

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

Université Abderrahmane Mira de Bejaia



Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

2^{eme} Année Master

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en électrotechnique

Option :Electromécanique

Thème

Contrôle D'une Génératrice Asynchrone Dans Un
Système D'énergie Renouvelable

Présenté par :

Mansour Mustapha

Aissou Nadjim

Encadré par :

Mme Abdelli Radia

Année universitaire 2012/2013

Remerciements

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le Tout Puissant, Pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour réaliser ce modeste travail.

Nous exprimons notre plus vif remerciement à notre encadreur M^{me} R. Abdelli qui nous a aimablement orienté et assidûment dirigé notre travail.

Nous présentons aussi nos sincères remerciements au président du jury et les membres de jury examinateurs d'avoir accepter d'évaluer ce travail.

Et enfin nous remercions, l'ensemble des enseignants et collègues de notre promotion, qui nous ont aidés à réaliser ce modeste travail.

Nadjim et Mustapha.

Dédicaces

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*En premier lieu à ma mère et à mon père qui ont
consenti beaucoup de sacrifices pour me permettre de
réaliser mes objectifs. Qu'ils trouvent ici toute ma
reconnaissance et ma gratitude.*

A mes frères et ma sœur

A mon binôme Mustapha

A tous mes camarades et mes amis

*A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à
maintenant.*

Nadjim.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*En premier lieu à ma mère et à mon père qui ont
consenti beaucoup de sacrifices pour me permettre de
réaliser mes objectifs et Qu'ils trouvent ici toute ma
reconnaissance et ma gratitude.*

A mon frère et mes sœurs

A mon binôme Nadjim

A tous mes camarades et mes amis

*A tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à
maintenant.*

Mustapha.

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I: Généralités sur les systèmes de conversion éoliens	
Introduction	3
I. 1. Principales sources d'énergie renouvelables.....	3
I. 2. Génération de l'électricité	6
I. 3. L'Algérie et l'énergie éolienne	9
I. 4. Eléments constitutif d'une éolienne	10
I. 4. 1. Principaux composants d'une éolienne	10
I. 4. 2. Principe de fonctionnement d'une éolienne	13
I. 5. Différents types d'une éolienne	14
I. 5.1. Raisons pour choisir une grande éolienne	14
I. 5.2. Raisons pour choisir une petite éolienne.....	15
I. 5.3. éolienne a axe vertical	15
I. 5.4. éolienne a axe horizontal	17
I. 6. Motif de choix de la savonius dans un milieu urbain	18
I. 6.1. Avantages et inconvénient de l'énergie éolienne	19
I. 7. Machines électriques et différentes chaines de conversion utilisé dans l'éolien	21
I. 7.1. principe de fonctionnement d'une machine asynchrone	21
A / MAS a vitesse fixe (moteur à cage).....	21
B / MAS a vitesse variable	22
C / MAS doublement alimenté	23
I. 7. 2. Génératrice synchrone	24
A / MS à rotor bobiné	24

B / Machine synchrone à aimant permanent (MSAP)	24
C / Machine a reluctance variable (MRV)	25
I. 8. Motif de choix de la machine asynchrone	26
I. 9. Conclusion	26

Chapitre II: Modélisation et simulation de la chaine de conversion

Introduction	27
II.1. Modélisation de la partie mécanique	28
II. 1. 1. Modèle du vent	28
II. 1. 2. Modèle de la turbine	28
II. 1. 3. Modélisation du générateur éolien	30
II. 1. 4. Modélisation du multiplicateur de vitesse	32
II. 2. Modélisation de la génératrice asynchrone	33
II. 2. 1. Hypothèses simplificatrices.....	34
II. 2. 2. Equations générales de la machine asynchrone	34
II. 2. 3. Modèle de la machine dans le repère de Park	36
II. 2. 4. Choix du repère (dq)	40
II. 3. Modélisation de la génératrice asynchrone en régime saturé.....	42
II.3.1. Modèle diphasé de la machine asynchrone saturée	42
II.3.2. Etude d'un système de conversion autonome.....	45
II.3.3. Modélisation du redresseur	47

II.3.4. Modèle du redresseur MLI	47
II. 3. 5. Modélisation de L'onduleur	49
II. 3.6. Commande MLI « Modulation de largeur d'impulsion »	50
II. 3.7. Contrôle des courants par hystérésis	51
II. 4. Simulation en boucle ouverte (régime linéaire).....	52
II. 4. 1. Simulation en boucle ouverte (régime saturé).....	53
II. 5. Conclusion	58
 Chapitre III: Commande vectorielle de la génératrice asynchrone autonome.	
Introduction	59
III. Commande vectorielle	59
III. 1. 1. Principe de la commande vectorielle	59
III. 1. 2. Commande vectorielle à flux orienté	60
III. 2. Calcul des régulateurs	61
III. 2. 1. Régulateur du flux φ_r	61
III. 1. 3. 2. Estimation de la pulsation statorique	62
III. 2. 2. Contrôle du bus continu.....	62
III. 2. 2. Structure global de la chaine de conversion.....	63
Conclusion	64
 Chapitre IV : Interprétation des résultats de simulation de la commande.	
IV. 1. Résultats de simulation	65
IV. 2. Interprétation des résultats	65
IV.3. Test de robustesse (variation de vent).....	66
• Essai avec turbine à axe horizontal	68

- L'Influence de la vitesse de vent71
- Influence de la charge.....73

IV. 4. Conclusion74

IV. 5. Conclusion générale.....75

Références bibliographiques.....76

Liste des figures

Figure 1: Evolution de la production mondiale en énergie éolienne (d'après WWEA 2011).

Chapitre I :

Figure I-1 : La génération d'électricité éolienne.

Figure I-2 : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW.

Figure I.3 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

Figure I-4 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.

Figure I- 5: Tour d'une turbine.

Figure I-6: Rotor d'une turbine.

Figure I-7 : Constitution d'une nacelle.

Figure I-8 : Différents types d'éoliennes.

Figure 1.9 : Turbines à axe vertical.

Figure I.10 : Turbines éoliennes en amont et en aval.

Figure I.11 : Caractéristique couple / vitesse d'une machine asynchrone a 2 paires de pôles.

Figure I.12 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse fixe.

Figure I.13 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse variable.

Figure I.14 : Système éolien basé sur une machine asynchrone doublement alimenté.

Figure I.15 : Système éolien basé sur une machine asynchrone doublement alimentée.

Figure I.16 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimant permanent MSAP
relié au réseau.

Figure I.17 : Système éolien basé sur une machine à reluctance variable.

Tableaux :

Tableau I-1 : Classification des turbines éoliennes.

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients de l'éolienne Savonius.

Chapitre II :

Figure II. 1 : Machine asynchrone auto-excitée avec batterie de condensateurs.

Figure II.2: Courbe $c_p(\lambda)$ de la voilure étudiée de type Savonius

Figure II- 3: Dimensionnement géométrique de la voilure Savonius

Figure II- 4: Courbe $c_p(\lambda)$ de la voilure étudiée de type horizontale

Figure II- 5: Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.

Figure II. 6: Représentation des enroulements statoriques et rotoriques

Figure II. 7: Repère angulaire du système d'axes.

Figure II.8 : Courbe de magnétisation d'une machine asynchrone

Figure II-9 : Schéma redresseur triphasé à diodes.

Figure II-10 : Redresseur MLI

Figure II-11 : Schéma d'un onduleur de tension

Figure II.12 : Principe de la commande à

Figure II-13 : Tensions statorique.

Figure II-14: Courant statorique

Figure II-15 : Tension statorique a vide.

Figure II-16 : Courant statorique a vide

Figure II-17 : Tension statorique en charge

Figure II-18 : Variation du courant statorique en charge.

Figure II-19 : Influence de la charge sur la vitesse mecanique en(tr/min).

Figure II-20 : Le couple électromagnétique

Figure II-21 : Variation inductance mutuelle.

Figure II-22 : Variation du courant de magnétisation

Chapitre III :

Figure III.1: Schéma bloc de découplage.

Figure III.2: Schéma d'un régulateur PI.

Figure III.3: Schéma bloc de régulateur de flux.

Figure III.4: Schéma de régulation de la tension redressé.

Figure III-5 : Structure global de la commande.

Chapitre IV

Figure IV-1 : Tension du bus continu.

Figure IV-2: Régulation du flux .

Figure IV-3: Variation de tension en fonction de la charge.

Figure IV-4 : Variation de la vitesse du vent.

Figure IV-5 : Variation de la tension en fonction de la vitesse de vent.

Figure IV-6 : Vitesse de la turbine.

Figure IV-7 : Tension statorique.

Figure IV-8 : Courant statorique.

Figure IV-9 : Tension redressée .

Figure IV-10: Tension à la sortie de l'onduleur .

Figure IV-11 : Zoom sur la tension ondulée (Vond).

Figure IV-12 : Influence de la vitesse sur la tension statorique.

Figure IV-13 : Variation de la tension en fonction de la vitesse de vent.

Figure IV-14 : Influence de la charge sur la tension redressée.

.

Nomenclature

1. La turbine :

- P_v : La puissance fournie par le vent (W).
- P_t : Puissance de la turbine éolienne (W).
- ρ : Masse volumique de l'air (kg/m^3).
- S_t : La surface balayée par la turbine éolienne (m^2).
- R_t : Rayon de la turbine éolienne (m).
- v : La vitesse du vent (m/s)
- Ω_t : vitesse de la turbine éolienne (rad/s).
- C_p : Le coefficient de puissance.
- C_m : Le coefficient du couple.
- λ : Le rapport de la vitesse en bout des pales.
- λ_{opt} : Le rapport optimal de la vitesse en bout des pales.
- T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m).
- β : L'angle de calage des pales (rad).

2. La Machine

Grandeurs statoriques (Machine réelle)

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tensions d'alimentation des enroulements statoriques (a, b, c) (V).

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statoriques (A).

R_s : Résistance d'une phase statorique (Ohm).

L_s : Inductance propre d'une phase statorique (H).

l_s : Inductance de fuite d'une phase statorique (H).

ω_s : Pulsation du champ statorique (rad/s).

$[V_{sabc}]$: Matrice des tensions statorique (V).

$[i_{sabc}]$: Matrice des courants statoriques.

$[\Phi_{sabc}]$: Matrice des flux statoriques.

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

Machine modélisée :

V_{sd}, V_{sq} : Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V).

i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A).

Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).

T_s : Constante de temps statorique (s).

θ_s : Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad).

$[V_{sdqo}]$: Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

$[i_{sdqo}]$: Matrice des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

$[\Phi_{sdqo}]$: Matrice des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Grandeurs rotoriques (Machine réelle) :

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants rotoriques (A).

R_r : Résistance d'une phase rotorique (Ohm).

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique (H).

l_r : Inductance de fuite d'une phase rotorique (H).

ω_r : Pulsation du champ rotorique (rad/s).

$[i_{rabc}]$: Matrice des courants rotoriques.

$[\Phi_{rabc}]$: Matrice des flux rotoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

Machine modélisée :

V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) (V).

i_{rd}, i_{rq} : Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A).

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).

T_r : Constante de temps rotorique.

θ_r : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad).

$[V_{rdqo}]$: Matrice des tensions rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

$[i_{rdqo}]$: Matrice des courants rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

$[\Phi_{rdqo}]$: Matrice des flux rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Grandeurs communes stator/rotor (Machine réelle)

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).

ω : Vitesse électrique de la machine (rad/s).

p : Nombre de paires de pôles de la machine.

θ : Angle électrique de position de la machine (rad).

g : glissement de la machine.

Machine modélisée

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H).

σ : Coefficient de dispersion.

Grandeurs mécaniques

J : Inertie totale ramenée à l'arbre de moteur.

F : Coefficient de frottement visqueux.

Ω : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

T_{em} : Couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone (N.m)

G : Gain du multiplicateur.

3. Les convertisseurs

Le redresseur

V_a, V_b, V_c : Tensions de référence (V).

i_a, i_b, i_c : Courants de référence (A).

i_{dc} : Courant modulé par le redresseur (A).

S_a', S_b', S_c' : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.

5. Convention et abréviations :

GAS : Génératrice asynchrone

MAS : Machine asynchrone

MRV : Machine à reluctance variable

MSAP : machine synchrone à aimant permanent

S : Operateur de Laplace.

Le bus continu

V_{dc} : Tension du bus continu (V).

i_c : Courant capacitif (A).

C : Capacité du bus continu (F).

Introduction générale

La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète, face à ces problèmes et de façon à les limiter, les chercheurs mènent des investigations afin d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie et cela est l'objectif principal de notre modeste travail.

Selon les dernière statistique L'énergie hydraulique est incontestablement la forme d'énergie renouvelable la plus utilisée dans la production de l'énergie électrique, estimée à environ 16% de la production mondiale d'électricité.

Le solaire est le second procédé, qui consiste à utiliser des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité.

Cette dernière est en phase de croissance accélérée aux Etats-Unis, au Japon et en Europe.

Arrive l'éolien dont la capacité de production de l'électricité à partir du vent dépasse les 200 GW. Une progression conséquente et soutenue a été enregistrée depuis 2001 . Ce « boom » peut s'expliquer par le fait que l'énergie éolienne est propre, durable et représente une solution alternative aux combustibles fossiles.

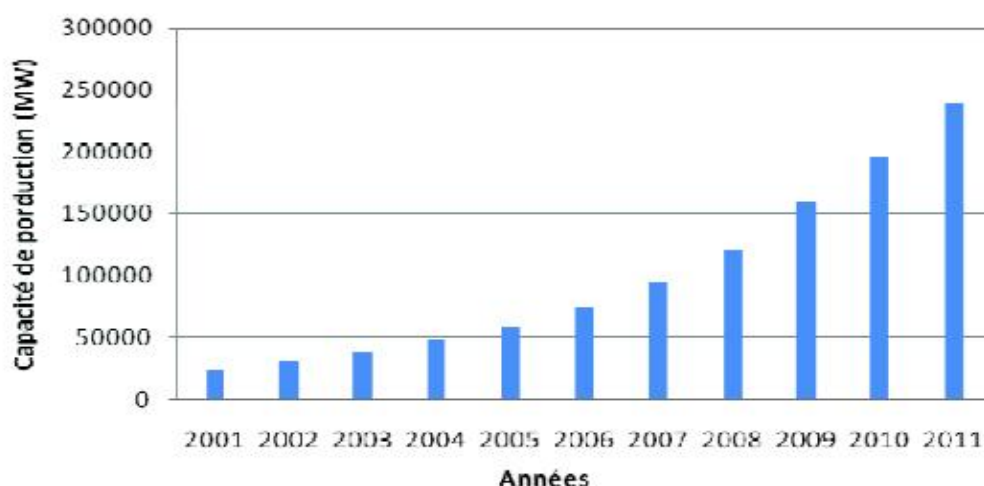


Figure 1: Evolution de la production mondiale en énergie éolienne (d'après WWEA 2011).

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de 4 chapitres principaux. Dont le premier chapitre portera des généralités sur les systèmes éoliens. Il s'agit d'une description détaillée du système éolien et ses différentes structures existantes, ainsi que les types de génératrices utilisées dans les chaînes de conversion et leurs différentes architectures possibles.

Le deuxième chapitre, traitera la modélisation de la partie mécanique de la chaîne éolienne ainsi que la partie électrique à savoir la génératrice asynchrone à cage d'écureuil, le redresseur et l'onduleur de tension utilisé pour la commande. Cette modélisation est d'apport précieux car elle permet de réaliser une image de ce que l'on peut observer expérimentalement.

Le troisième chapitre ainsi que le dernier seront consacré à l'application de la commande pour la chaîne éolienne et cela dans le régime saturé de la génératrice pour les deux sortes de turbines (axe verticale et horizontale) par la technique du contrôle vectorielle et les résultats de simulation avec leur interprétation.

Une conclusion générale et des perspectives seront données à la fin de ce mémoire.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes de conversion éoliens

I. Introduction :

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique). Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée.

Les sources d'énergie renouvelables, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Faisant appel à des sources d'énergie universellement répandues, nécessitant un minimum de maintenance, la solution éolienne représente le plus souvent le choix économique et technologique idéal pour les régions ou installations isolées.

Aujourd'hui, les sources de génération renouvelables, notamment le solaire et l'éolien, sont les énergies dont le taux de croissance est le plus élevé. Leur développement au niveau résidentiel et industriel est considérable, particulièrement en Europe et aux Etats-Unis. Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie en plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes, de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles.

En raison de la nature fluctuante du vent, l'éolien ne peut être considéré que comme une source d'énergie de complément et non de remplacement des solutions classiques.

I.2. Les principales sources d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables permettent de produire soit de la chaleur seule : eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois, solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seule (éolien, photovoltaïque, hydroélectricité, ..) soit en cogénération (turbines à vapeur à partir de bois, biogaz, géothermie, ..).

- **Génération de la chaleur :**

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous forme de chaleur (chauffage, procédés industriels...). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, gaz ou du pétrole [1].

Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables:

- **Thermo solaire**

Le solaire thermique utilise le soleil tout comme le photovoltaïque mais de façon différente, puisqu'il récupère de la chaleur qu'il transmet ensuite à un circuit d'eau qui peut alimenter une habitation en eau sanitaire ou en chauffage [2].

Ils se comportent comme une serre où les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à 60 à 80°C [1].

Cette énergie représente un rendement élevé et permet de chauffer de l'eau "gratuitement" après retour sur investissement. La marge de manœuvre, en matière de substitution aux énergies fossiles, est très importante : s'il est certes impossible de se chauffer uniquement par le soleil (la chaleur ne se stocke pas sur de longues périodes), il serait toutefois possible de produire 50% de l'énergie de chauffage dont nous avons besoin [2].

Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs sont élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement chauffage individuel, piscines). Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement.

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir des températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins

très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent. En 2003 environ 14000 m² de capteurs de ce type ont été utilisés en Union Européenne avec une croissance annuelle de 22% [1].

- **Géothermie :**

La géothermie est la seule source d'énergie dont l'énergie ne provient pas du soleil, mais des processus de désintégration à l'intérieur de la croûte terrestre.

En général, l'énergie géothermique est exploitée en pompant et en utilisant des puits de forage de l'eau chaude provenant d'une zone du sous-sol poreuse imprégnée d'eau très chaude. La chaleur produite sert dans la plupart des cas à la production d'eau chaude sanitaire et au chauffage de bâtiments. En cas de températures au-dessus de 150°C la production d'électricité est possible, la puissance installée était de 8 GW électriques en 1998 pour le monde entier [3].

La température croît depuis la surface vers le centre de la Terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3°C par 100 m en moyenne jusqu'à 15°C ou même 30°C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutives de la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étendent de 1000°C à 4300°C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol soit poreux ou perméables et contiennent des aquifères [1].

