Le multiplicateur entraîne le générateur électrique à travers un arbre moteur [5].

### 2.1. Modélisation de la turbine :

L'étude dynamique précédemment établie dans le premier chapitre montre que pour une vitesse du vent  $V$  traversant la turbine nous obtenons :

$$P_{aéro} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (4.1)$$

Donc, le couple aérodynamique est déterminé par la relation suivante :

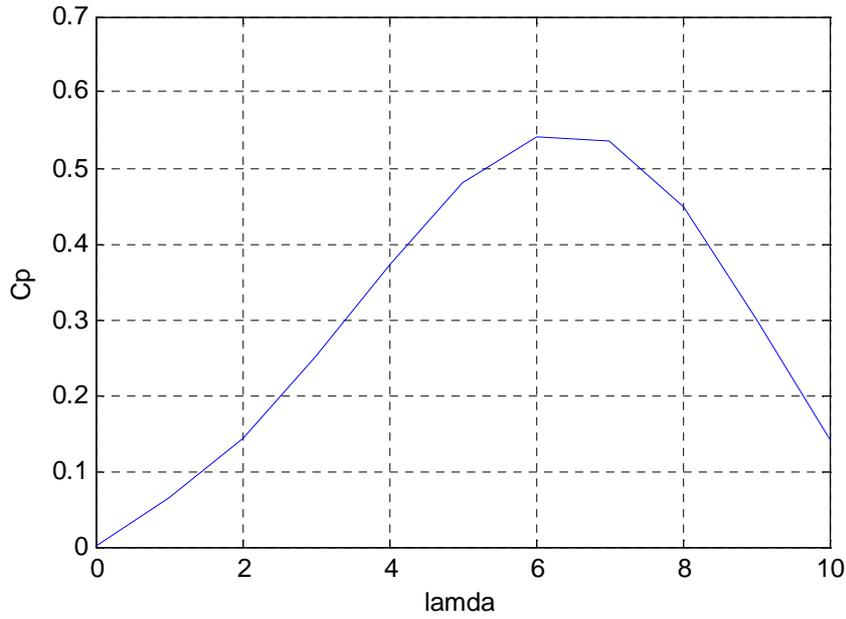
$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (4.2)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible  $C_p$  représente le rendement aérodynamique. Chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ .

Dans notre cas, l'évolution de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  est basée sur l'observation de données de plusieurs petites éoliennes de quelques kW. Suite à ces observations, les variations sont modélisées par l'approximation polynomiale suivante [11]:

$$C_p = 7,9563 \cdot 10^{-5} \lambda^5 - 17,375 \cdot 10^{-4} \lambda^4 + 9,86 \cdot 10^{-3} \lambda^3 - 9,4 \cdot 10^{-3} \lambda^2 + 6,38 \cdot 10^{-2} + 10^{-3} \quad (4.3)$$

Ainsi, comme le montre la figure (4.2), on peut constater que le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci  $C_p = 0.52$  est atteint pour une valeur de la vitesse spécifique  $\lambda = 6$  qu'on appelle  $\lambda_{optimale}$ . C'est cette valeur qui nous permet de maximiser la puissance captée. Ce qui veut dire que pour garantir un rendement maximum de la turbine, il faut maintenir le coefficient de puissance à sa valeur maximale.



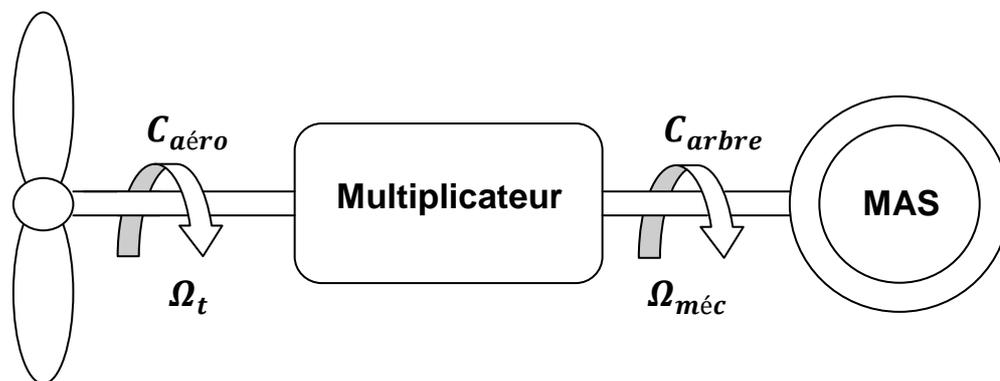
**Fig. 4.2-** Evolution du coefficient de puissance avec la variation de la vitesse relative de l'éolienne.

Dans la suite de notre travail, une commande adaptée sera élaborée pour optimiser la puissance que délivre l'aérogénérateur en imposant  $\lambda_{optimale}$  qui caractérise notre éolienne.

### 2.2. Modélisation du multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse lente des pales à la vitesse rapide de la machine par le rapport de multiplication. Cet élément définit le couple mécanique et la vitesse de la machine comme suit (**Fig. 4.3**):

$$\begin{cases} C_{arbre} = \frac{C_{aéro}}{G} \\ \Omega_{méc} = G \cdot \Omega_t \end{cases} \quad (4.4)$$



**Fig. 4.3-** Multiplicateur.

### 2.3. Equation mécanique de l'arbre :

Les masses des différents éléments de la turbine sont représentées par l'inertie  $J_{turbine}$ . Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine ramenée sur l'axe rapide et celle de la génératrice  $J_G$ . En supposant que le multiplicateur de vitesse est idéal, l'inertie totale  $J$  est donnée par l'expression suivante:

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_G \quad (4.5)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique de la génératrice asynchrone. Le modèle simplifié de cette équation est donné par:

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{arbre} - C_{em} - C_f \quad (4.6)$$

Le couple dynamique est fonction du couple électromagnétique  $C_{em}$  produit par la génératrice, du couple des frottements visqueux  $C_f$ , et du couple issu du multiplicateur  $C_{arbre}$ .

Le couple visqueux est donné par l'expression suivante :

$$C_f = f\Omega_{méc} \quad (4.7)$$

Avec :  $f$ ; le coefficient des frottements visqueux.

### 2.4. Modèle global de la partie mécanique :

On établit à partir des équations précédentes, un schéma bloc du modèle de la turbine (Fig. 4.4). Ce schéma bloc nous montre que la vitesse de rotation de la turbine peut être contrôlée par action sur le couple électromagnétique de la génératrice.

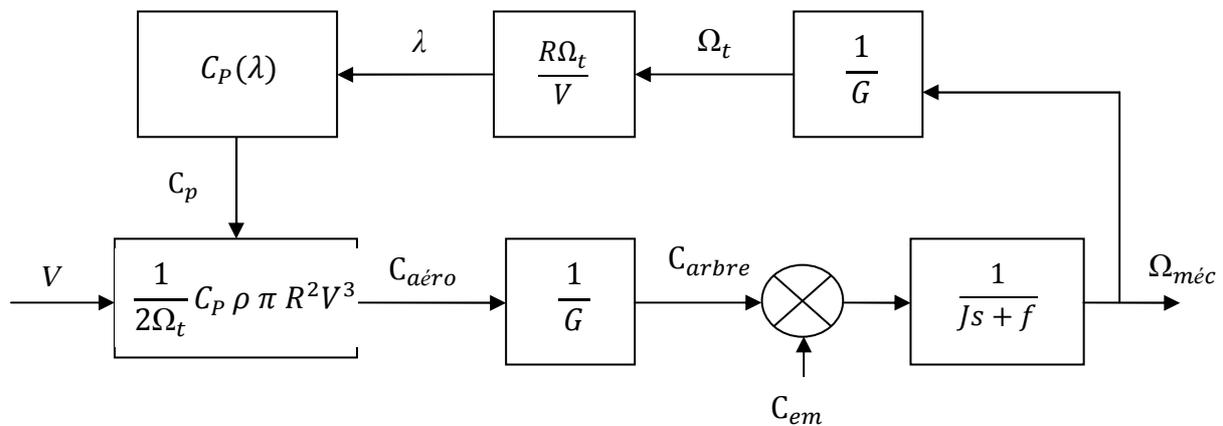


Fig. 4.4- Schéma bloc du modèle du convertisseur éolien.

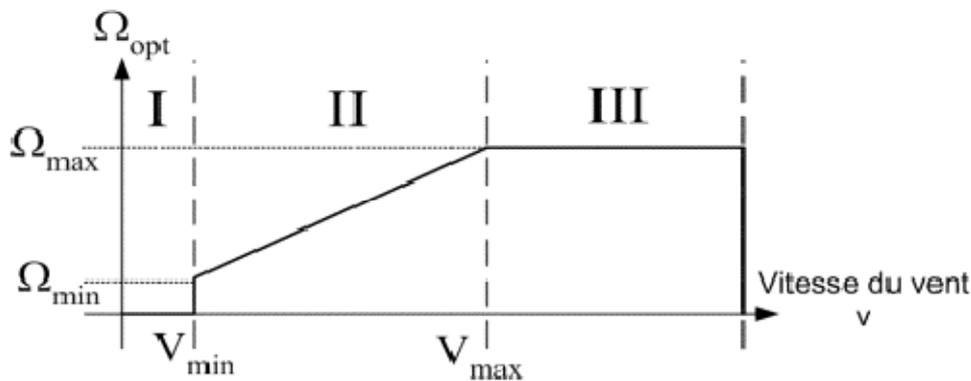
La vitesse du vent est variable dans le temps, et pour garantir un captage maximal de l'énergie éolienne incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de rotation de la turbine en fonction de celle du vent. On détermine donc la vitesse mécanique optimale de la turbine (correspondant à  $\lambda_{opt}$ ). En multipliant cette dernière par la valeur du gain du multiplicateur, on obtient la vitesse mécanique du rotor de la machine asynchrone utilisée comme grandeur de référence pour un régulateur. Ce dernier élabore une consigne de commande, convenant au couple électromagnétique que doit développer la machine pour passer à la vitesse optimale.