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques et elle représente une source d'énergie constante de forte puissance. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Elle s'apparente davantage à une ressource minière, par la réalisation de ses forages profonds, par des lourds investissements qui la caractérisent et par son exploitation qui consiste à extraire les calories du noyau terrestre et par le fait qu'elle est épuisable. Et par contre la géothermie est limitée au nombre de sites.

- **Biomasse**

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse, différents types sont à considérer : le bois-énergie, les biocarburants, le biogaz, le bois-énergie

est une ressource très abondante, c'est la ressource la plus utilisée au monde. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage.

L'énergie peut être stockée et émet peu de gaz à effet de serre. Cependant, la biomasse ne peut avoir qu'un apport limité, en raison de ses impacts négatifs sur l'environnement.

Longtemps le biogaz ne servait qu'à la production de la chaleur. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum, une croissance de cette technologie est donc à prévoir [1].

I.2. Génération d'électricité

Une autre famille d'énergies renouvelables est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. A l'aide des panneaux solaires ou de génératrices hydrauliques et éoliennes, la puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transportée vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique.

Selon la référence [3], la production d'électricité consomme actuellement environ le tiers de l'énergie primaire mondiale et la part des énergies renouvelables n'est que de 14% environ en 1998.

Le plus fort taux de croissance actuel (Environ 30% par an en moyenne depuis plus de 10 ans). A la fin de 2002, La génération d'électricité éolienne est environ de 30,5 GW mondiaux (1% de la puissance totale), 22 GW en Europe et 12 GW en Allemagne. [3].

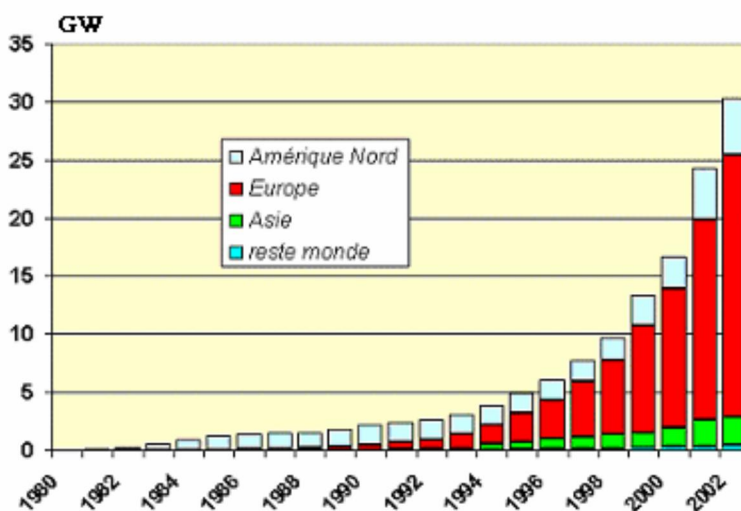


Figure I-1 : La génération d'électricité éolienne

- **Hydraulique**

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. L'énergie hydraulique est produite soit au fil de l'eau soit par le biais du stockage de l'eau (lac de barrage, retenues d'eau) qui permet la constitution d'un stock d'énergie électrique mobilisable à tout moment [2]. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et «stockable» [1].

Son principal avantage est de fournir de fortes puissances et de stocker l'énergie dans les retenues d'eau. Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique. En Europe, en 1999, on comptait environ 10 GW de puissance hydraulique installée. En 2010, cette puissance est passée à plus de 13 GW [2].

- **Énergie marine :**

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements qui animent la surface de la mer (courants, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique.

L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [1].

- **Photovoltaïque :**

Par des cellules photovoltaïques, l'énergie contenue dans le rayonnement solaire est convertie en courant continu basse tension. Les modules standard fournissent une puissance moyenne de 100 W/ m² (rayonnement à 25°). L'énergie solaire photovoltaïque peut présenter un intérêt pour le remplacement du pétrole lampant, des piles électriques ou pour les recharges de batteries [2].

L'avantage des cellules photovoltaïques réside dans la transformation directe de l'énergie solaire en électricité, et dans leur souplesse d'utilisation qui les rend utilisable notamment dans les pays en voie de développement qui ne dispose pas de réseau électrique important. Cependant, leur rendement reste faible [4]. Des progrès technologiques sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive.

En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par l'utilisation des techniques de recherche du point de puissance maximale (techniques dites MPPT) [1].

• **Production éolienne**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. L'énergie récupérée est fonction de la vitesse du vent et de la surface mise face au vent. L'utilisation de cette énergie est soit directe (pompage) soit indirecte (production d'électricité via un générateur). Deux applications sont possibles : la production d'électricité et le pompage éolien.

La production d'électricité (aérogénérateur) : Ces systèmes demandent une bonne technicité. Si l'on excepte l'Inde et la Chine, peu de pays en développement en fabriquent. Les projets exigent des sites ventés et des niveaux d'investissement élevés. Les puissances obtenues demeurent encore à l'heure actuelle des projets pilotes.

Le pompage éolien : Les pompes éoliennes sont d'une puissance généralement inférieure à 10 KW. C'est une technologie ancienne avec de nombreuses variantes à travers le monde. Elle demande des vents de 3 à 4 mètres par seconde au minimum [2].

Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers.

Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 27 GW pour 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde. Parmi les avantages de la production éolienne, le Coût de fonctionnement est relativement faible [5].

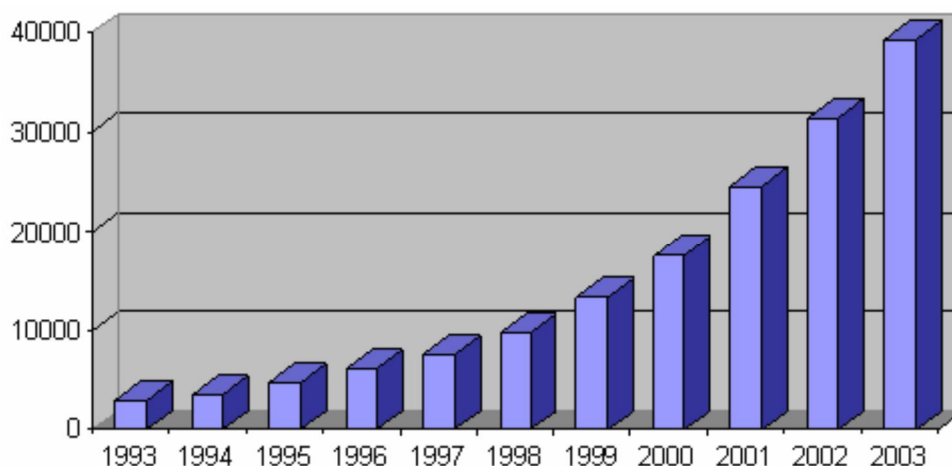


Figure I-2 : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW

I.3 L'Algérie et l'énergie éolienne :

L'une des préoccupations actuelle en Algérie est la revalorisation des terres agricoles dans les zones arides et semi-arides, de parvenir à une autosuffisance alimentaires et de fixer les populations. Les atlas développés montrent que le potentiel énergétique éolien estimé au sud est favorable à l'implantation des systèmes énergétiques basés sur ces sources d'énergie.

En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée .On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers de

Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [6].

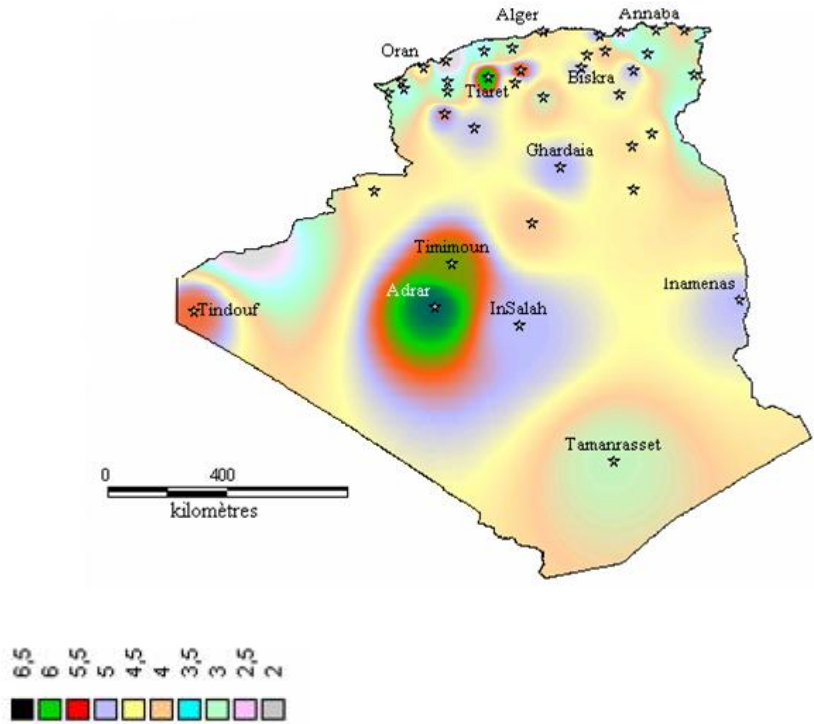


Figure I.3 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l’Algérie estimée à 10 m du sol.

I.4 Principes et éléments constitutifs de l’éolien

I.4.1. Principaux composants d’une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d’aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de :

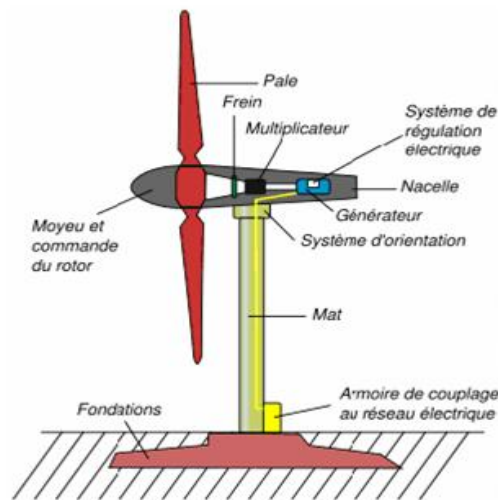


Figure I-4 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur.

Le mât : généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle + rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. Le mât des éoliennes atteint aujourd'hui 80 m de haut pour les plus puissantes (exceptionnellement jusqu'à 100 m). Les éoliennes sont-elles si haut perchées c'est parce que le vent souffle plus fort à quelques dizaines de mètres de hauteur, où il n'est pas perturbé par l'effet des obstacles : relief, arbres, maisons...Et la puissance fournie par une éolienne est proportionnelle au cube de la vitesse du vent [7].



Figure I- 5 : Tour d'une turbine.

La tour doit être suffisamment solide pour supporter non seulement la nacelle et le rotor, mais aussi les charges puissantes provoquées par le vent : d'une part la puissance exercée par le vent directement sur la tour, d'autre part la puissance transmise par le rotor [7].

- **un rotor :** composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor [7].



Figure I-6: Rotor d'une turbine.

Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque. La surface A d'un disque circulaire est égale à:

$$A = \pi * r^2 = \pi * \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (\text{I-1})$$

Où r est le rayon du disque circulaire, d est le diamètre et π est ($\pi = 3,1415\dots$).

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, Elle transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [8].

- **Une nacelle :** Montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [7]. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

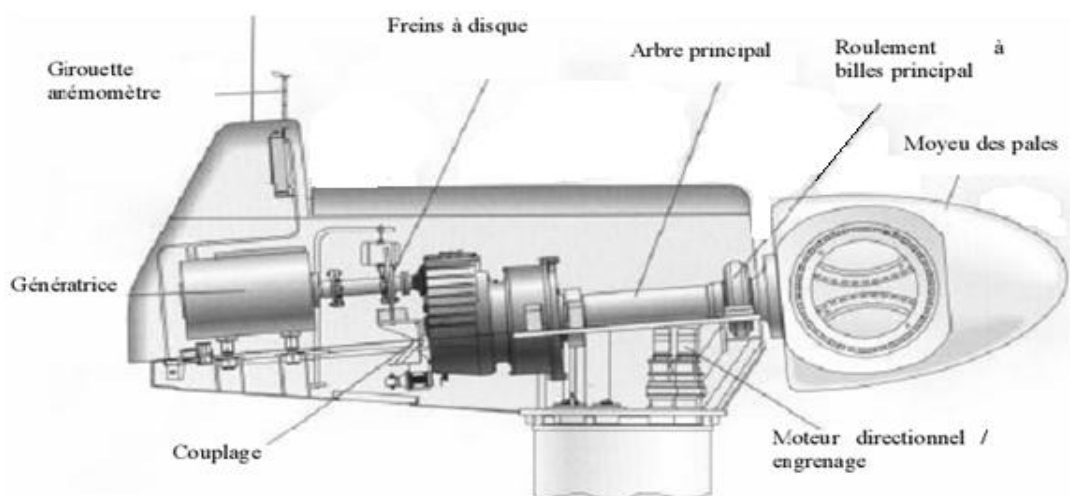


Figure I-7 : Constitution d'une nacelle

Les différents composants d'une nacelle [9] :

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite.

I.4.2. Le principe de fonctionnement d'une éolienne :

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité. La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 15 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. La tension de l'électricité produite par l'alternateur permet d'alimenter soit une charge isolée ou bien elle sera élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes du parc jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public [10].

I.5. les différents types d'éoliennes :

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. Le tableau I-2 présente une classification des turbines éoliennes.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12m	Moins de 40Kw
Moyenne	12m à 45m	De 40Kw à 1Mw
Forte	46m et plus	1Mw et plus

Tableau I-1 : classification des turbines éoliennes. [11].

I.5.1 Les raisons pour choisir une grande éolienne :

Le principe des économies d'échelle vaut également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle-commande .ex.) sont plus ou moins les mêmes, quel que soit la taille de l'éolienne.

Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

I.5.2 Les raisons pour choisir une éolienne plus petite :

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.
2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.
4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre).
5. Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.[11].



Figure I-8 : Différents types d'éoliennes.

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal

I.5.3 Eoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [12].

Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre.

Les avantages d'une machine à axe vertical sont les suivants :

- Elle permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre, et vous n'avez pas besoin de munir la machine d'une tour. Ce qui est plus simple et donc économique. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.
- Les inconvénients principaux sont les suivants :
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- Le faible rendement aérodynamique et la quantité de vent réduite qu'elles reçoivent au niveau du sol.

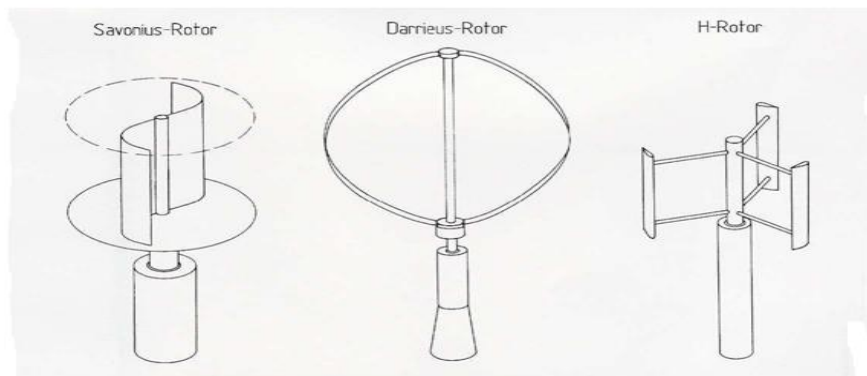


Figure 1.9 : Turbines à axe vertical

I.5.4 Eoliennes à axe horizontal :

Une turbine à axe de rotation horizontal demeure face au vent, comme les hélices des avions et des moulins à vent. Elle est fixée au sommet d'une tour, ce qui lui permet de capter une quantité plus importante d'énergie éolienne. La plupart des éoliennes installées sont à axe horizontal. Ce choix présente plusieurs avantages, comme la faible vitesse d'amorçage et un coefficient de puissance (rapport entre la puissance obtenue et la puissance de la masse d'air en mouvement) relativement élevé [13]. Toutefois, la boîte de vitesses et la machine électrique doivent être installées en haut de la tour, ce qui pose des problèmes mécaniques et économiques. Par ailleurs l'orientation automatique de l'hélice face au vent nécessite un organe supplémentaire « queue ».

Selon son nombre de pales, une turbine horizontale est dite mono-pale, bipale, tripale ou multi-pale. Une éolienne mono-pale est moins coûteuse car les matériaux sont en moindre quantité et, par ailleurs, les pertes aérodynamiques par poussée sont minimales. Cependant, un contrepoids est nécessaire et ce type d'éolienne n'est pas très utilisé à cause de cela. Tout comme les rotors mono-pales, les rotors bipales doivent être munis d'un rotor basculant pour éviter que l'éolienne ne reçoive des chocs trop forts chaque fois qu'une pale de rotor passe devant la tour [14]. Donc, pratiquement toutes les turbines éoliennes installées ou à installer prochainement sont du type tripale. Celles-ci sont plus stables car la charge aérodynamique est relativement uniforme et elles présentent le coefficient de puissance le plus élevé actuellement. Suivant leur orientation en fonction du vent, les turbines horizontales sont dites en «amont » ou en « aval ». La figure (I.10) montre les deux types mentionnés.

Les premières ont le rotor face au vent ; puisque le flux d'air atteint le rotor sans obstacle, le problème de « l'ombre de la tour » est bien moindre. Néanmoins, un mécanisme d'orientation est essentiel pour maintenir en permanence le rotor face au vent. Les éoliennes à rotor en aval n'ont pas besoin de ce mécanisme d'orientation mais le rotor est placé de l'autre côté de la tour : il peut donc y avoir une charge inégale sur les pales quand elles passent dans l'ombre de la tour. De ces deux types d'éoliennes, celle en amont est largement prédominante.

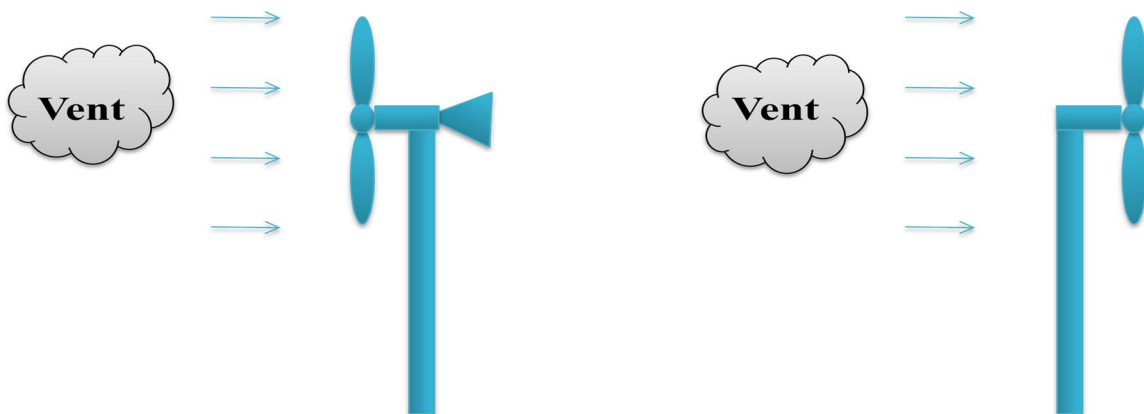


Figure I.10 : Turbines éoliennes en amont et en aval

I.6. Motif de choix de la Savonius dans un milieu urbain :

Bien qu'elle possède un faible rendement par rapport aux éoliennes "classiques", l'éolienne Savonius a l'avantage d'être peu encombrante, économique et esthétique. Par ailleurs, elle démarre à faible vitesse de vent (de l'ordre de 2m/s) et présente un couple élevé. De plus contrairement aux éoliennes à axe horizontal, l'éolienne étudiée peut fonctionner quel que soit la direction du vent.