### 3. Optimisation de l'extraction de puissance :

Le fonctionnement optimal de l'aérogénérateur est atteint pour un coefficient de puissance maximal, celui-ci atteint cette valeur pour  $\lambda = \lambda_{opt}$ . D'où, la vitesse de rotation résultante est donnée par :

$$\Omega_{opt} = \lambda_{opt} \frac{V}{R} \quad (4.8)$$

La caractéristique qui correspond à cette relation est celle représentée par la zone II de la figure (4.5) [7].

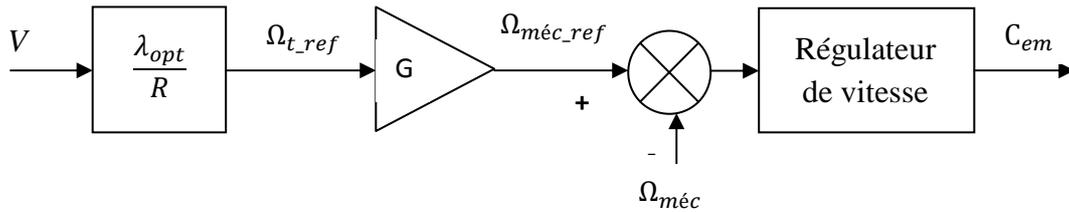


**Fig. 4.5**– Variation de la vitesse mécanique optimale en fonction de la vitesse du vent.

#### 3.1. Commande avec asservissement de la vitesse du vent :

Sachant qu'on est dans la deuxième zone de fonctionnement de l'éolienne, notre commande consiste à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de la puissance générée.

D'après la relation (4.8) qui relie la vitesse mécanique à la vitesse du vent permettant d'avoir un  $C_p$  maximum, nous pouvons déterminer une structure ayant pour consigne une vitesse mécanique de référence établie à partir de la vitesse du vent. Nous pouvons ainsi établir un dispositif de commande simple liant la puissance électromagnétique convertie de la MAS à la vitesse du vent (**Fig. 4.6**).



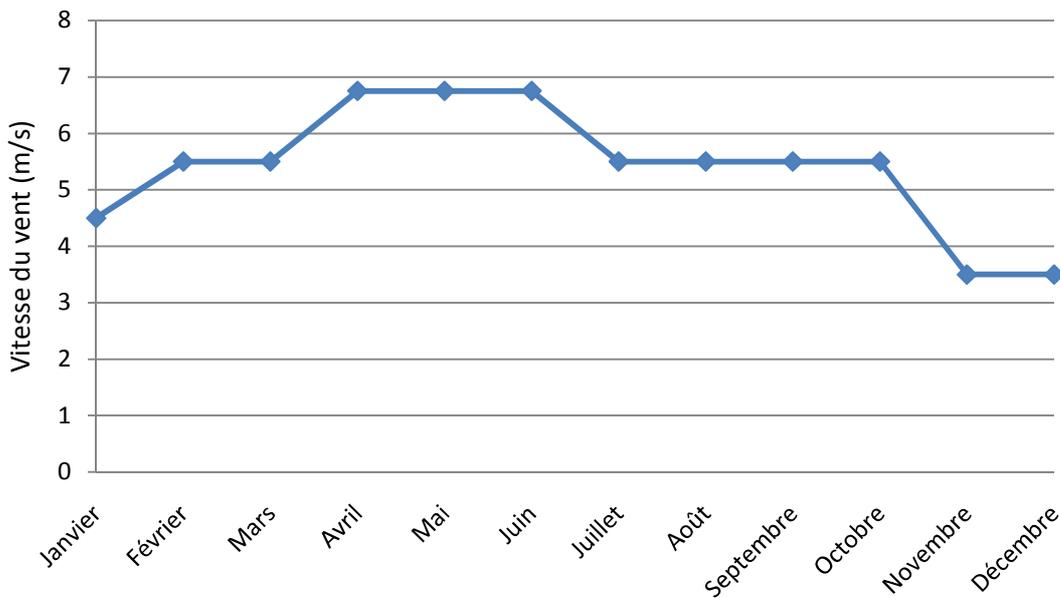
**Fig. 4.6-** Dispositif de commande avec asservissement de la vitesse du vent.

Le couple de référence issu de ce bloc doit répondre à deux problématiques : la maximisation de la puissance et la gestion des zones de fonctionnement de l'éolienne citée précédemment [30]. Ce couple est appliqué par la loi de commande développée précédemment dans le chapitre 2. Le but de la stratégie de commande proposée est de permettre que le couple (voulu pour optimiser le rendement) soit belle et bien fourni par la génératrice asynchrone à cage.

### 3.2. Génération de la variation du vent :

Le vent étant continuellement variable, sa vitesse est généralement mesurée à l'aide d'un anémomètre.

A partir des cartes mensuelles donnant les variations de la vitesse du vent dans le territoire Algérien et qui proviennent de l'Office National de la Météorologie (ONM), nous avons choisit de centrer notre étude sur la région de Tindouf. La figure (4.7) décrit l'évolution mensuelle de la vitesse du vent à 10 m du sol dans cette région.