Avantages et inconvénients de l'éolienne Savonius :

Avantages	Inconvénients
Peu encombrante	Faible rendement
Peu bruyante	Masse non négligeable
Démarre à faible vitesse de vent	Couple non constant
Couple élevé au démarrage	
Pas de contrainte sur la direction du vent	
Esthétiques	

Tableau I-2 : Avantages et inconvénients de l'éolienne Savonius

I.6 .1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

❖ les avantages :

- ✓ L'énergie éolienne, propre, fiable, économique [15], et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement [16].
- ✓ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable [17]

- ✓ Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique [9].
- ✓ Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance [18].
- ✓ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs [19].
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [19].
- ✓ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ✓ C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- ✓ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [20].
- ✓ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [21], selon la référence [8] le coût de l'éolienne a diminué presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines [20].
- ✓ Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [19].

❖ **les inconvénients** :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients :

- L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif [19]. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien [9].

- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils [19], extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne [9].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique [21], la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien. Selon la référence [18], il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I .7. Machine électrique et les différentes chaines de conversion électromécanique utilisé dans le domaine éolien :

I.7.1. Principe de fonctionnement des Machine asynchrone :

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 hyper synchrone), la machine fonctionne en génératrice. Mais son stator doit être forcément relié au réseau ou connecté à un banc de capacités pour créer le champ magnétique nécessaire au fonctionnement de la génératrice [22].

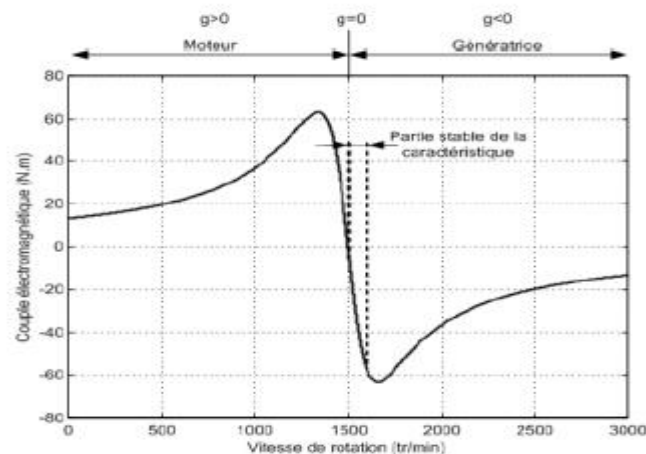


Figure I.11 : Caractéristique couple / vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.

a) Machine asynchrone à vitesse fixe (machine à cage) :

C'est la plus utilisée pour la génération des puissances élevées de part sa facilité de conception et sa grande robustesse, donc un moindre coût de maintenance. Son rotor est relié aux pales de l'éolienne via un multiplicateur mécanique tout en assurant la magnétisation de la machine par un banc de condensateurs. Ce système de conversion présente un inconvénient majeur en termes d'accrochage et de décrochage de la machine au réseau et son inaptitude de fonctionner à vitesse variable [23]. Lorsque cette machine est connectée au réseau, elle ne peut produire de l'énergie que si la vitesse de rotation est supérieure à celle du synchronisme (fonctionnement hyper synchrone). Cependant, si la vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme, la machine fonctionnera en moteur (l'éolienne deviendra ventilateur) [24].

Comme ce type de machine sera l'objet de notre travail nous citerons les avantages et inconvénient de cette machine.

Les avantages principaux de ce type :

- Système électrique plus simple.
- Moins cher.
- Pas besoin de système électronique.
- Plus fiable (moins d'entretien).

Inconvénients:

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

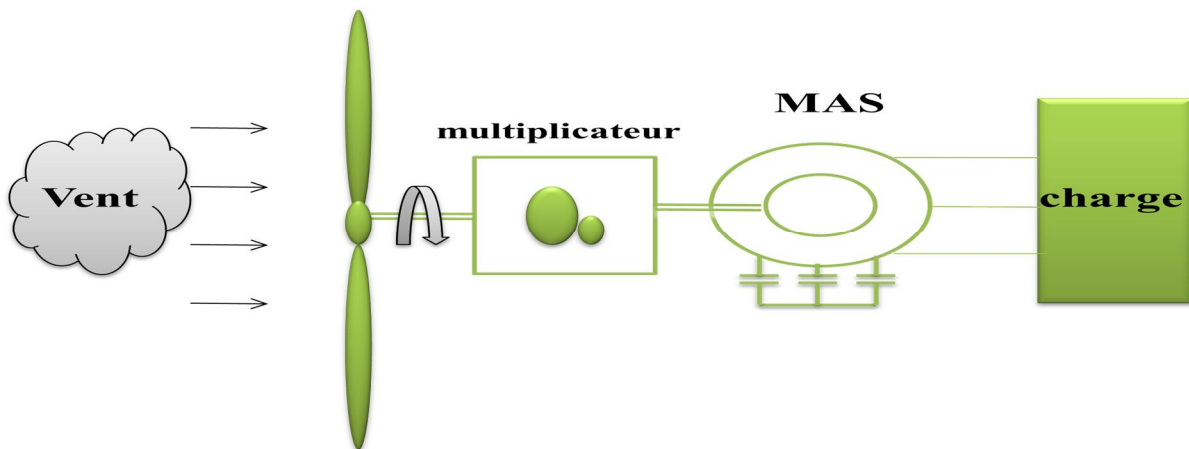


Figure I.12 : système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse fixe.

b) Machine asynchrone à vitesse variable (machine à cage) :

On associe à la machine des convertisseurs statiques (redresseur et onduleur) afin de fonctionner à vitesse variable et d'imposer la fréquence du réseau. Cette solution est globalement couteuse à cause du dimensionnement des composants électroniques (des convertisseurs) qui doivent subir des contraintes importantes électriques et thermiques (pertes importantes).

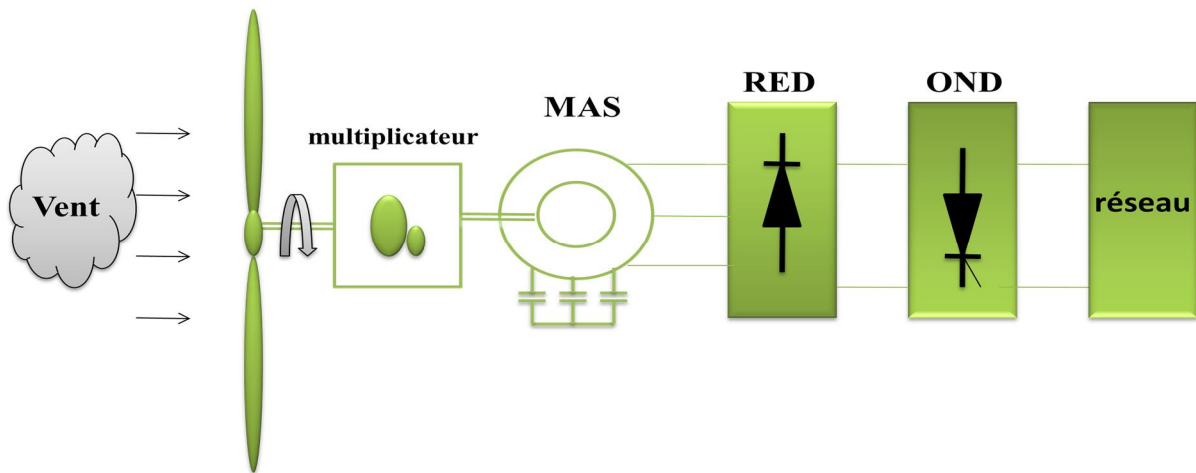


Figure I.13 : *système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse variable*

c) **Machine asynchrone doublement alimentée (MADA) :**

Elle est caractérisée par la récupération de l'énergie (descendante de la cascade hypo synchrone) au niveau du rotor (puissance relativement faible [24] par l'intermédiaire d'un redresseur-onduleur, pour contrôler d'une part la vitesse de la machine et d'autre part imposer la fréquence au réseau qu'elle que soit la variation de la puissance du vent. Le stator est lié directement au réseau pour fournir la puissance puisée du vent. Les convertisseurs devraient supporter une puissance de l'ordre de 30% de la puissance nominale générée par le stator, ce qui conduit à diminuer considérablement son coût [25]. Cette technologie exige une génératrice à rotor bobiné qui entraîne des pertes de puissance dues à l'usure des bagues et balais ainsi qu'un entretien régulier de ces derniers.

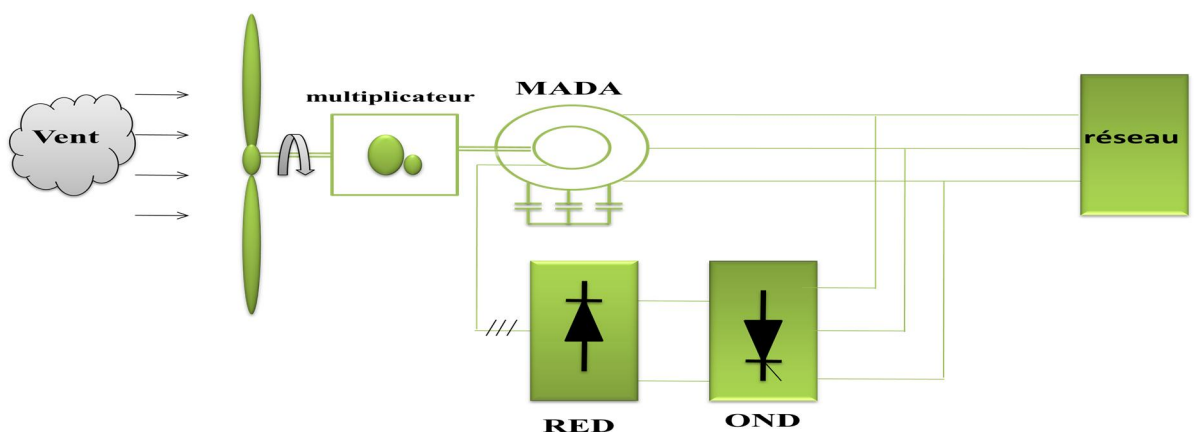


Figure I.14 : *système éolien basé sur une machine asynchrone doublement alimentée.*

I.7.2 Génératrice synchrone :

a) Machine synchrone à rotor bobiné :

Ce type de machine possède l'inconvénient de la nécessité d'une source d'alimentation indépendante de l'inducteur en puissance réactive d'une part, et l'avantage de la possibilité de contrôler le fonctionnement de la machine par l'action directe sur l'alimentation de l'inducteur (tension d'excitation). Un autre inconvénient est la nécessité d'un entretien régulier du collecteur (système bagues-balais).

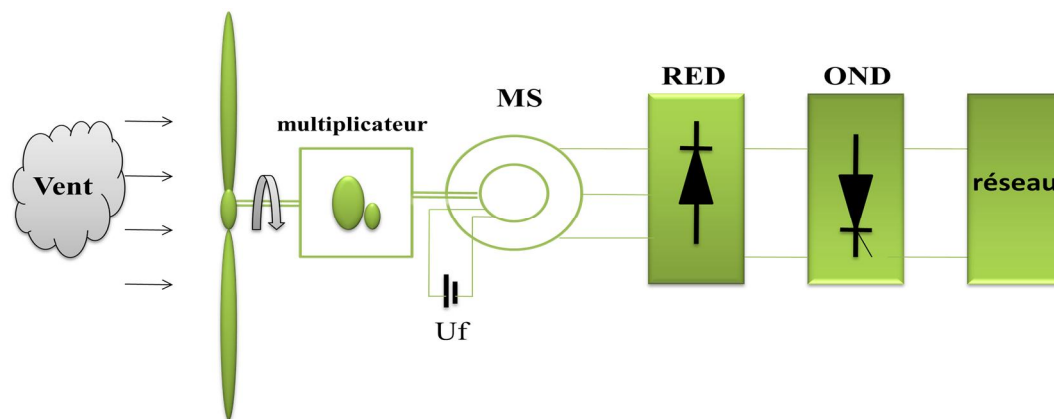


Figure I.15 : *système éolien basé sur une machine asynchrone doublement alimentée*

b) Machine synchrone à aimant permanents (MSAP) :

Les systèmes de conversion basés sur des machines synchrones à aimant permanents à grand nombre de pôles, sont caractérisés par l'absence du multiplicateur de vitesse. Ce mode de transmission de puissance (transmission directe) offre un couple massique suffisant pour garantir l'entraînement de la machine. La machine synchrone à aimant permanents est la plus performante de toutes les machines existantes. D'une part son aimantation permanente à plusieurs pôles lui permet d'éliminer plusieurs sièges de pertes de puissance et de bruits, notamment le système bague et balais et le multiplicateur de vitesse. Cependant, le contrôle de l'excitation rotorique devient impossible. Elles ne nécessitent presque aucun entretien. L'inconvénient unique de ces machines est la matière rare de l'aimant et son coût élevé. Une association de ces éoliennes à une électronique de puissance garantit les performances énergétique en terme de signal induit, et encore le moindre coût de ces installations. C'est ce qui fait en ces éoliennes le premier rival des éoliennes MAS et MADA [26].

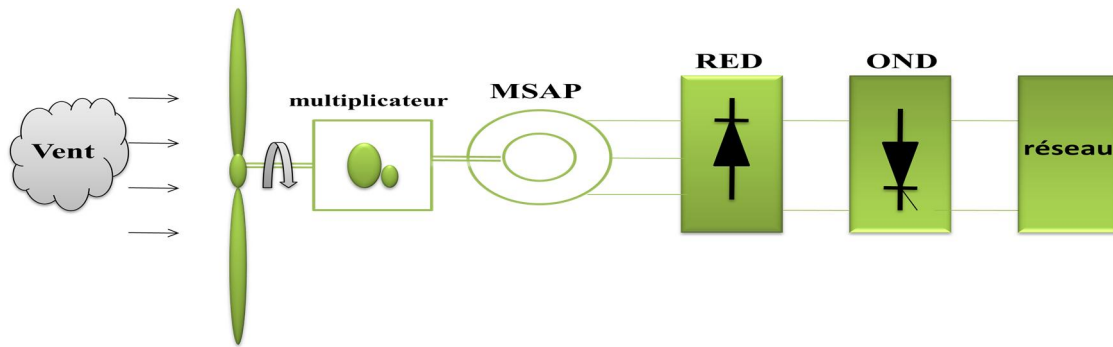


Figure I.16 : *système éolien basé sur une machine synchrone à aimant permanent MSAP relié au réseau*

b) Machine à reluctance variable (MRV) :

Les génératrices à reluctances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation. Elles sont principalement destinées aux éoliennes qui exigent des vitesses relativement grandes ou bien des entraînements lents avec un couple mécanique important. L'application des machines à reluctance variable à la production éolienne sont plutôt rare car elles sont encore en cours d'étude. Ce type de machine pourrait être un candidat de futures éoliennes.

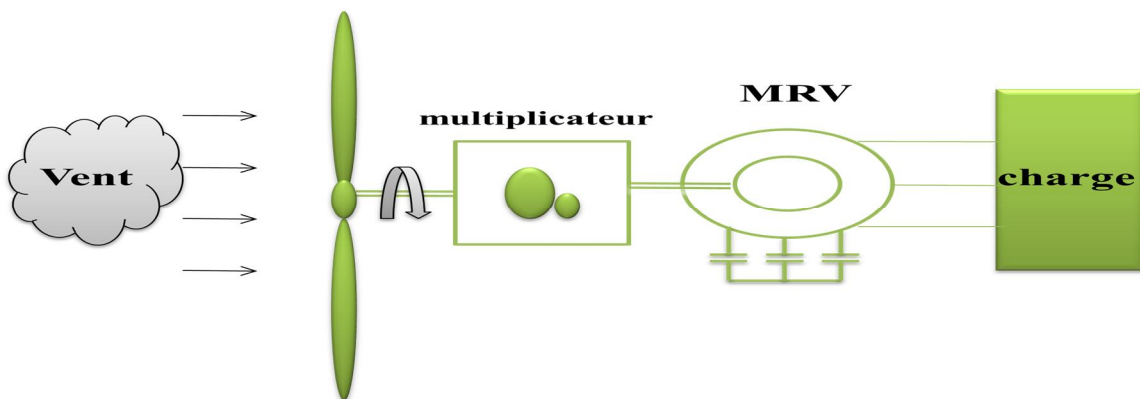


Figure I.17 : *Système éolien basé sur une machine à reluctance variable*

I.8 Motif de choix de la machine asynchrone :

- La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique.
- Le multiplicateur de vitesse du mouvement ainsi qu'un émetteur de bruit important. Le système bagues-balais qui nécessite une source d'alimentation indépendante et un entretien régulier.

I.9. Conclusion :

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables.

On peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

Vue l'importance de l'énergie éolienne on s'intéressera dans les chapitres suivants à la conception et la simulation d'un modèle pédagogique d'une éolienne avec une génératrice asynchrone à cage d'écureuil dédiée à une charge autonome.

Introduction :

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées [28]. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique.

Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionnement autonome.

Il existe deux types de machine asynchrone : la machine asynchrone à cage d'écureuil et la machine asynchrone à rotor bobiné.

Dans ce chapitre nous allons nous intéresser à la machine asynchrone à cage d'écureuil, la plus utilisée dans les éoliennes tournant à une vitesse constante, en partant d'un certain nombre hypothèses simplificatrices pour la modélisation mathématique de la machine, ainsi que la simulation du fonctionnement de l'éolienne.

II.2. Schéma de la structure choisie

La figure ci-dessous, représente un système éolien en fonctionnement autonome basé sur la machine asynchrone à cage d'écureuil, alimentant une charge (figure (II.1)). Le choix de cette structure est justifié d'abord : par la robustesse, la fiabilité et le prix de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil demeure largement répondu ajouté a ça l'aspect des petites unités de production, celui-ci est très important car il permet d'assurer l'alimentation de site isolé et/ou autonome ou encore pour être exploité dans un milieu urbain (cas d'architectures a axe vertical)[30].