**Fig. 4.7-** Variation mensuelle de la vitesse du vent dans la région de Tindouf.

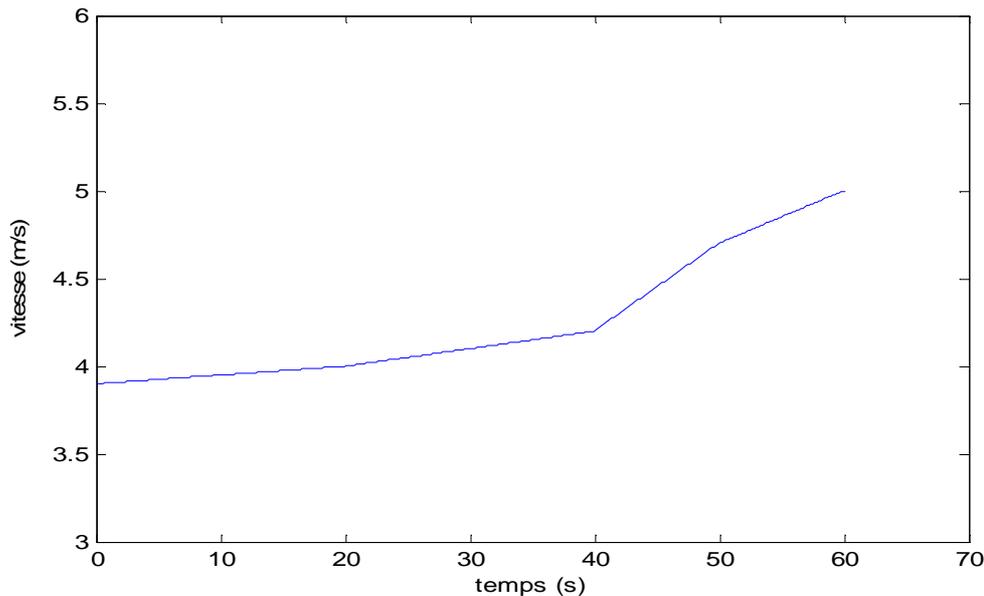
### 3.3. Simulation et Interprétation :

Après avoir modélisé la chaîne de conversion, nous allons la simuler à l'aide du logiciel MATLAB.

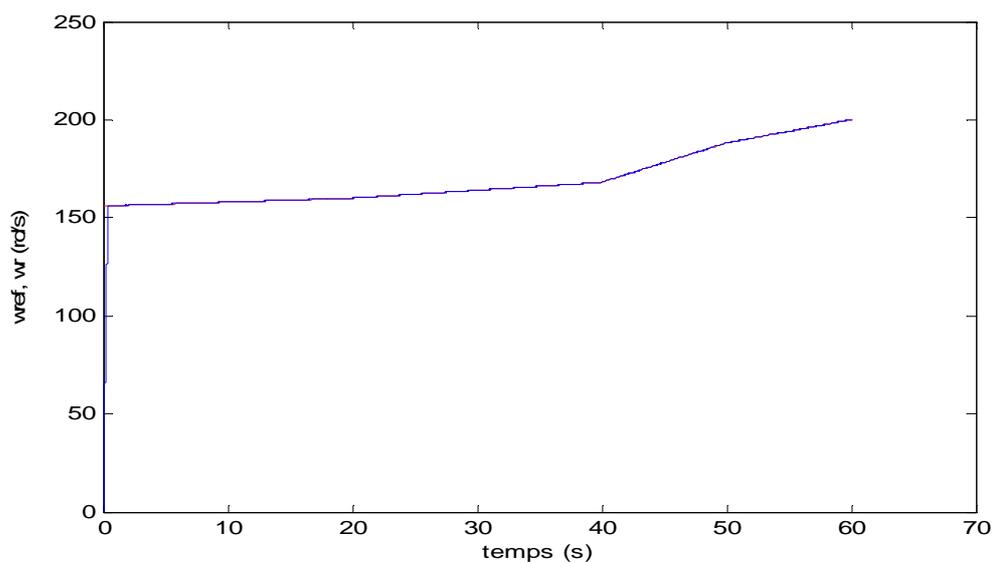
Etant donné que la vitesse du vent, dans la région de Tindouf, varie entre 3 et 7 m/s, nous avons choisis une plage de variation de l'ordre de cet intervalle (**Fig. 4.8**). On varie donc la vitesse de rotation de la turbine et on observe les conséquences de ce changement sur la puissance délivrée par la génératrice asynchrone. Ces relevés portent sur une durée de 60 s.

En ce qui concerne la vitesse de rotation de la machine (**Fig. 4.9**), elle suit bien sa consigne qui varie proportionnellement au vent. On constate aussi qu'elle reste dans des proportions acceptables. Ce constat est en accord avec les contraintes qui limitent le glissement.

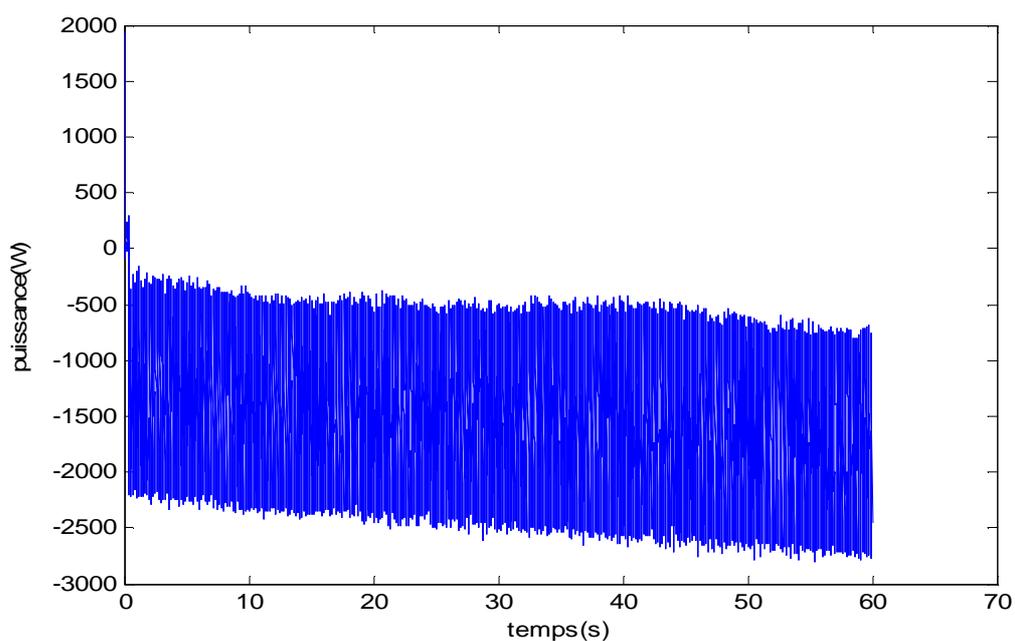
La figure (4.10) représente la variation de la puissance délivrée par la génératrice asynchrone. Il est à noter que cette variation suit bien la variation du vent qui a été choisie, ce qui montre l'optimisation de la production durant tout le fonctionnement.



**Fig. 4.8-** Evolution de la vitesse du vent.



**Fig. 4.9-** Vitesse de rotation de la machine avec sa référence.



**Fig. 4.10-** Puissance produite par la MAS.

#### 4. Conclusion :

Dans les chapitres précédents, nous avons établi une commande de la chaîne éolienne afin de produire de l'énergie électrique pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe).

Ensuite, dans cette dernière partie, nous avons souhaité que la puissance fournie soit maximale à chaque instant du fonctionnement de l'éolienne. Pour cela, nous avons établi une commande avec un asservissement à vitesse du vent variable.

Les résultats de simulation montrent bien qu'on a extrait le maximum de puissance qui sera par la suite renvoyée au réseau. Ces résultats nous ont permis de vérifier la fiabilité de la commande.

---

# Conclusion générale

---

Le travail à partir de ce projet présente une modélisation du système global de génération d'électricité par l'énergie éolienne, ainsi que l'étude d'une commande adaptée en vue d'atteindre les meilleures performances. Notre travail s'est déroulé selon les étapes suivantes :

Dans une première partie, et après avoir introduit un bref historique sur l'évolution des éoliennes, nous avons évoqué l'état de l'art, et ce qui se fait d'actualité dans le domaine éolien, en termes de solutions techniques (machines électriques et électronique de puissance). Cette partie nous a permis de situer notre travail.

Dans le deuxième chapitre, nous avons effectué la modélisation mathématique de la machine asynchrone décrivant de façon adéquate son comportement. Puis, nous avons établi la commande vectorielle directe à flux rotorique orienté de cette machine. Grâce à cette technique de commande, nous avons pu réaliser le découplage entre les variables de sortie du modèle de la machine. En utilisant une commande adaptée, nous avons également imposé une référence sur la tension du bus continu.

Dans le troisième chapitre, nous avons étudié la cascade reliant le stator de la machine au réseau électrique. Celle-ci est composée d'un onduleur, d'un bus continu et d'un redresseur. Ensuite, nous avons établi les commandes de ces convertisseurs, à savoir, la MLI triangulo-sinusoïdale pour l'onduleur et la commande à hystérésis pour le redresseur. Nous avons également montré les performances et les avantages des convertisseurs à trois niveaux vis-à-vis des convertisseurs à deux niveaux à partir d'une étude détaillée. D'après les résultats de simulations effectuées sur le logiciel MATLAB, nous avons pu noter aussi que la MAS fonctionne d'une façon efficace dans les conditions auxquelles nous l'avons soumise. Cela prouve la viabilité de son application dans un système éolien.

Compte au dernier chapitre, il a été consacré à l'optimisation du rendement de la machine dans un système éolien (MPPT). Une commande a été élaborée utilisant la vitesse variable du vent pour commander la machine asynchrone.

Suite aux résultats obtenus dans cette étude, des perspectives intéressantes pouvant contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la MAS sont envisageables [5]:

- Etablissement d'un modèle de la machine asynchrone prenant en compte la saturation.
- Utilisation d'un algorithme de maximisation de la puissance captée par différentes techniques : logique floue, réseau de neurones.
- Intégration d'un système de stockage inertiel.

## Paramètres utilisés

---

- **Valeurs nominales :**

4KW, 220/380- 50 Hz, 15/8.6A, 1430 tr/min.