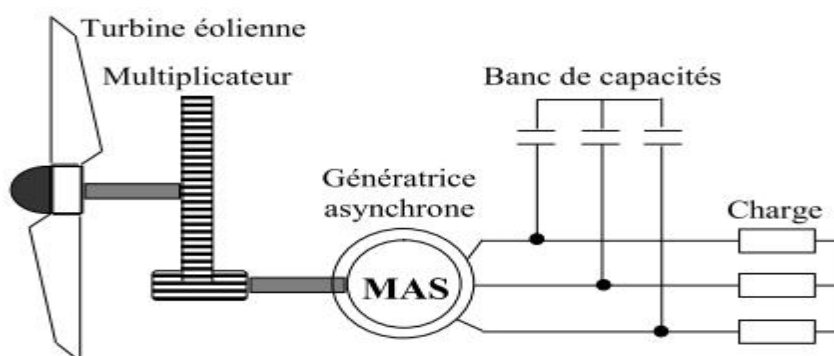


Figure II. 1: *Machine asynchrone auto-excitée avec batterie de condensateurs.*

II.1. Modélisation de la partie mécanique :

II.1.1. Modèle du vent :

Le vent peut être modélisé par une simple loi exponentiel jusqu'à des distributions spectrales est spatiales très complexes qui tient compte de sa phénoménologie turbulente.

Les vents les plus intéressants qui donnent le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s. [2]

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. [27].

La vitesse de vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps , elle est modélisée sous forme aléatoire par une somme de plusieurs harmoniques [27]

$$V_v(t) = 10 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.2656t) + \sin(1.2930t) + 0.2\sin(53.6645t).$$

II. 1. 2. Modèle de la turbine éolienne :

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active S de l'éolienne est donnée par la Figure (II- 3):

$$p_{vent} = \frac{1}{2} \rho S_{eolienne} V_{vent}^3 \quad (\text{II.1})$$

Avec :

ρ : La masse volumique de l'air (1.25kg / m³),

V_{vent} : La vitesse du vent .

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne, on utilise la vitesse réduite (spécifique) λ qui est le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine ramenée à la vitesse de vent, soit :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_{vent}} \quad (\text{II.2})$$

R : Le rayon des pales de l'éolienne,

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent (p_{vent}).

La puissance du vent et la puissance extraite par l'éolienne $p_{eolienne}$ peuvent s'exprimer en fonction du coefficient de puissance c_p

$$P_{eolienne} = C_p * P_{vent}$$

Le coefficient de puissance C_p est souvent issu de mesures pratiques.

L'étude d'une éolienne particulière a permis de déduire la formule empirique :

$$c_p(\lambda) = -0.2121 * \lambda^3 + 0.0856 * \lambda^2 + 0.2539 * \lambda \quad (\text{II.3})$$

La figure (II.2) représente le coefficient de puissance C_p (calculé à partir de l'équation $C_p(\lambda)$) en fonction du rapport de vitesse λ où apparaît un maximum de 0.15 pour une vitesse réduite de 0.78. Afin d'optimiser la conversion de puissance, il faut donc essayer de conserver cette vitesse réduite, c'est-à-dire modifier la vitesse de rotation lorsque la vitesse du vent varie.

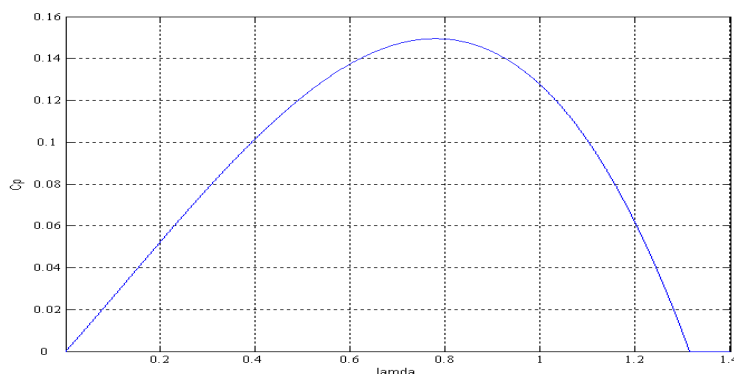


Figure II.2 : courbe $c_p(\lambda)$ de la voilure étudiée de type Savonius

$$C_{eol} = J_t \frac{d\Omega}{dt} + C_{em} + f_m \Omega \quad (\text{II.4})$$

Avec :

f_m : le coefficient de frottement de la machine,

C_{eol} : le couple statique fournie par l'éolienne.

Dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure ne sera pas pris en compte). Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne.

II. 1. 3. Modélisation du générateur éolien (Axe vertical):

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à vitesse variable couplée directement à une génératrice asynchrone à cage d'écureuil raccordée à un bus continu.

$S_{eolienne}$: La surface utile traversée par le vent.

ρ : La masse volumique de l'air (1.25kg / m³).

V_{vent} : La vitesse du vent.

On s'intéresse en premier temps dans notre travail au fonctionnement d'une turbine à axe vertical. La valeur de la surface active (S) de notre éolienne à axe vertical de type Savonius a été remplacée par les dimensions géométrique de la voilure selon la figure (II.3) ou :

$$S=2*R*H \quad (\text{Voir Figure II- 3})$$

Avec

H : la hauteur de la turbine,

R : le rayon de la turbine.

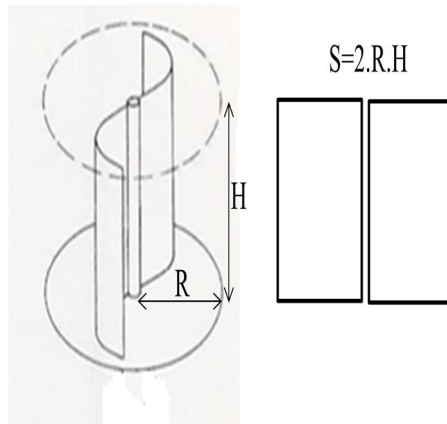


Figure II- 3 : Dimensionnement géométrique de la voilure Savonius

A partir de sa puissance, le couple de éolienne est donc donné par :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega} \quad \text{(II.5)}$$

▪ **Cas d'un générateur éolien (Axe horizontal) :**

Pour simuler la turbine, on utilisera la relation du couple associée à la caractéristique $C_p(\lambda)$, Le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante [1] :

$$T_t = \frac{1}{2} C_p \rho S \frac{v^3}{G \Omega_t} \quad \text{(II.6)}$$

Avec: $S = \pi R_t^2$

• **Maximisation de puissance (MPPT) :**

On cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant la courbe $C_p(\lambda)$. Cette caractéristique qui est de forme parabolique admet un maximum $C_{P_{max}}$ pour λ_{opt} . La vitesse de la génératrice est asservie à une référence issue d'un algorithme permettant l'extraction maximale de la puissance [1], cela pour $C_p = 0.46$ et $\lambda = 9$.

Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking.

Le tracé de l'allure $C_p = f(\lambda)$, pour cette turbine est représenté dans la figure ci-dessous.

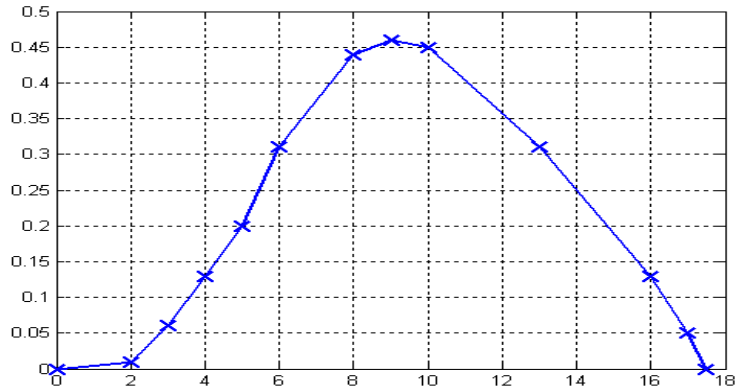


Figure II- 4: courbe $c_p(\lambda)$ de la voilure étudiée de type horizontale

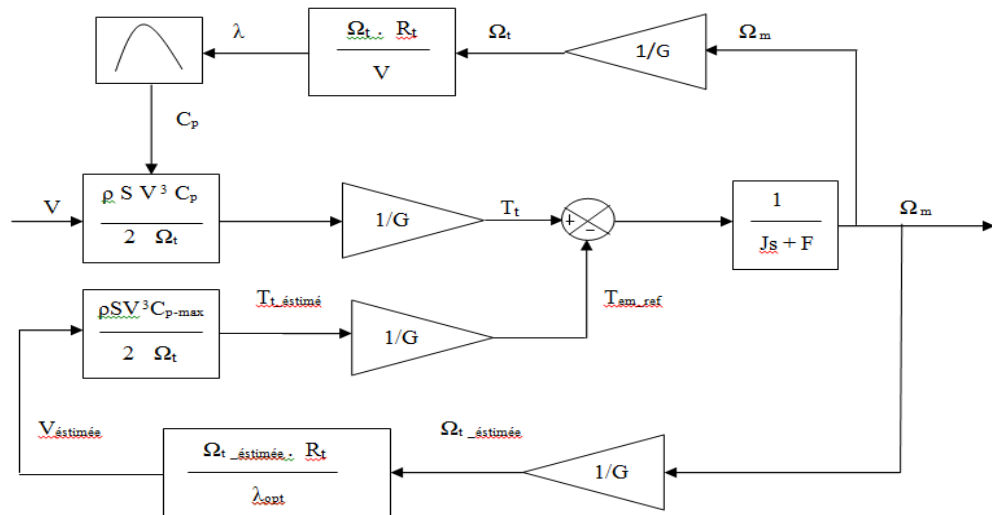


Figure II- 5: Schéma d'un algorithme MPPT.

II. 1. 4. Modélisation du multiplicateur de vitesse :

La tâche principale du multiplicateur de vitesse est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. Il est modélisé par les deux équations suivantes : [28]

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (II.7)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega}{G} \quad (II.8)$$

Avec :

- G, le gain du multiplicateur.
- T_{em} , le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone.
- T_t , le couple développé par la turbine sous l'action du vent.
- Ω , est la vitesse mécanique de la génératrice.
- Ω_t , est la vitesse de la turbine.

II-2. Modélisation de la génératrice asynchrone linéaire dans le repère triphasé :

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique d'où la simplicité de leur entretien.

Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionnement autonome.

La machine est entraînée par une turbine éolienne. A ce moment le couple appliqué va l'entraîner un peu plus vite que le champ tournant donnée par :

$$\Omega_s = \frac{60.f}{P} \quad (\text{II.9})$$

Dans ce cas, le glissement de la machine définie par $g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}$ est négatif.

Avec :

- Ω_r : vitesse de rotation du rotor .
- f : fréquence du champ tournant .
- p : nombre de paires de pôles .

II.2.1 Hypothèses simplificatrices :

La machine asynchrone avec la répartition de ses enroulement et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices.

- On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordres linéaires. 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 sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.m.m est distribuée sinusoidalement 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 (constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoidales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré.

II. 2. 2. Equations générales de la machine asynchrone :

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme l'indique la figure **Figure (II. 6)**, les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles même.

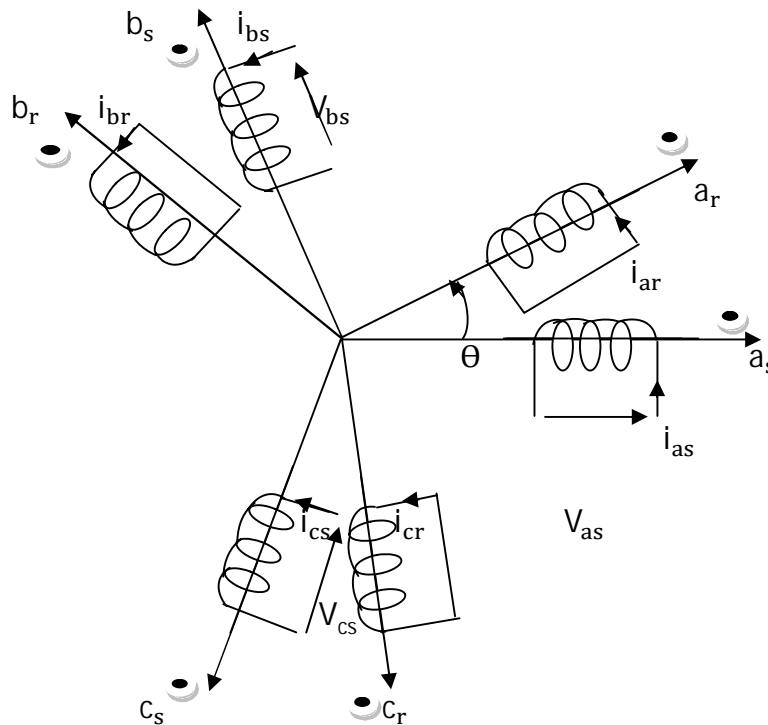


Figure II. 6 : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques.

Les équations générales des tensions de la machine asynchrone s'obtiennent en considérant que la tension appliquée à chacun des enroulements, est la somme de la chute de tension ohmique et de la chute de tension inductive :

Loi de FARADAY :

$$V = R \cdot i + \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.10})$$

Pour une phase statorique, on a :

$$[v_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.11})$$

Pour une phase rotorique, on a :

$$[v_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$[v_{sabc}] = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad [v_{rabc}] = \begin{bmatrix} v_{ra} \\ v_{rb} \\ v_{rc} \end{bmatrix}$$

Sont respectivement les vecteurs des tensions statoriques et rotoriques.

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}$$

Sont respectivement les vecteurs des courants statoriques et rotoriques.

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Sont respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Puisque le rotor est court-circuité, la tension à ses bornes est nulle. La relation (II. 13) s'écrit :

$$[v_{rabc}] = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] = 0 \quad (\text{II.13})$$

II. 2. 3. Modèle de la machine dans le repère de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repère dq. L'application de la transformation de Park, assure l'invariance de la puissance instantanée lors du changement du repère.

Pour une variable $[X_{abc}]$ sa transformée est donnée par :

$$[X_{dqo}] = [P(\delta)] \cdot [X_{abc}] \quad (\text{II.14})$$

Où :

$$[P(\delta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\delta) & \cos(\delta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\delta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\delta) & -\sin(\delta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\delta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$[X_{abc}] = [P(\delta)]^{-1} \cdot [X_{dqo}]$$

Avec :

$\delta = \theta_s$ pour les grandeurs statoriques.

$\delta = \theta_r$ pour les grandeurs rotoriques.

On appliquant cette transformée aux équations précédentes, on aura :

$$[v_{sdqo}] = [R_s] \cdot [i_{sdqo}] + [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.16})$$

$$[v_{rdqo}] = [R_r] \cdot [i_{rdqo}] + [P(\theta_r)] \cdot \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \quad (\text{II.17})$$

Avec :

θ_s et θ_r sont respectivement les angles électriques que forment les axes des phases statorique et rotorique avec les axes « d » et « q ».

En développant l'équation (II.16), on aura :

$$[v_{sdqo}] = [R_s] \cdot [i_{sdqo}] + [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} \{ [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [P(\theta_s)] \cdot [\Phi_{sabc}] \} \quad (\text{II.18})$$

$$[v_{sdqo}] = [R_s] \cdot [i_{sdqo}] + [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} \{ [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\Phi_{sdqo}] \} \quad (\text{II.19})$$

En dérivant, on aura:

$$[v_{sdqo}] = [R_s] \cdot [i_{sdqo}] + [P(\theta_s)] \cdot \{ [\Phi_{sdqo}] \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} + [P(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} [\Phi_{sdqo}] \} \quad (\text{II.20})$$

$$[v_{sdqo}] = [R_s] \cdot [i_{sdqo}] + [P(\theta_s)] \cdot \{ \left[\frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} \right] [\Phi_{sdqo}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdqo}] \} \quad (\text{II.21})$$

On a:

$$[P(\delta)] \left\{ \frac{d}{dt} [P(\delta)]^{-1} \right\} = \frac{d\delta}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{d\delta}{dt} \cdot [T] \quad (\text{II.22})$$

Donc, en développant chaque ligne des matrices, on aura :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} \quad (\text{II.23})$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\theta_s}{dt} \cdot \Phi_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} \quad (\text{II.24})$$

On procède de la même manière pour avoir les équations électriques liées au rotor :

$$v_{rd} = R_r \cdot i_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} \quad (\text{II.25})$$

$$v_{rq} = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\theta_r}{dt} \cdot \Phi_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} \quad (\text{II.26})$$

Dans un système triphasé équilibré et en régime sinusoïdal, les composantes homopolaires sont nulles (voir les hypothèses simplificatrices).

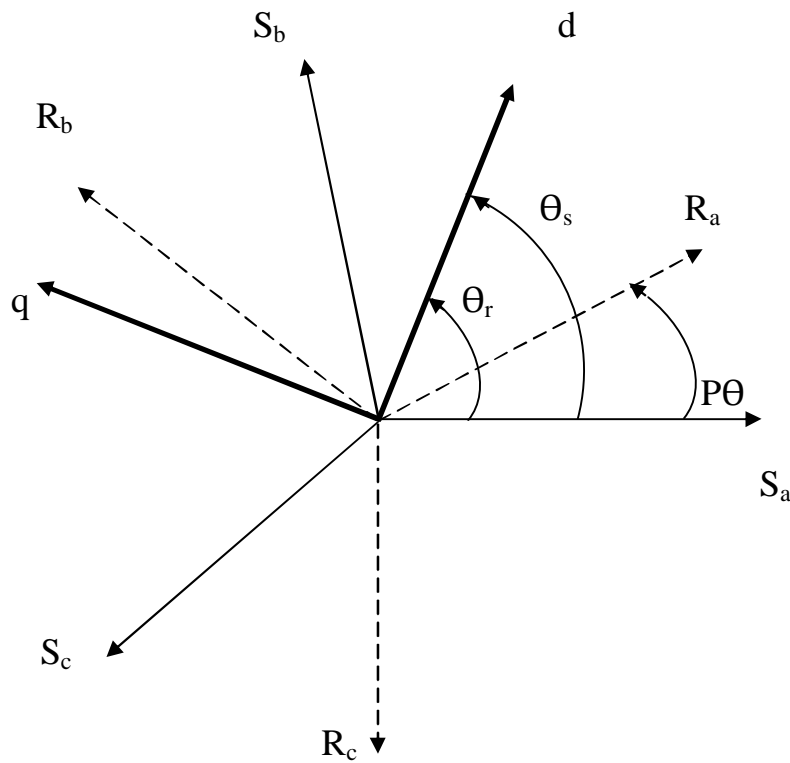


Figure II. 7 : *Repère angulaire du système d'axes (dq).*

Le couple électromagnétique est donné par :

$$T_{em} = p (\Phi_{sd} \cdot i_{sq} - \Phi_{sq} \cdot i_{sd}) = p (\Phi_{rd} \cdot i_{rq} - \Phi_{rq} \cdot i_{rd}) = p \frac{M}{L_r} (\Phi_{rd} \cdot i_{sq} - \Phi_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II.27})$$

Il peut être aussi exprimé en fonction des courants :

$$\mathbf{T}_{em} = p \mathbf{M}(\mathbf{i}_{sq} \cdot \mathbf{i}_{rd} - \mathbf{i}_{sd} \cdot \mathbf{i}_{rq}) \quad (\text{II.28})$$

La puissance active est donnée par :

$$P_a = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \quad (\text{II.29})$$

La puissance réactive est donnée par :

$$Q = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq} \quad (\text{II.30})$$

L'expression des flux statoriques et rotoriques en fonction des courants, dans le repère de Park est donnée par :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Avec:

- $L_s = l_s + M$: inductance cyclique statorique.
- $L_r = l_r + M$: inductance cyclique rotorique.