- **Paramètres de la MAS :**

Résistance statorique :  $R_s = 1.22 \Omega$ .

Résistance rotorique :  $R_r = 0.11 \Omega$ .

Inductance cyclique statorique :  $L_s = 0.17 \text{ H}$ .

Inductance cyclique rotorique :  $L_r = 0.015 \text{ H}$ .

Inductance cyclique mutuelle :  $L_m = 0.048 \text{ H}$ .

Le nombre de paire de pôles :  $p = 2$ .

Moment d'inertie :  $J = 0.135 \text{ kg.m}^2$ .

Coefficient de frottement visqueux :  $f = 0.00182 \text{ N.m.s/rd}$ .

- **Paramètres de la turbine éolienne utilisée :**

Nombre de pales = 3.

Rayon de la surface balayée par les pales :  $R = 3\text{m}$ .

Gain du multiplicateur :  $G = 20$ .

Moment d'inertie de la turbine :  $J_{\text{turbine}} = 315 \text{ kg.m}^2$ .

- Résistance du filtre :  $R_f = 0.25 \Omega$ .

- Inductance du filtre :  $L_f = 0.015$  H.
- Capacité du condensateur de lissage de la tension du bus continu :  $C = 0.025$  F.

## Modèle diphasé de la MAS

### 1. Equations générales de la MAS :

En utilisant la notation matricielle, les équations des tensions statoriques, écrites dans un référentiel stationnaire lié au stator, sont données par:

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad (B.1)$$

Les équations des tensions rotoriques, écrites dans un référentiel stationnaire lié au rotor, sont données par :

$$[V_r] = [0] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad (B.2)$$

$$\text{où : } [V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix};$$

$$[\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Il est possible d'exprimer les flux en fonction des courants et des différentes inductances propres et mutuelles de la machine par:

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] \cdot [I_r] \quad (B.3)$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \quad (B.4)$$

$$\text{où : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$\text{et } [M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix}$$

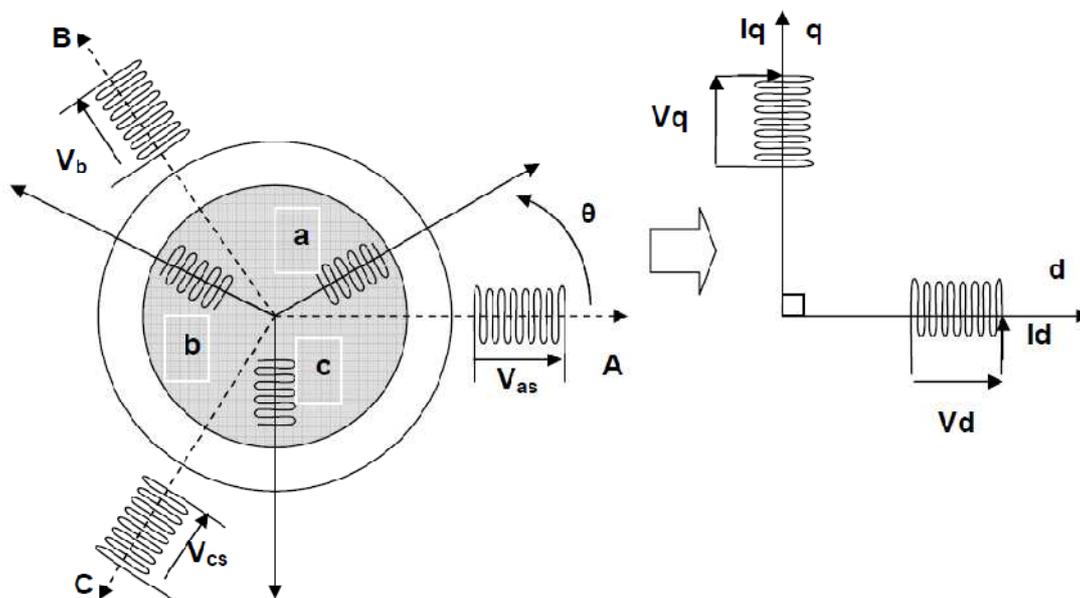
En remplaçant (B.3) et (B.4) dans respectivement, (B.1) et (B.2) nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] \cdot [I_r] \} \quad (\text{B.5})$$

$$[0] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^t \cdot [I_s] \} \quad (\text{B.6})$$

## 2. Modèle diphasé de la MAS :

La machine asynchrone est une machine fortement couplée, sa représentation dans le système triphasé est par conséquent particulièrement complexe. Pour mieux représenter le comportement de la machine asynchrone, il est nécessaire de faire appel à un modèle précis et suffisamment simple. Le modèle diphasé (d, q) donné par la transformation de Park est alors utilisé (**Fig. B.1**).



**Fig. B.1-** Modèle de Park de la MAS.

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-biphasé, suivie d'une rotation. Elle permet de passer d'un repère abc vers le repère  $(\alpha, \beta)$  puis vers le repère  $(d, q)$ . Le repère  $(\alpha, \beta)$  est toujours fixe par rapport au repère abc. Par contre, le repère  $(d, q)$  est mobile. Il forme avec le repère  $(\alpha, \beta)$  un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park.

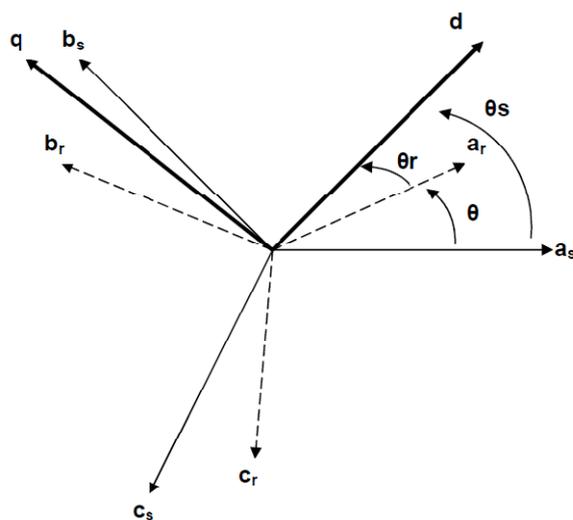
D'après la théorie de Park, la matrice orthogonale de transformation  $[P(\theta)]$  est définie par :

$$[P(\theta)] = c \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

Où  $c$  est une constante qui prend la valeur de  $\sqrt{2/3}$  pour une conservation de puissance.

On applique la transformation de Park pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques). Si on note par  $\theta_s$  (respectivement, par  $\theta_r$ ) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (respectivement, rotoriques), alors pour simplifier les équations et par conséquent le modèle, les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et rotoriques doivent coïncider (**Fig. B.2**). Ceci se fait en liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation :

$$\theta + \theta_r = \theta_s \quad (\text{B.8})$$



**Fig. B.2-** Représentation des axes de la machine.

- **Equations des tensions :**

En appliquant la transformation de Park à l'expression (B.1), et après simplification, on obtient :

$$[V_{sdq}] = [R_s] \cdot [I_{sdq}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdq}] + [P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [\Phi_{sdq}] \quad (\text{B.9})$$

L'expression (B.9) devient alors :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{B.10})$$

De manière similaire, nous obtenons pour le rotor l'expression suivante :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_r}{dt} \\ \frac{d\theta_r}{dt} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{B.11})$$

- **Equations des flux :**

En appliquant la transformation de Park à l'expression (B.3), on trouve :

$$[\Phi_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [L_{ss}] \cdot [P^{-1}(\theta_s)] \cdot [I_{sdq}] + [P(\theta_s)] \cdot [M_{sr}] \cdot [P^{-1}(\theta_r)] \cdot [I_{rdq}] \quad (\text{B.12})$$

En introduisant les inductances cycliques :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_m = \frac{3}{2} \cdot M_{sr} \end{cases} \quad (\text{B.13})$$

L'expression (B.12) devient alors :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{B.14})$$

De la même manière, en appliquant la transformation de Park à l'expression (A2.4), et en introduisant l'inductance cyclique :

$$L_r = l_r - M_r \quad (\text{B.15})$$

On aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad (\text{B.16})$$

## Expression du couple électromagnétique

Nous allons utiliser la méthode du bilan des puissances instantanées pour déterminer l'expression du couple électromagnétique.

La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques est donnée par :

$$P_e = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} + V_{dr} \cdot I_{dr} + V_{qr} \cdot I_{qr} \quad (\text{C. 1})$$

La puissance instantanée peut se décomposer en trois termes : puissance dissipée en pertes joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique [5].

$$P_e = P_J + P_{em} + P_{mec} \quad (\text{C. 2})$$

Où :

$$P_J = R_s \cdot (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + R_r \cdot (I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \quad (\text{C. 3})$$

$$P_{em} = I_{ds} \cdot \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + I_{qs} \cdot \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + I_{dr} \cdot \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + I_{qr} \cdot \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \quad (\text{C. 4})$$

$$P_{mec} = \omega (I_{dr} \cdot \Phi_{qr} - I_{qr} \cdot \Phi_{dr}) \quad (\text{C. 5})$$

En tenant compte des expressions (B.14) et (C.5) et en utilisant la relation entre la puissance mécanique et le couple électromagnétique suivante :

$$C_e = \frac{P_{mec}}{\Omega} = P \cdot \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (\text{C. 6})$$

Nous pouvons avoir plusieurs expressions scalaires du couple électromagnétique toutes égales :

---

$$\begin{cases} C_e = P. (\Phi_{qr} \cdot I_{dr} - \Phi_{dr} \cdot I_{qr}) \\ C_e = P. (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) \\ C_e = P. L_m. (I_{dr} \cdot I_{qs} - I_{ds} \cdot I_{qr}) \\ C_e = P. \frac{L_m}{L_r}. (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) \end{cases} \quad (\text{C.7})$$

---

## Paramètres des régulateurs

---

	<b><math>K_p</math></b>	<b><math>K_i</math></b>
Régulateur de flux	170.45	1249.96
Régulateur de vitesse	1.93	0.026
Régulateur de courant	1.02	138.01
Régulateur de tension	1.5	0