II. 2. 4. Choix du repère (dq) :

Il est plus intéressant d'écrire les équations dans un référentiel lié soit au stator, soit au rotor, ou au champ tournant, selon les objectifs de l'application. Or le repère (dq) est mobile. Donc il nous appartient de calculer les angles des transformations de Park θ_s et θ_r pour effectuer les rotations. On peut alors le lier à un référentiel mobile comme le champ tournant qui est créé par le bobinage statorique et qui tourne, en régime permanent, à la vitesse de synchronisme. Nous choisissons de fixer le repère (dq) au rotor.

On note :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} : \text{pulsation statorique.}$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} : \text{pulsation rotorique}$$

Et $\omega_m = \omega_s - \omega_r = \frac{d\theta}{dt} : \text{pulsation mécanique .}$

Donc on remplace les expressions de flux (II. 31) dans les équations de tension on obtient le système matriciel suivant :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \Phi_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} & \text{(II. 32)} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \Phi_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} & \text{(II. 33)} \\ 0 = R_r i_{rd} - \omega_r \Phi_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} & \text{(II. 34)} \\ 0 = R_r i_{rq} + \omega_r \Phi_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} & \text{(II. 35)} \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_r M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix}$$

La résolution de ce système d'équations matricielles nous donne les expressions des courants statorique et rotoriques suivants :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = 1/L_s [V_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_s L_s i_{sq} + \omega_s M i_{rq} - M di_{rd}/dt] \\ \frac{di_{sq}}{dt} = 1/L_s [V_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_s L_s i_{sd} - \omega_s M i_{rd} - M di_{rq}/dt] \\ \frac{di_{rd}}{dt} = -1/L_r [R_r i_{rd} - \omega_r L_r i_{rq} - \omega_r M i_{sq} + M di_{sd}/dt] \\ \frac{di_{rq}}{dt} = -1/L_r [R_r i_{rq} - \omega_r L_r i_{rd} - \omega_r M i_{sq} + M di_{rq}/dt] \end{cases} \quad \text{(II.36)}$$

II.3. Modélisation de la génératrice asynchrone saturée :

Dans la plupart des cas le modèle linéaire de la machine asynchrone est suffisant pour obtenir des bons résultats dans l'analyse des régimes transitoires (démarrage...). Ce modèle considère que l'inductance magnétisante est constante, ce qui n'est pas tout à fait vrai, car le matériau magnétique utilisé pour la fabrication n'est pas parfaitement linéaire.

Cependant dans certaines utilisations de la machine asynchrone (alimentation avec onduleur, génératrice auto-excitée, éoliennes), il est très indispensable de tenir compte de l'effet de la saturation du circuit magnétique et donc de la variation de l'inductance magnétisante [30].

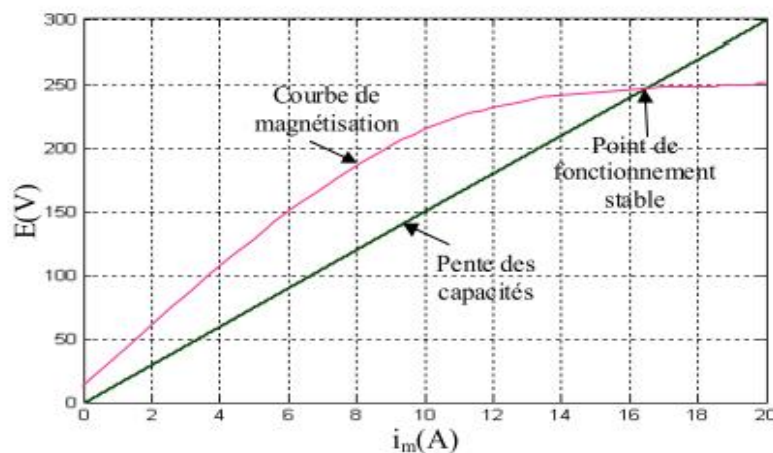


Figure II.8 : Exemple de courbe de magnétisation d'une machine asynchrone [30].

Il existe plusieurs modèles continus d'approximation de l'inductance de magnétisation, parmi ces modèles : le modèle en puissance, le modèle en arc tangente, le modèle en tangente hyperbolique et le modèle polynomiale, on s'intéresse dans notre travail au modèle d'approximation polynomiale de degré 12.[30]

II.3.1. Modèle diphasé de la machine asynchrone saturée :

Différentes méthodes de modélisation peuvent être envisagées. Certaines d'entre elles sont plus appropriées pour décrire tel ou tel phénomène avec le meilleur compromis précision/temps de calcul.

Nous trouvons dans la littérature principalement trois approches de modélisation des machines électriques :

- La modélisation par éléments finis, (très lent en calcul, mais plus précise)
- La modélisation par réseaux de perméances, (temps de calcul approprié, mais difficile de représenter l'entrefer de la machine)
- La modélisation par les circuits électriques (extension du modèle de Park, le plus adapté) ; c'est ce modèle que nous allons utiliser dans ce qui suit.

Le modèle linéaire précédent est étendu pour tenir compte de la saturation [4]. La procédure utilisée consiste à associer le phénomène de la saturation à la variation d'une inductance de magnétisation L_m .

Les équations liant les flux sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{md} \\ \Phi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{mq} \\ \Phi_{rd} = -L_r i_{rd} + (L_m + L_r) i_{md} \\ \Phi_{rq} = -L_r i_{rq} + (L_m + L_r) i_{mq} \end{array} \right. \quad (\text{II.37})$$

$$\text{Avec:} \quad i_m = \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} \quad (\text{II.38})$$

$$L_m = \frac{|\Phi_m|}{|i_m|} \quad (\text{II.39})$$

L_m est appelé « inductance magnétisante » l'épaisseur de l'entrefer étant supposée constante, L_m en fonction du courant est identique suivant les deux axes d et q [29].

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = \frac{d}{dt} (L_s * i_{sd} + L_m * i_{md}) \quad (\text{II.40})$$

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = L_s \frac{di_{sd}}{dt} + L_m \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} \frac{dL_m}{dt} \quad (\text{II.41})$$

Comme L_m varie avec le module de $|i_m|$ l'équation sous mettre sous la forme suivante :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = L_s * \frac{di_{sd}}{dt} + L_m * \frac{di_{md}}{dt} + i_{md} * L'_m \frac{d|i_m|}{dt} \quad (\text{II.42})$$

$$L'_m = \frac{dL_m}{d|i_m|} \quad (\text{II.43})$$

Sachant que :

$$\frac{di_m}{dt} = \frac{d}{dt} \sqrt{i_{md}^2 + i_{mq}^2} = \frac{i_{md}}{|i_m|} * \frac{di_{md}}{dt} + \frac{i_{mq}}{|i_m|} * \frac{di_{mq}}{dt}$$

$$L_{md} = L_m + L'_m \frac{i_{md}^2}{|i_m|} \quad (\text{II.44})$$

$$L_{mq} = L_m + L'_m \frac{i_{mq}^2}{|i_m|} \quad (\text{II.45})$$

$$L_{dq} = L'_m \frac{i_{md} * i_{mq}}{|i_m|} \quad (\text{II.46})$$

L_{md} et L_{mq} represente les inductances magnetisantes dynamiques suivant les axes

d et q Dans le cas d'une caracteristique lineaire des materieaux $L_{md} = L_{mq} = \text{cste}$

L_{dq} est l'inductance de l'effet croise exprime la variation de L_m en fonction de i_{md} et i_{mq}

Dans l'hypothèse de la linéarisation des matériaux $L_{dq} = 0$

En remplaçant les flux par leurs expressions en fonction des courants statoriques et rotoriques,

on aura [30].

Systeme matriciel :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -W_s * L_s & 0 & -W_s L_m \\ W_s L_s & R_s & W_s L_m & 0 \\ -R_r & W_r L_r & R_r & -W_r * (L_r + L_m) \\ -W_r L_r & -R_r & W_r * (L_r + L_m) & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{md} \\ I_{mq} \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m + (L'_m I_{md}^2 / I_m) & L'_m * I_{md} * I_{mq} / I_m \\ 0 & L_s & L'_m * I_{md} * I_{mq} / I_m & (L_m + L'_m) I_{mq}^2 / I_m \\ -L_r & 0 & L_r + L_m + L'_m * I_{md}^2 / I_m & (L'_m * I_{md}) * I_{mq} / I_m \\ 0 & -L_r & L_m * I_{md} * I_{mq} / I_m & (L_r + L_m + L'_m) I_{mq}^2 / I_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d/dt I_{sd} \\ d/dt I_{sq} \\ d/dt I_{md} \\ d/dt I_{mq} \end{bmatrix}$$

Dans le modèle développé ci-dessus les courants rotoriques ne sont plus explicites mais sont inclus implicitement dans les expressions des courants magnétisants (I_{md} et I_{mq}) [30].

II.3.2. Etude d'un système de conversion autonome :

- **La machine asynchrone auto-excitée :**

Un dispositif basé sur une machine asynchrone auto-excitée par un banc de capacités directement connecté sur une charge est le seul qui nous permet d'obtenir un fonctionnement purement autonome. Le phénomène d'auto-excitation est en revanche difficile à maîtriser car les variations de charge influent directement sur les valeurs de la tension et la fréquence délivrées. Afin de déterminer les performances et les limites de fonctionnement de ce dispositif, un modèle de la machine est établi dans un repère diphasé. Le modèle de la charge et des capacités d'auto-excitation (équilibrés ou non) est également établi de façon complètement indépendante du modèle de la machine.

Machine asynchrone auto-excitée par condensateurs fixes :

L'utilisation de la machine asynchrone a cage connectée à des capacités a des avantages de la simplicité de mise en œuvre et le faible coût du à l'absence de convertisseurs statiques cependant cette configuration admet des limites de fonctionnement qu'il faut prendre en compte, notamment les variations d'amplitudes et de fréquence des tensions lors de la variation de la charge et de la vitesse, par ailleurs il faut prendre des précautions et éviter de surcharger la machine au risque de la démagnétiser. Cela nécessiterait une intervention externe ou une phase de fonctionnement spécifique afin de la remagnétiser.

Il existe plusieurs configurations pour connecter les condensateurs aux bornes de la génératrice.

- On trouve le cas d'une seule capacité suffisante pour que la génératrice puisse alimenter une charge monophasée.
- Un banc de condensateur constitué de 3 capacités connecte en étoile ou en triangle au borne de la génératrice, cela permet d'assurer plus de sûreté de fonctionnement pour le système de production d'énergie éolienne, en cas de défaut dans une phase ou dans un condensateur le système peut fonctionner mais il y'aura une chute de tension du à la diminution de la magnétisation de la génératrice. On retrouve 2 types de structures de connexion :

- Banc de capacités en série avec la charge.

Banc de capacités en parallèle avec la charge.

A vide, les tensions statoriques aux bornes des condensateurs constituent également des inconnues, par conséquent, il faut tenir compte des équations du circuit électrique extérieur [30].

Pour simuler l'auto-amorçage, il suffit de résoudre le système en tenant compte de la tension aux bornes des condensateurs exprimée selon le système d'axes généralisé par :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} V_{ds} = -\frac{1}{c} i_{ds} + \omega_s V_{ds} \\ \frac{d}{dt} V_{qs} = -\frac{1}{c} i_{qs} - \omega_s V_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.47})$$

Cas d'un banc de capacités et une charge équilibrée :

Dans le cas de la présence d'une charge équilibrée cette relation est modifiée pour tenir compte des courants dans la charge est devient alors :

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} V_{ds} = -\frac{1}{c} (i_{ds} + i_{chd}) + \omega_s V_{ds} \\ \frac{d}{dt} V_{qs} = -\frac{1}{c} (i_{qs} + i_{chq}) - \omega_s V_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.48})$$

Enfin, suivant la nature de la charge, on ajoute les équations suivantes :

Dans le cas d'une charge résistive :

$$\begin{cases} V_{ds} = R * i_{chd} \\ V_{qs} = R * i_{chq} \end{cases} \quad (\text{II.49})$$

La condition nécessaire pour l'auto-amorçage est exprimée par :

$$C > \frac{1}{L_s \omega_s^2} \cdot$$

II.3.3. Modélisation du redresseur :

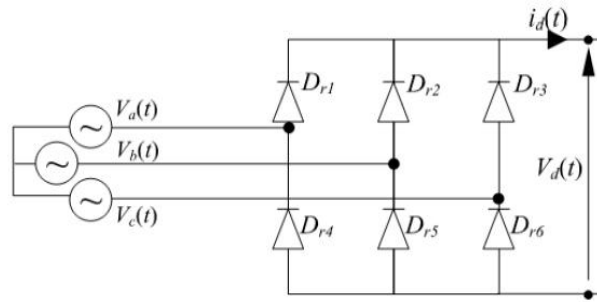


Figure II-9 : *Schéma redresseur triphasé à diodes.*

La réversibilité de l'onduleur de tension à deux niveaux lui permet de fonctionner en redresseur de courant. Les modèles élaborés pour les onduleurs de tension à deux niveaux sont valables pour les redresseurs de tension en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources (réseaux et la charge).

II.3.4. Modèle du redresseur MLI :

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (thyristors) bipolaires antiparallèle avec des diodes (figure II-10). Ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0'. La tension redressée U_{dc} est en fonction des états de ces interrupteurs.

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI – charge et onduleur MLI), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine. Afin de faciliter la modélisation et réduire le temps de simulation, on modélise le redresseur par un ensemble d'interrupteurs idéaux: c'est-à-dire résistance nulle à l'état passant, résistance infinie à l'état bloqué, réaction instantanée aux signaux de commande.

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le côté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le côté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu.

La Figure [II-10]. donne le schéma de principe du redresseur de tension triphasé alimentant le bus continu. Ce bus est entièrement géré par le redresseur, la valeur de la capacité de filtrage doit être suffisante afin d'avoir une tension stable et fixe quel que soit le fonctionnement de la génératrice asynchrone [3], [22], [26].

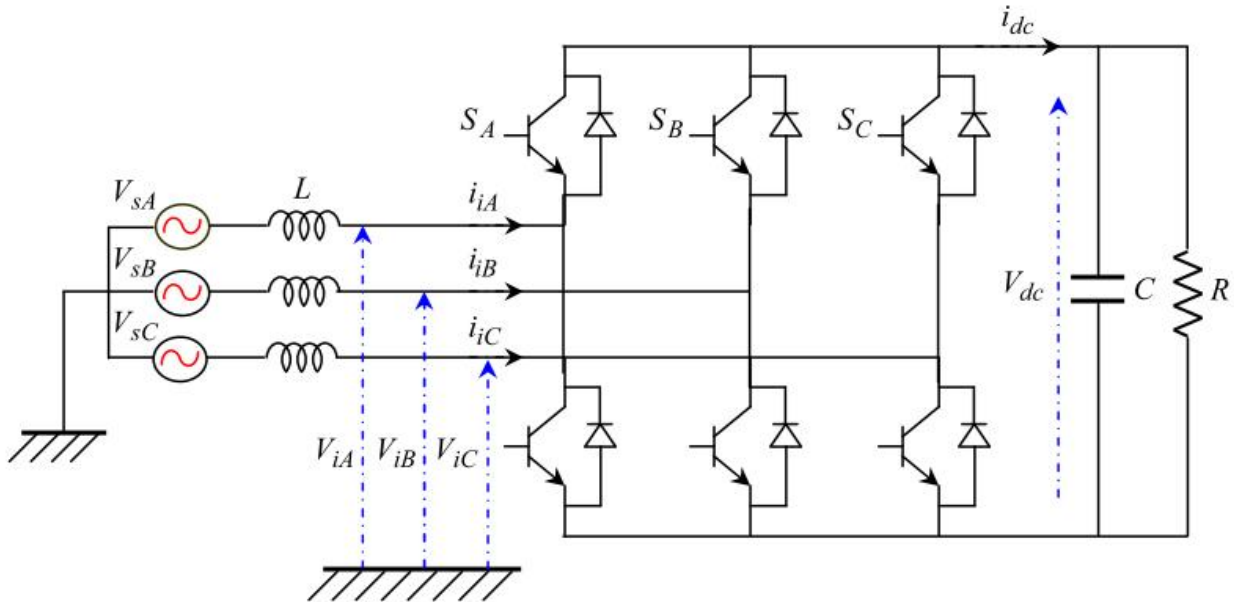


Figure II-10: *Redresseur MLI*

Les équations décrivant le coté alternatif sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{sA} \\ V_{sB} \\ V_{sC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{iA} \\ i_{iB} \\ i_{iC} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{iA} \\ V_{iB} \\ V_{iC} \end{bmatrix}$$

A l'entrée du redresseur, les tensions composées sont données par :

$$\begin{cases} U_{iAB} = V_{iA} - V_{iB} \\ U_{iBC} = V_{iB} - V_{iC} \\ U_{iCA} = V_{iC} - V_{iA} \end{cases} \quad (\text{II.50})$$

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.51})$$

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + i_c S_c \quad (\text{II.52})$$

Avec :

V_{dc} : Tension redressée.

i_{dc} : Courant redressé.

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

II.3.5. Modélisation de l'onduleur :

Il existe plusieurs structures de conversion utilisées dans la machine à double alimentation comme la structure de Kramer qui a utilisé un pont à diodes et un pont à thyristors [32], ainsi que la structure qui consiste à remplacer les onduleurs à commutation naturelle composés de thyristors, par des onduleurs à commutations forcées.

Une autre structure intéressante est celle avec convertisseur MLI utilisée dans plusieurs travaux qui consiste en l'utilisation de deux ponts triphasés d'IGBT command-ables par la modulation de largeur d'impulsions.

Pour simplifier l'étude supposons que [33] :

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- la charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

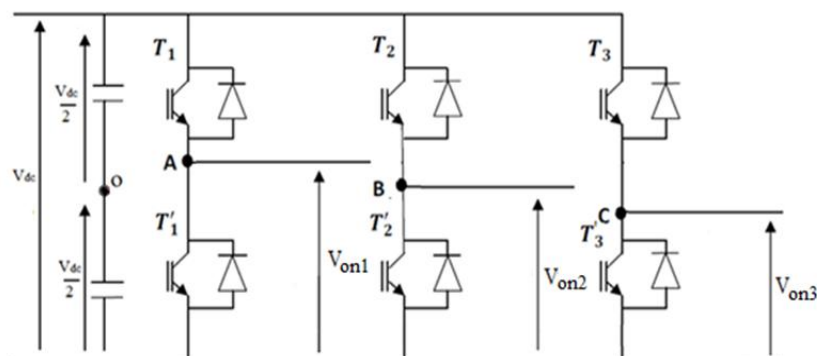


Figure II-11 : Schéma d'un onduleur de tension.

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.53})$$

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} sont les tensions des phases de la charge (valeur alternatives)

V_{no} est la tension de neutre de la charge par rapport au point fictif « o ».

On aura donc :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = 1/3 \cdot V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} .$$

II.3.6. Commande MLI « Modulation de Largeur d'Impulsion » :

La modulation de la largeur d'impulsion est une technique de découplage de tension ou de courant permettant de gérer les formes d'ondes quasi-sinusoïdales en plusieurs créneaux de largeur différentes, d'où le nom de Modulation de largeur d'impulsion.

L'objectif principal de cette technique est de régler l'amplitude et la fréquence du terme fondamentale et de rejeter les harmoniques indésirables générés par une ondulation « pleine onde » vers les fréquences élevées leurs amplitudes devenant alors négligeables. Ils existent différents types de modulation de largeur d'impulsion :

- **MLI naturelle ou interactive** : le calcul des instants de commutation se fait par intersection de signal de référence avec un signal triangulaire
- **MLI avec contrôle d'amplitude** : l'amplitude crête est constante et pour la valeur efficace du fondamental, on agit sur la largeur des impulsions. Pour maintenir $U/f = Cts$, il faut modifier la valeur des angles d'amorçage de MLI pour chaque valeur de vitesse. Ceux-ci sont donc pré-calculés et stockés dans une mémoire.
- **MLI vectorielle** : les instants de commutations sont calculés en ligne.

II. 3. 7. Contrôle des courants par hystérésis :

Le principe de cette méthode est basé sur des interrupteurs du redresseur de telle sorte que les variations du courant dans chaque phase de la génératrice soient limitées dans une bande encadrant les références du courant. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente entre les courants réels et les références ; les sorties des comparateurs sont liées à la logique de

commande du redresseur de manière à imposer une commutation des interrupteurs lorsque le courant s'écarte à la valeur d'hystérésis près de sa référence. (cette technique est mise en application dans ce mémoire).

Le principe de cette technique de contrôle est donné dans la figure ci- après.

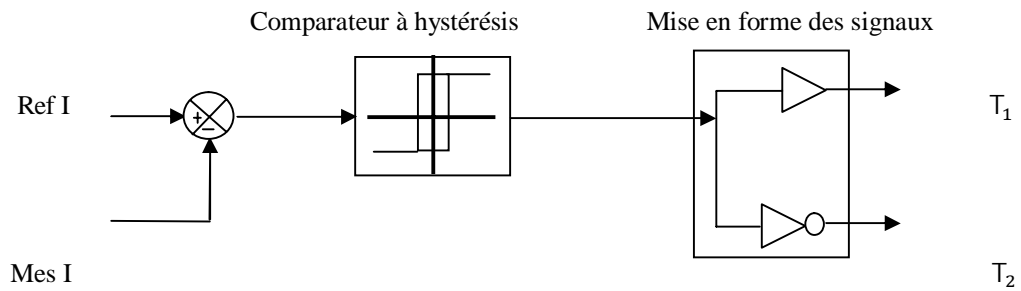


Figure II. 12: *Principe de la commande à hystérésis.*

II. 4. Simulation en boucle ouverte avec le Régime linéaire :

Pour $C = 55\mu\text{F}$ on retrouve les résultats suivants et une vitesse de vent = 10 m/s .

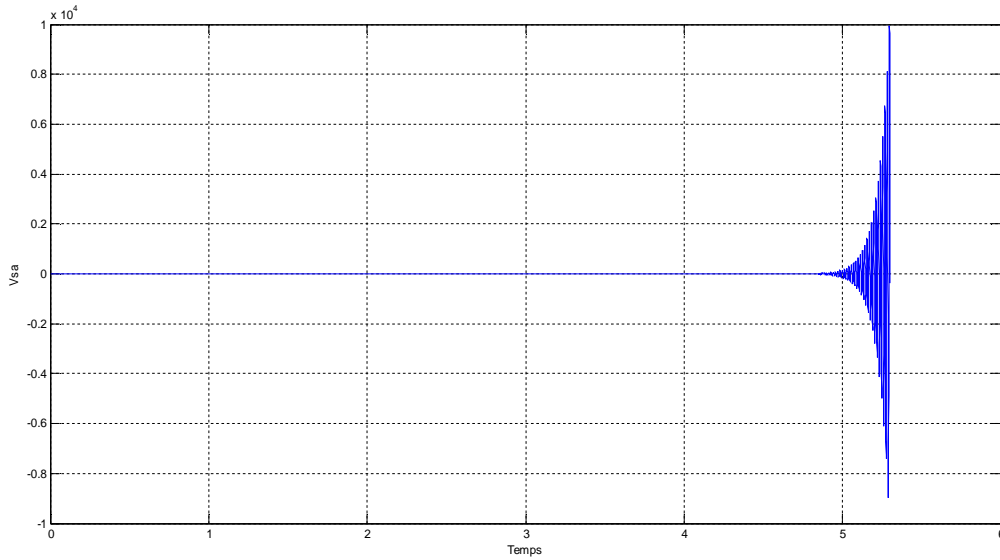


Figure II-13: Tension statorique.

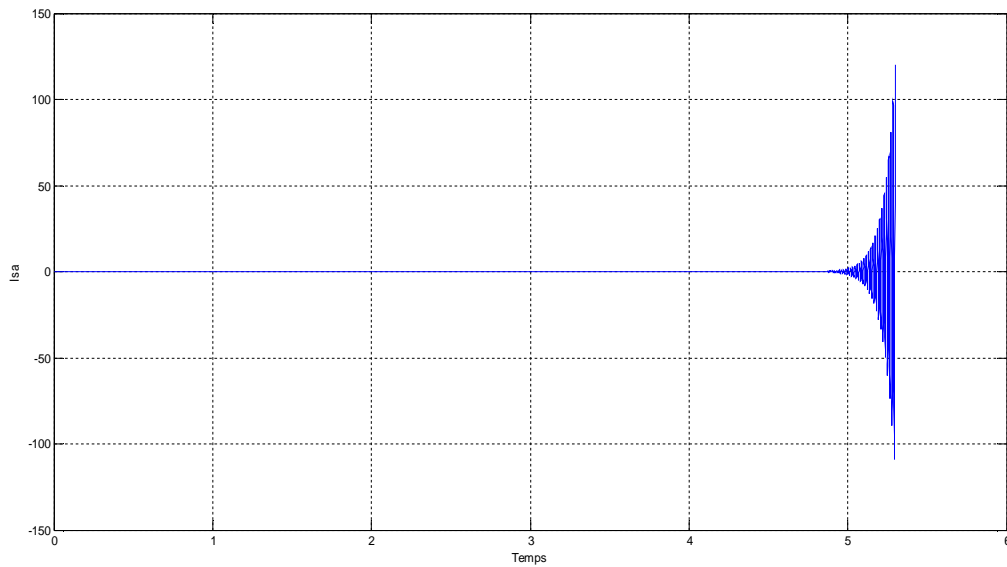


Figure II-14: Courant statorique

Nous remarquons que la tension et le courant statorique et rotorique divergent, cela à cause des hypothèses faites au début de la modélisation à savoir la linéarité du circuit magnétique qui n'est pas vraie dans la pratique et qui est indispensable au fonctionnement de la machine asynchrone en mode générateur asynchrone.

III.4.1. Simulation en boucle ouverte avec le régime saturé:

Dans le cas où une charge purement résistive R est connectée au stator de la machine, le schéma équivalent par phase de l'ensemble machine - capacité d'auto-excitation - charge peut alors être modifié de façon à pouvoir exploiter les équations précédentes d'autoamorçages à vide à fin de simplifier les calculs. Ainsi on retrouve une nouvelle résistance « R » en série avec R_s et une nouvelle capacité qui nous donne la configuration à vide.

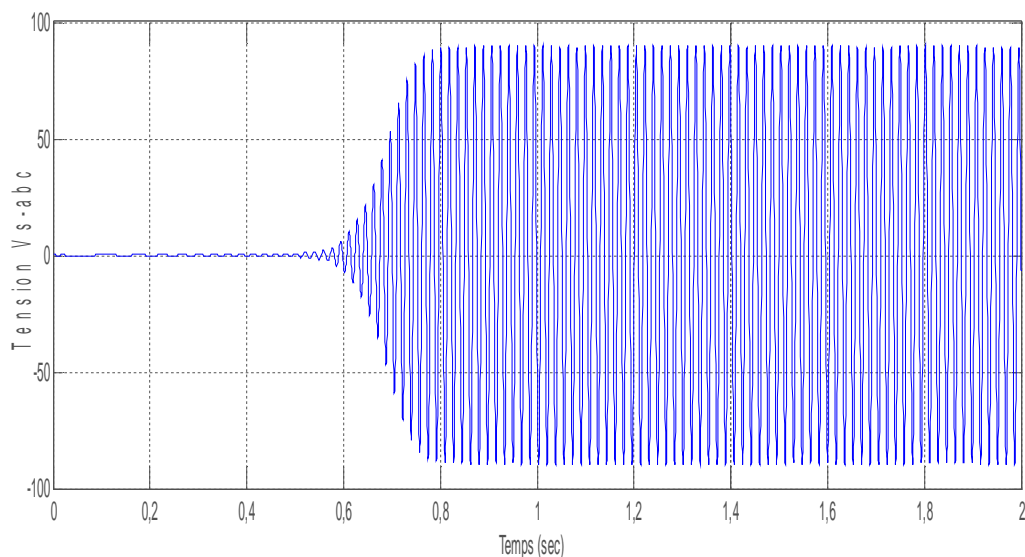


Figure II-15: Tension statorique à vide.

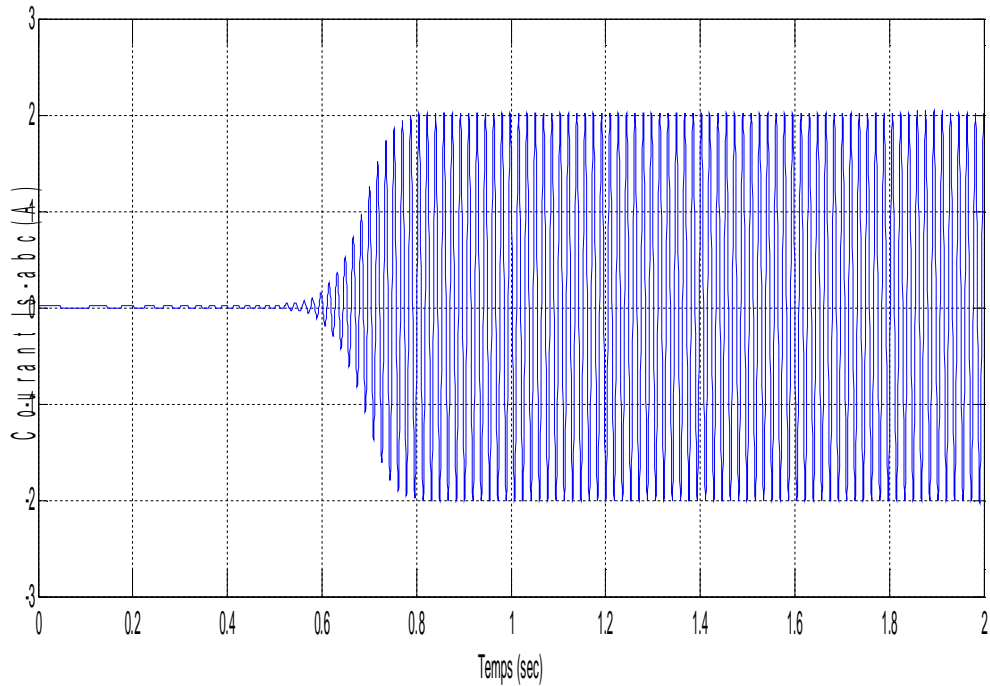


Figure II-16 : Courant statorique à vide.

- **Essai avec charge purement résistive :**

A l'instant $t = 2s$ on branche brusquement une charge résistive de 75 ohm au borne de la génératrice et les résultats obtenus sont ci-dessous on remarque que la tension diminue à l'instant de l'introduction de la charge (**Figure II-17**).

De même, le courant diminue en raison de l'appel du courant par la charge. (**Figure II-18**).

Par contre le courant de magnétisation suit de la même manière l'allure de la tension il diminue à l'instant du brachement de la charge (**Figure II-22**).