---

---

# Bibliographie

---

- [1] N. ZIOUI, "*Conception, modélisation et commande d'une éolienne à axe vertical*", mémoire de magister, ENSP, 2008.
- [2] T. ACKERMANN, "*Wind power in power systems*", John Wiley & Sons, Ltd, Stockholm, 2005.
- [3] D. BENACHOUR, "*El Watan*", 30 novembre 2006.
- [4] [http://www.espace-eolien.fr/Eolien/Kesaco\\_tech.htm](http://www.espace-eolien.fr/Eolien/Kesaco_tech.htm).
- [5] Y.A. BENCHRIF, "*Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne*", projet de fin d'études, ENSP, Juin 2008.
- [6] D. Le GOURIERE, "*Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations*", édition EYROLLES, Paris 1982.
- [7] A. SAKI, M. BELAIDI, "*Etude d'un générateur asynchrone dans La production d'énergie électrique par éolienne*", projet de fin d'études, ENSP, Juin 2006.
- [8] A. BOYETTE, "*Contrôle, commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne*", thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1, Décembre 2006.

- [9] F. POITIER, *"Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne"*, thèse de doctorat, Université de Nantes, 19 décembre 2003.
- [10] A. ABDELLI, *"Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive"*, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique Toulouse, Octobre 2007.
- [11] A. MOUSSA SIDDOU, I. SOUMANA NOUHOU, *"Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne"*, projet de fin d'études, ENSP, 2007.
- [12] S. AL AIMANI, *"Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension"*, thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, Décembre 2004.
- [13] C.V. NICOLAS, M. LAFOZ, J. IGLESIAS, *"Guidelines for the Design and Control of Electrical Generator Systems for new Grid connected Wind Turbine Generator"*, IECON 2002.
- [14] S. HAO, G.HUNTER, V.RAMSDEN, D.PATTERSON, *"Control system design for a 20 kW wind turbine generator with a boost converter and battery bank load"*, Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC.2001 IEEE 32nd Annual, Volume : 4, 2001, pp : 2203-2206.
- [15] I. SCHIEMENZ, M. STIEBLER, *"Control of permanent magnet synchronous generator use in a variable speed wind energy system"*, Electric Machines and Drives Conference, 2000. IEMDC 2001. IEEE International, 2001, pages : 872-877.
- [16] M.G. SIMOES, B.K. BOSE, R.J. SPIEGEL, *"Fuzzy Logic Based Intelligent Control of a variable speed Cage Machine Wind Generator System"*, IEEE Transactions on power electronics, Vol. 12, N°. 1, pp. 87-95, January 1997.
- [17] J. CHATELAIN, *"Machines électriques, Traité d'électricité, Vol X"*, Presse Polytechniques romandes, édition GEORGI, 1983.
- [18] B. ROBYNS, B. FRANCOIS, P. DEGOBERT, J.P. HAUTIER, *"Commande vectorielle de la machine asynchrone : Désensibilisation et optimisation par la logique floue"*, Edition OPHRYS, 2008.

- [19] H. TAMRABET, "*Robustesse d'un control vectoriel de structure minimale d'une machine asynchrone*", mémoire de magister, Université de Batna, 2006.
- [20] M.MAHMOUDI, "*Commande des machines électriques*", notes de cours de 5<sup>ème</sup> année Electrotechnique de l'Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, Alger, Année universitaire 2008/2009.
- [21] J.P. CARON, J.P. HAUTIER, "*Modélisation et commande de la machine asynchrone*", Edition TECHNIP, 1995.
- [22] M. NOUGARET, "*Principes généraux de correction*", Techniques De l'ingénieur, R 7 405.
- [23] R. ACHOURI, M. HIDOUCHE, "*Commande vectorielle de la machine asynchrone*", projet de fin d'études, ENSP, Juin 2007.
- [24] M. ABBAS, M. MECHENTEL, "*Modélisation et commande d'une MADA alimentée par une cascade à trois niveaux, application à l'énergie éolienne*", projet de fin d'études, ENSP, 2006.
- [25] F.BRICHANT, "*Les onduleurs autonomes-conception et application industrielles*", DUNOD, 1982.
- [26] F. LABRIQUE, H. BUYSE, G. SEGUIER, R. BAUSIERE, "*Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Tome 5, Commande et comportement dynamique*", Technique et Documentation-Lavoisier, Paris, pp 46-51.
- [27] H. FOCH, F.FOREST, et T.MEYNARD, "*Onduleurs de tension, structures principes et applications*", Techniques de l'ingénieur, D 3 176.
- [28] M. MOLINAS, B. NAESS, W.GULLVIK, T.UNDELAND, "*Control of wind turbine with induction generators interfaced to the grid with power electronics connecter*", Norwegian University of science and technology.
- [29] E. M.BERKOUK, "*Contribution à la conduite des machines asynchrones monophasées et triphasée alimentées par des convertisseurs directs et indirects, application aux gradateurs et onduleurs multiniveaux*", thèse de doctorat, CNAM, Paris, 1995.

[30] A.D. DIOP, " *Contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateur : simulation et commande en temps réel d'une turbine de puissance moyenne à angle de calage variable* ", thèse de doctorat, Université du Havre, 8 Juillet 1999.