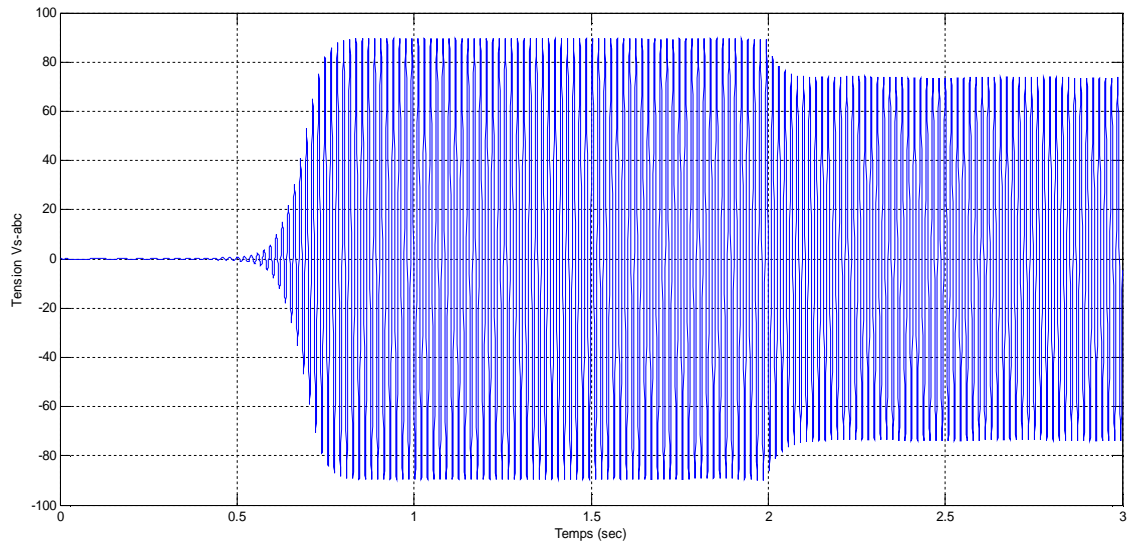


Figure II-17: *Tension statorique en charge.*

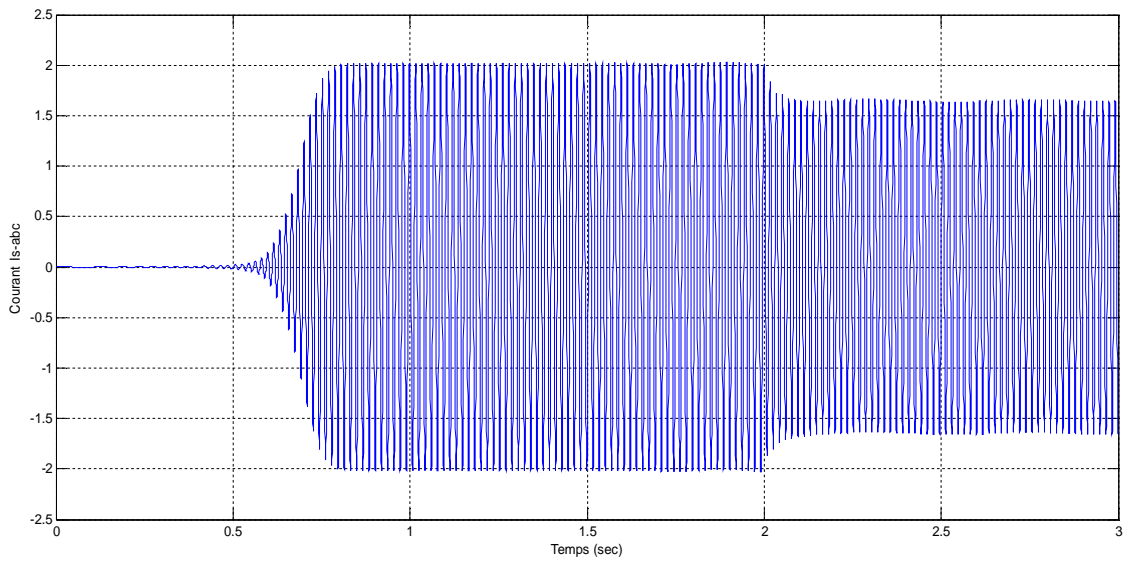


Figure II-18 : *Variation du courant statorique en charge.*

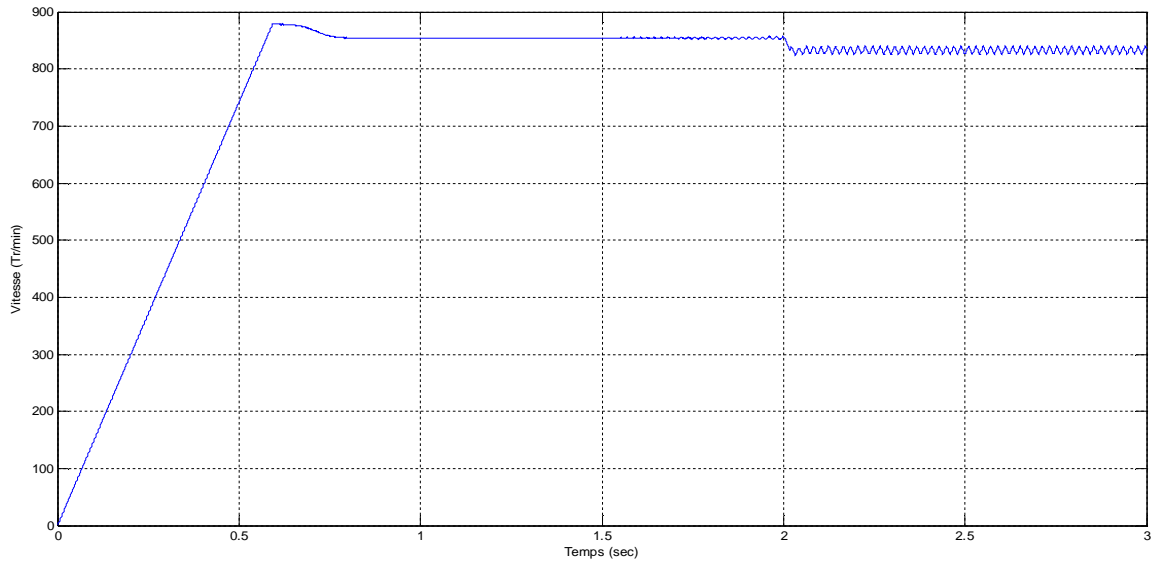


Figure II-19 : *influence de la charge sur la vitesse mecanique en(tr/min).*

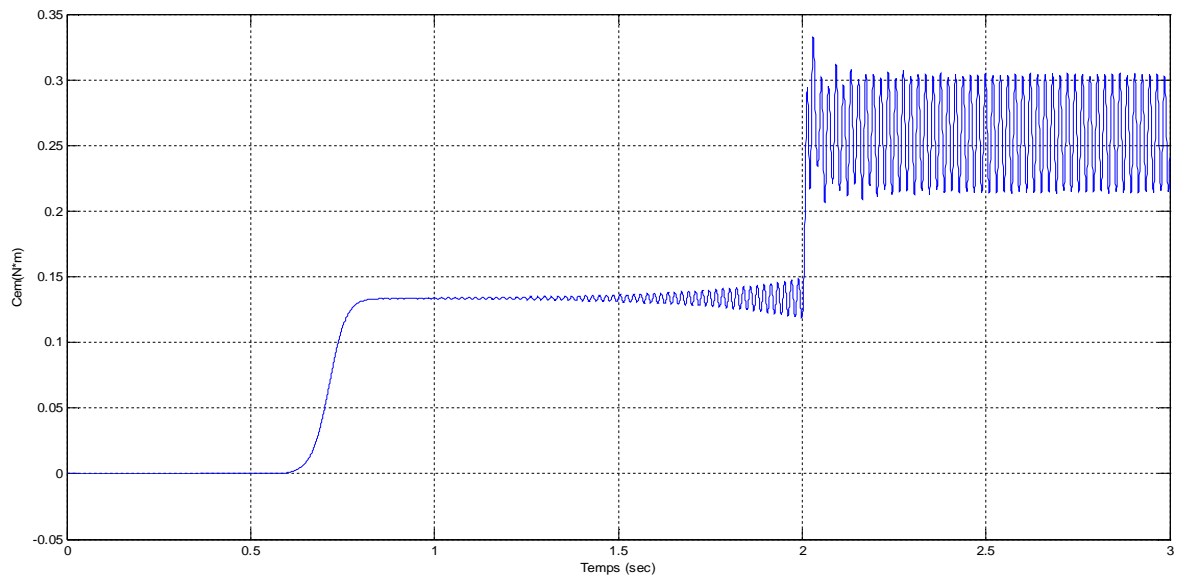


Figure II-20: *Le couple électromagnétique.*

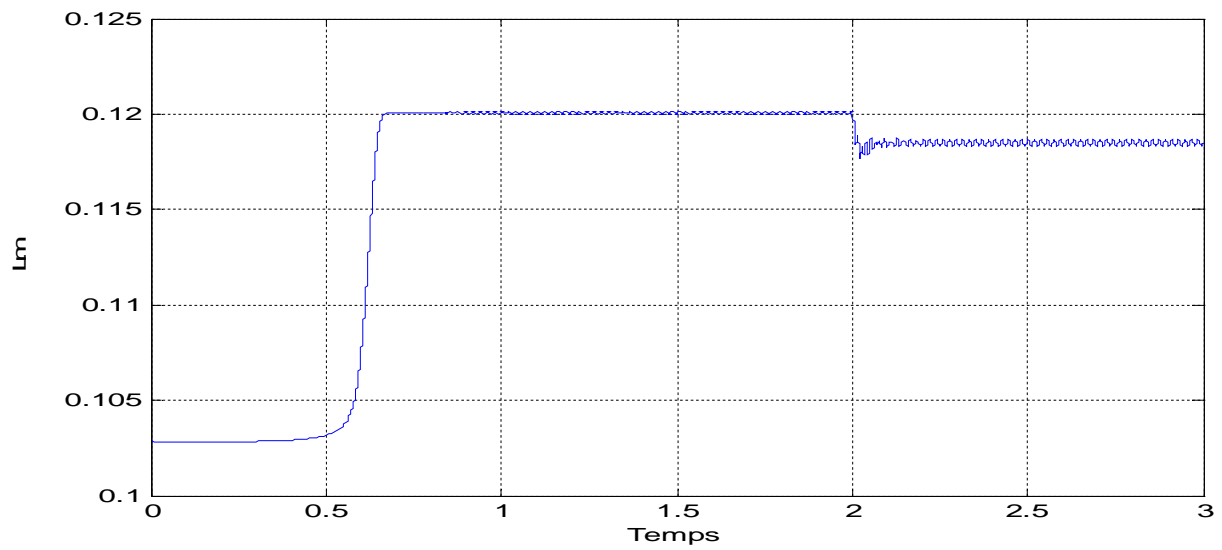


Figure II-21 : *Variation inductance mutuelle*

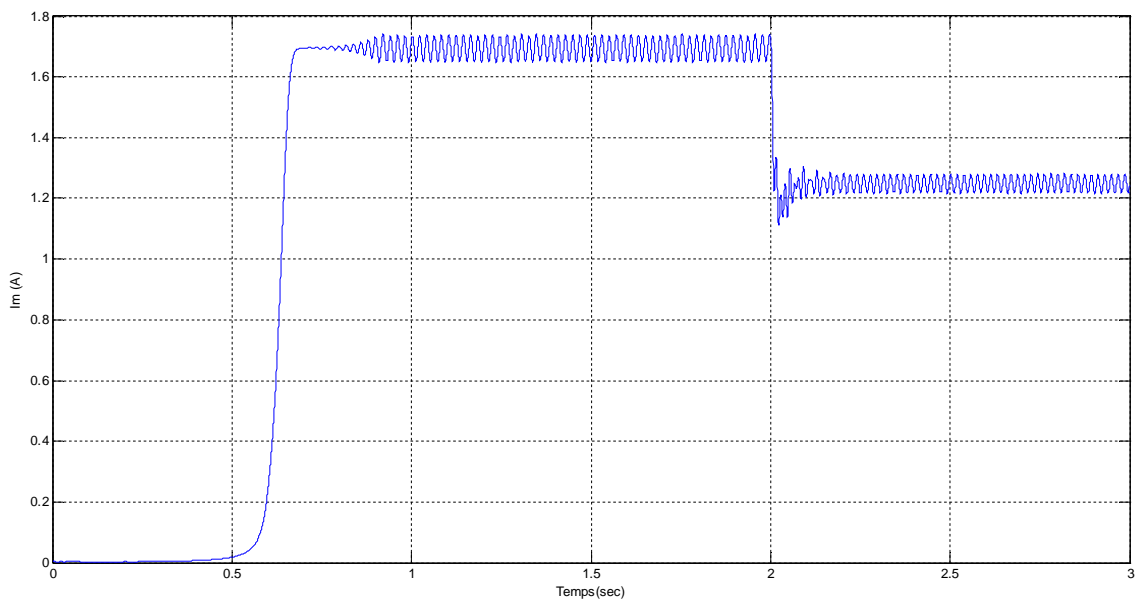


Figure II-22: *variation du courant de magnétisation.*

Commentaire :

Les Figures (II-15) et (II-16) représentent respectivement l'évolution de la tension et du courant statoriques et rotorique en fonctionnement à vide de la génératrice asynchrone à cage. Au démarrage, la tension et le courant générés croient de façon exponentielle, puis se stabilisent respectivement à 90V et à 2 A en régimes totalement établis à $t=0.8s$, et c'est l'instant où le courant de magnétisation atteint son régime saturé (Figure (II-22)) On constate que les évolutions des tensions et des courants statoriques suivent la forme de l'évolution du courant de magnétisation.

II.5. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous sommes intéressés à la détermination des capacités d'auto-amorçage d'une génératrice asynchrone autonome en fonctionnement linéaire que nous avons corrigées par la suite en tenant compte de la saturation magnétique qui permet de limiter les amplitudes des tensions et courants en régime établi et de décrire le fonctionnement du système d'une manière à englober toutes ses performances débitant sur une charge résistive.

D'après les résultats obtenus on a démontré que la génératrice auto- excitée peut être directement exploitée dans l'alimentation de charge autonome. Toutefois la qualité des tensions d'alimentations n'est pas optimale car elle dépend de la charge (démagnétisation de la génératrice en cas de grande charge), d'où la nécessité d'appliquer une commande afin de contrôler la puissance et le flux. Ceci est l'objet du chapitre suivant.

II. Commande vectorielle :

Depuis son apparition (au milieu des années 80) elle est devenue la référence universelle pour contrôler le couple et la vitesse des moteurs à induction.

La commande vectorielle des machines asynchrones est la colonne vertébrale de la commande des machines asynchrones à vitesse variable.

La différence majeure entre la commande scalaire et la commande vectorielle c'est que cette dernière est plus complexe mais en contrepartie elle permet d'avoir de meilleures performances en régime transitoire. Les techniques de contrôle vectorielle de machines à courant alternatif sont destinées au contrôle instantané d'amplitude et de position de vecteur flux que ce soit en régime transitoire ou permanent. Il existe plusieurs types de commande vectorielle et en générale la commande vectorielle a trois grandeurs à contrôler qui sont :

- Les flux rotoriques
- Les flux statoriques
- Les flux d'entrefer.

Le modèle de la machine asynchrone pris pour l'élaboration de la commande est le modèle saturé dans un repère lié au rotor , la commande choisit est une commande vectorielle à flux rotorique orienté classique de la machine asynchrone.

III. 1. 1. Principe de la commande vectorielle :

▪ Expression des tensions statoriques avec flux rotorique orientés :

Suite aux différentes simplifications établies ci-dessus nous allons ré-exprimer les tensions statoriques en fonction des courants statoriques et du flux Φ_r .

On effectuera un développement pour V_{sd} dont le raisonnement est le même pour V_{sq} .

On dérivant le flux Φ_{sd} par rapport au temps on obtient :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = L_s \frac{di_{sd}}{dt} + M \frac{di_{ra}}{dt} \quad (\text{III.1})$$

On remplace V_{sq} par son expression et on aboutira :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \left(L_s \frac{M^2}{L_r} \right) \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - W_s \left(L_s \frac{M^2}{L_r} \right) \cdot i_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (\text{III.2})$$

Sachant que le coefficient de dépression $\sigma = 1 - (M^2 / L_r \cdot L_s)$ la relation précédente devient :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sq} + \sigma \cdot L_s \frac{di_{sq}}{dt} + W_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sd} + W_s \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \quad (\text{III.3})$$

III. 1. 2. Principe de la commande vectorielle à flux orienté :

L'orientation du repère est choisie de telle sorte que $\Phi_{rd} = \Phi_r$.et on commande le flux (Φ_r) pour le maintenir constant.

Le couple électromagnétique s'exprime à partir du courant (i_{sq}) par :

$$C_{em} = p * \frac{L_m}{L_r} * \Phi_r * i_{sq} \quad (\text{III.4})$$

Définitions de deux nouvelles variables de commande V_{ds1} et V_{qs1} telles que:

$$V_{ds} = V_{ds1} - e_d$$

$$V_{qs} = V_{qs1} - e_q$$

Avec :
$$e_d = \omega_s * l_s * l_{sq} * \sigma \quad (\text{III.5})$$

$$e_q = \omega_s * l_s * \sigma i_{sd} - \frac{M}{l_r} \Phi_r \quad (\text{III.6})$$

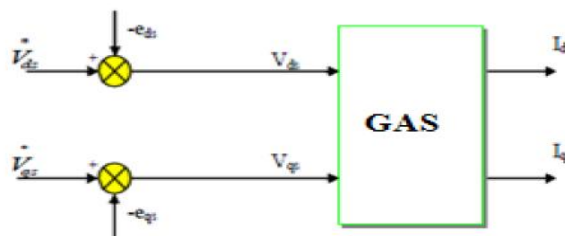


Figure III-1: schéma bloc de découplage.

III.1 Dimensionnement des régulateurs :

Les régulateurs classiques permettent de contrôler la précision et la rapidité des systèmes asservis ils sont les plus prisés (apprécié) dans l'industrie. Les régulateurs PI classique feront l'objet de notre régulation des courants statoriques, flux et tension Vdc de charge.

Ce type de régulateur nous permet d'éliminer l'erreur statique du système grâce à son action d'intégral et d'augmenter la rapidité du système grâce à son action de proportionnelle.

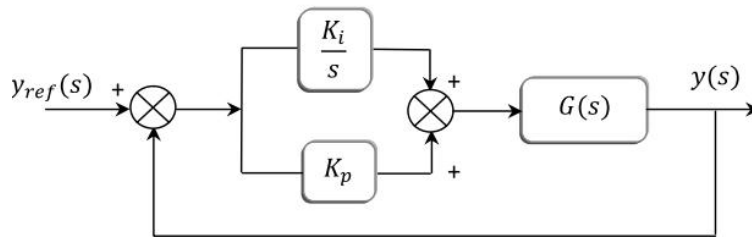


Figure III-2: Schéma d'un régulateur PI

III.2. Calcul des régulateurs :

III. 2. 1. Régulateur du flux Φ_r :

La boucle externe est consacrée pour la régulation du flux rotorique (La grandeur ayant la dynamique la plus lente). Pour avoir un bon fonctionnement de la machine, le flux est maintenu constant à sa valeur nominale.

$$\text{On a : } \quad \Phi_r = \frac{M}{1+T_r s} \cdot I_{sd} \quad (\text{III.7})$$

D'après l'équation (3-7), nous avons :

$$\frac{\Phi_r}{i_{ds}} = \frac{l_m/T_r}{\rho_r + s}$$

Avec : $\rho_r = 1/T_r$

D'où le schéma bloc de régulation du flux rotorique représenté par la figure :

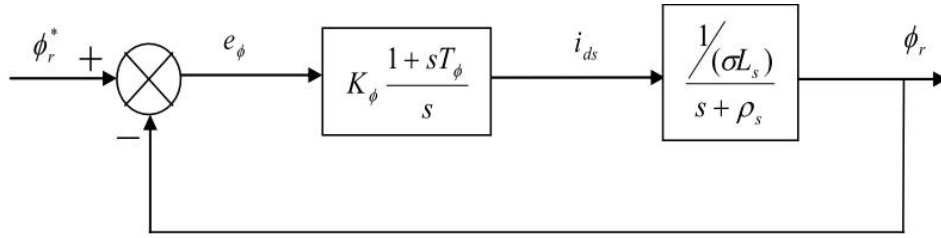


Figure III-3: Schéma bloc de régulateur de flux

pour dimensionner le correcteur, nous faisons appel au principe d'imposition des pôles.

En imposant deux pôles ($S_{1,2} = -\rho + j\rho$), les paramètres de régulateur seront :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_\phi = \frac{2\rho - \rho s}{2\rho^2} \\ K_\phi = 2 * \rho^2 T_r / L_m \end{array} \right.$$

- L'estimateur du module de vecteur flux rotorique et sa position est obtenue par les équation suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Phi_r^*}{dt} = -\frac{\Phi_r^*}{T_r} + \frac{L_m}{T_r} i_{ds} \\ \frac{d\theta_s}{dt} = W_s = W + \frac{L_m}{T_r} * \frac{i_{qs}}{\Phi_r^*} \end{array} \right.$$

III.2. 2. Régulateur de la tension du bus continu :

Comme son nom l'indique, le régulateur de la tension du bus continu fournit la valeur de référence de la puissance active délivrée par la génératrice asynchrone. Pour des raisons de simplicité, il est plus commode de contrôler le carré de la tension V_{dc} au lieu de la tension V_{dc} , le correcteur PI prévu à cet effet considère à pour expression :

$$P^* = (K_{pdc} + \frac{K_{idc}}{p})(V_{dc-ref}^2 - V_{dc-est}^2)$$

Le schéma de régulation de (V_{dc}^2) est représenté sur la Figure suivante :

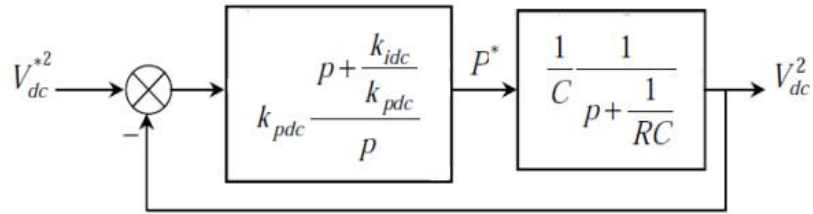


Figure III-4: *schéma de régulation de la tension redressé V_{dc}^2*

Comme nous l'avons fait pour la détermination des paramètres du régulateur PI du flux rotorique, la compensation du pôle de fonction de transfert $(p + 1/RC)$, par le zéro du régulateur conduit à $[P+(K_{idc}/K_{pdc})]$.

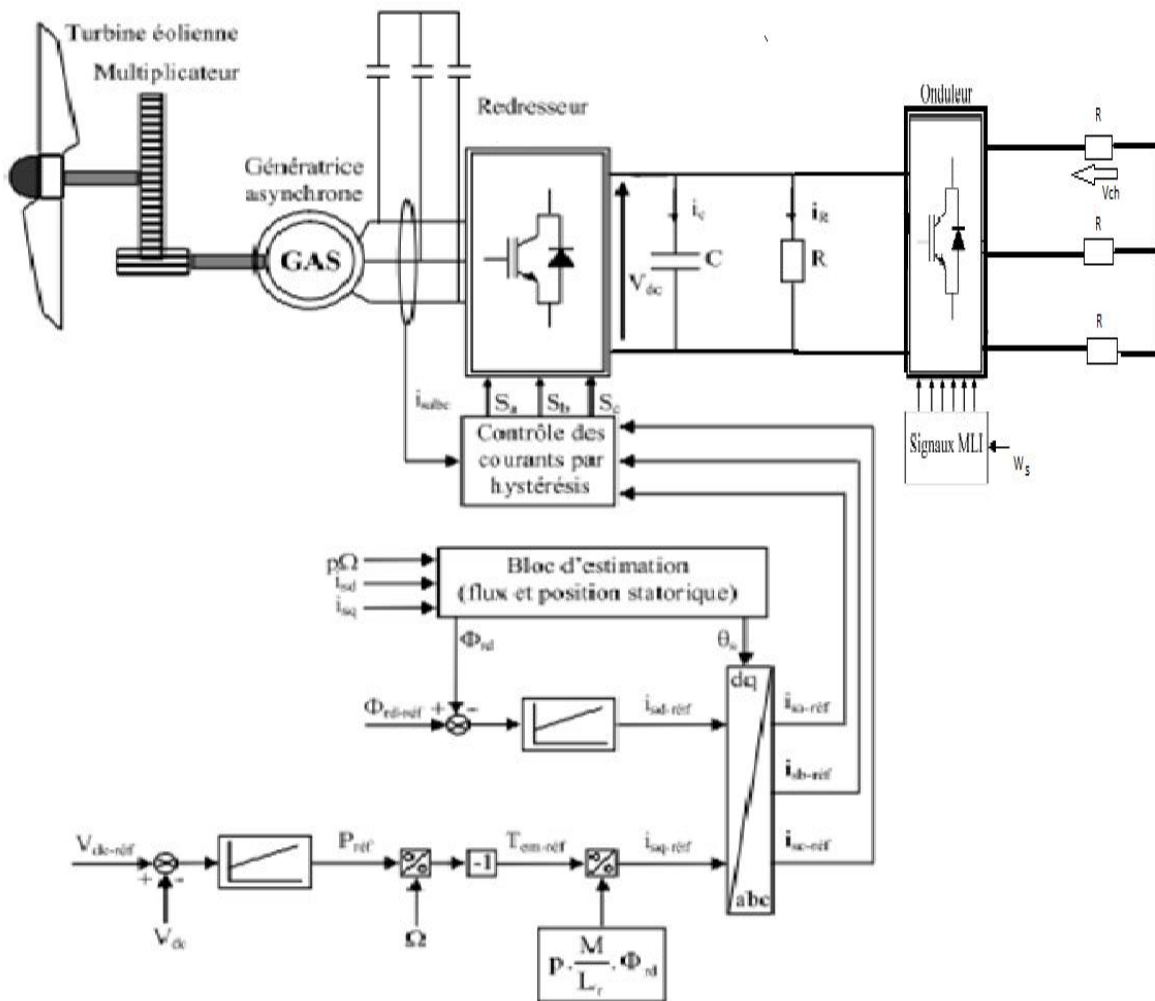


Figure III-5 : *Structure globale de la commande.*

Conclusion

Dans ce chapitre on a construit un dispositif de commande de type vectoriel pour le fonctionnement en génératrice de la machine asynchrone en régime saturé. Le flux est maintenu constant et son réglage est indépendant de celui du couple. Ce qui signifie le découplage des grandeurs directes et en quadratures. Une commande à hystérésis introduite pour générer des signaux de commande afin de contrôler la tension redressée et a donné de bonnes performances. Ajoute à cette méthode le contrôle par MLI de l'onduleur de tension pour but de réguler l'amplitude et la fréquence de la tension alimentant une charge et cela quel que soit les variations de charge et de vitesse du vent, ces tests seront l'objet du chapitre suivant.

IV. 1. Résultats de simulation :

On applique la commande vectorielle pour toute la chaîne de conversion avec une vitesse de vent de 10 m/s et cela pour les deux types de turbine dont leurs puissance est de 10 kW en commençant par l'éolienne à axe vertical les résultats obtenus après simulation (dans MATLAB /SIMULINK) sont les suivants :

- Essai avec une turbine éolienne à axe verticale :

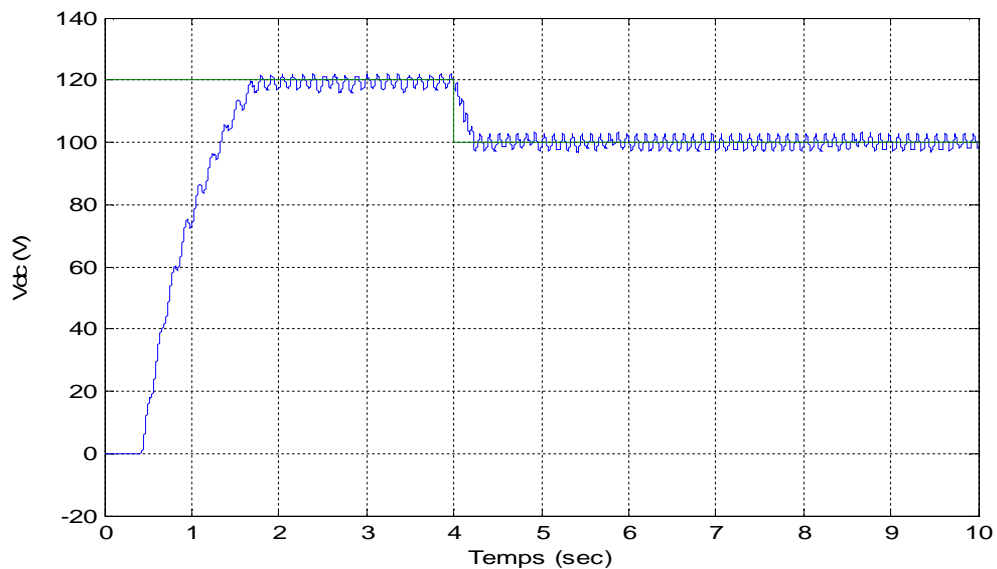


Figure IV-1 : Tension du bus continu

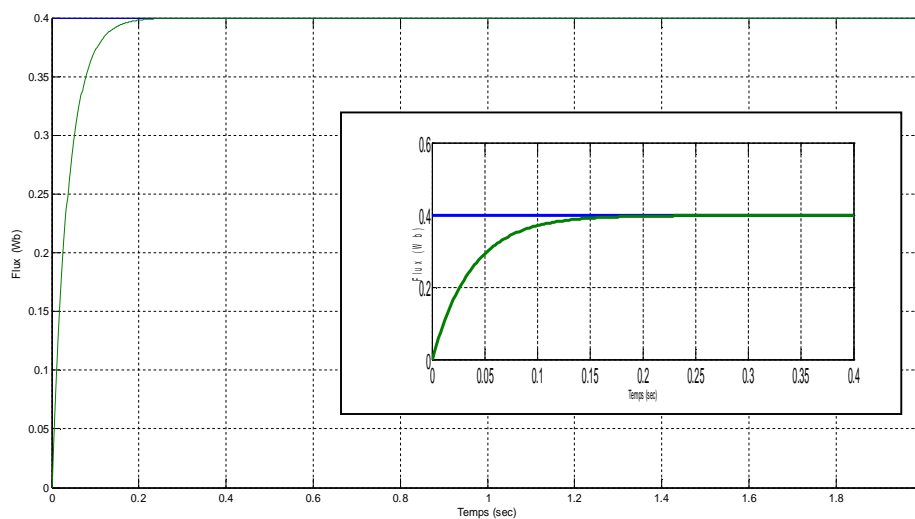


Figure IV-2: Régulation du flux .

IV. 2. Interprétation des résultats :

Au cours de la simulation des deux stratégies, la valeur de référence de la tension du bus continu à la sortie du redresseur est fixée à $V_{dc} = 120 \text{ V}$ ensuite à $t= 4\text{s}$ $V_{dc} =100\text{V}$.

La valeur de référence du flux rotorique nécessaire à n'importe quelle vitesse est calculée à la base du maximum de ce flux qui correspond à la vitesse minimum du rotor.

L'allure de la tension continue à la sortie du redresseur est donnée par la Figure (IV-1), et celle du flux rotorique par la Figure (IV-2). Nous pouvons constater que les deux grandeurs sont bien régulées et suivent bien la référence.

Le couple de référence est obtenu à partir de la valeur de la puissance active référence à injecter dans le bus continu. Cette puissance est délivrée par le régulateur de la tension du bus continu V_{dc} .

IV.3. Test de robustesse (variation de vent et variation de charge) :

Dans cette démarche on a mis en évidence la robustesse de notre commande vis-à-vis les variations de charge et de vitesse introduite, et cela par changement de leur valeur après une certaine durée de temps .

Les figures (IV-3) nous montre l'allure de variation de (v_{dc}) dans le cas de variation de la charge de $R=70 \text{ Ohm}$ à l'instant ($t = 0$), et ensuite $R=110 \text{ Ohm}$ à l'instant ($t=3\text{s}$).

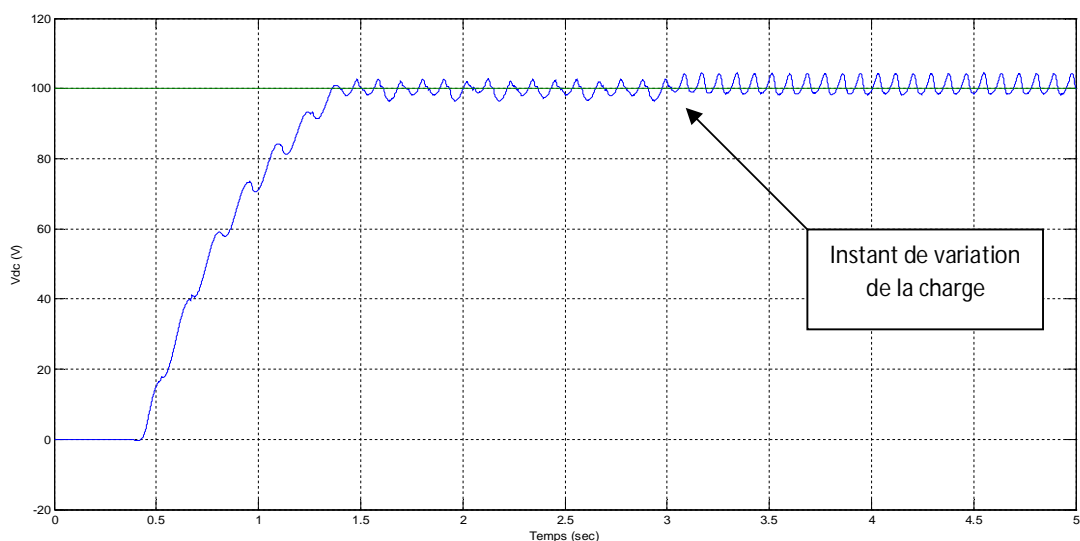


Figure IV-3: Variation de tension en fonction de la charge

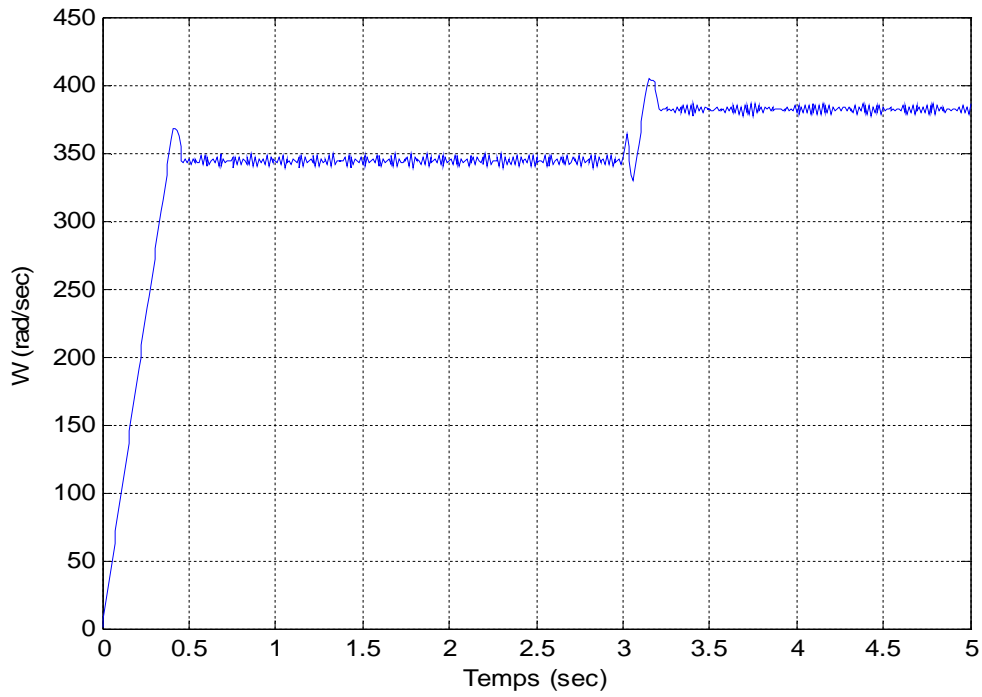


Figure IV-4 : *Variation de la vitesse de la turbine.*

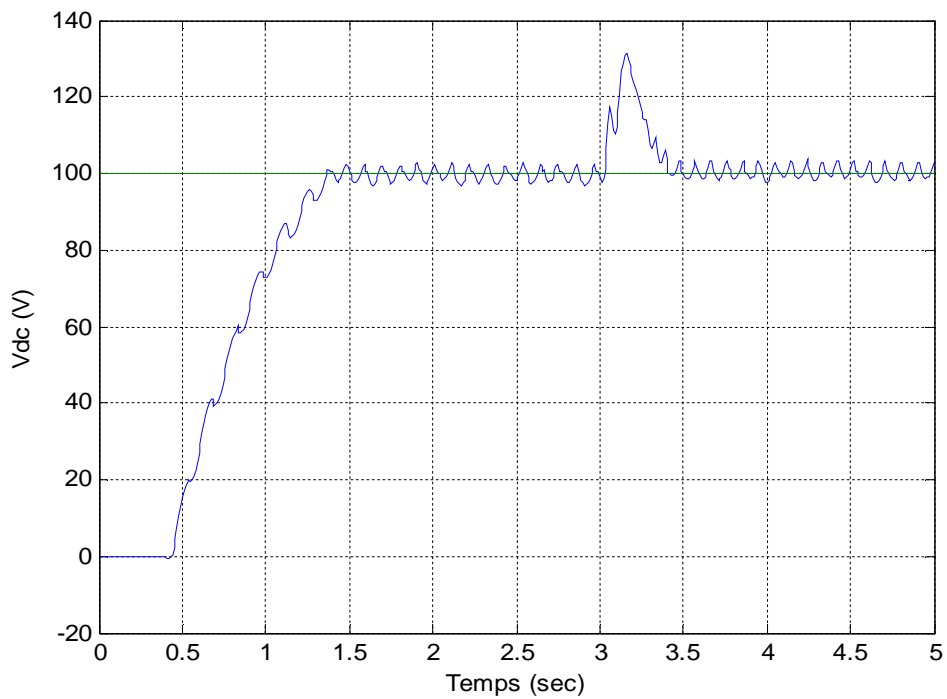


Figure IV-5 : *Variation de la tension en fonction de la vitesse de vent.*

▪ **Essai avec une turbine éolienne à axe horizontale :**

Dans cet essai on introduit une turbine à maximum de puissance de tel manière a avoir les résultats les plus optimaux, sachant que les paramètres de la turbine sont les suivant $C_p = 0.46$ pour $\lambda = 9$ pour une puissance d'ordre de 10kW pour une vitesse de vent de 10m/s.

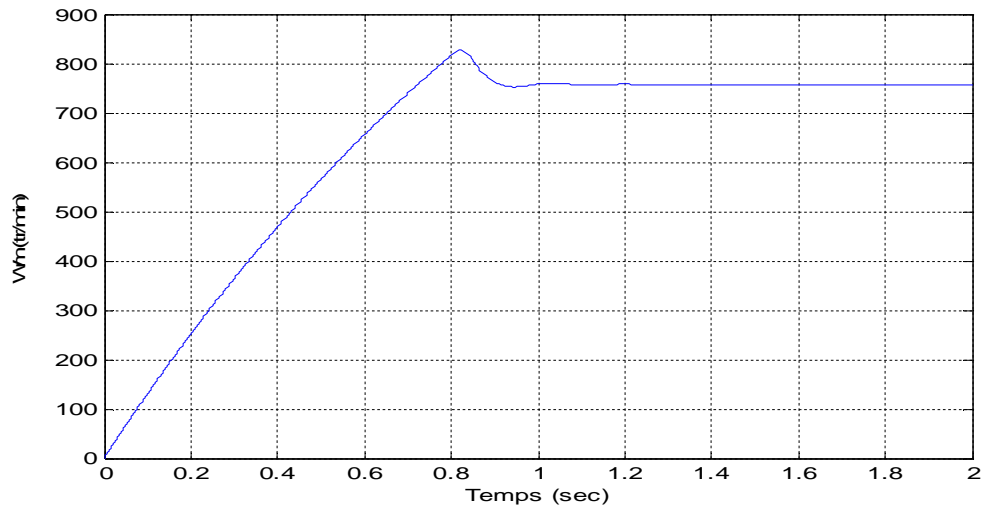


Figure IV-6 : *vitesse de la turbine.*

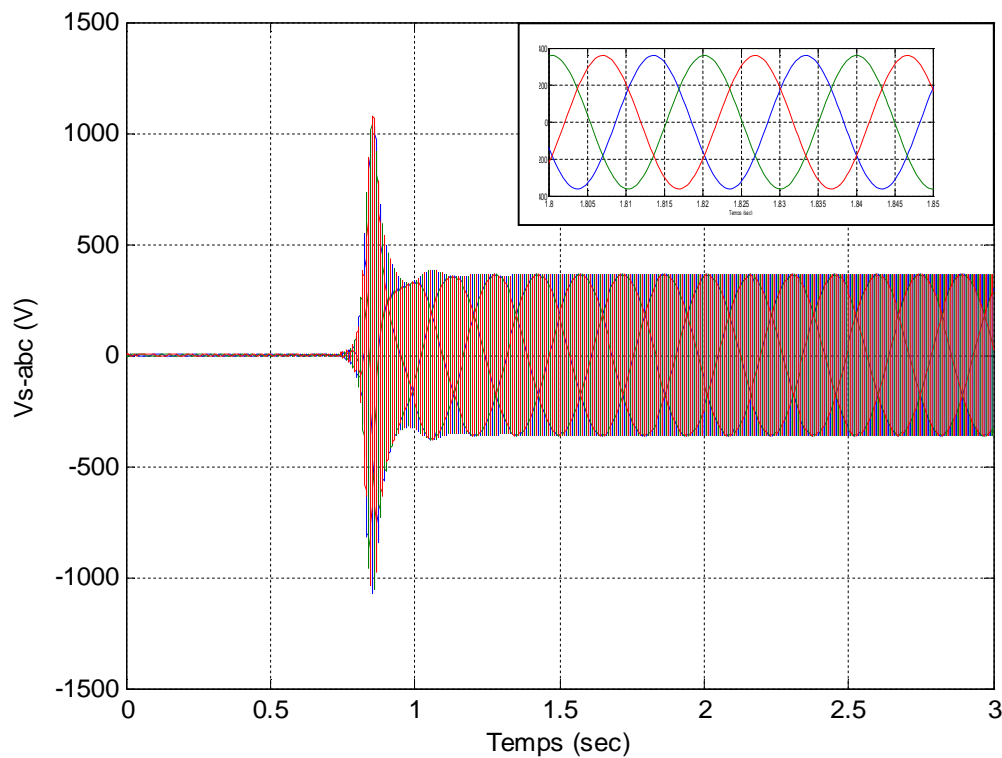


Figure IV-7 : *Tensions statoriques.*

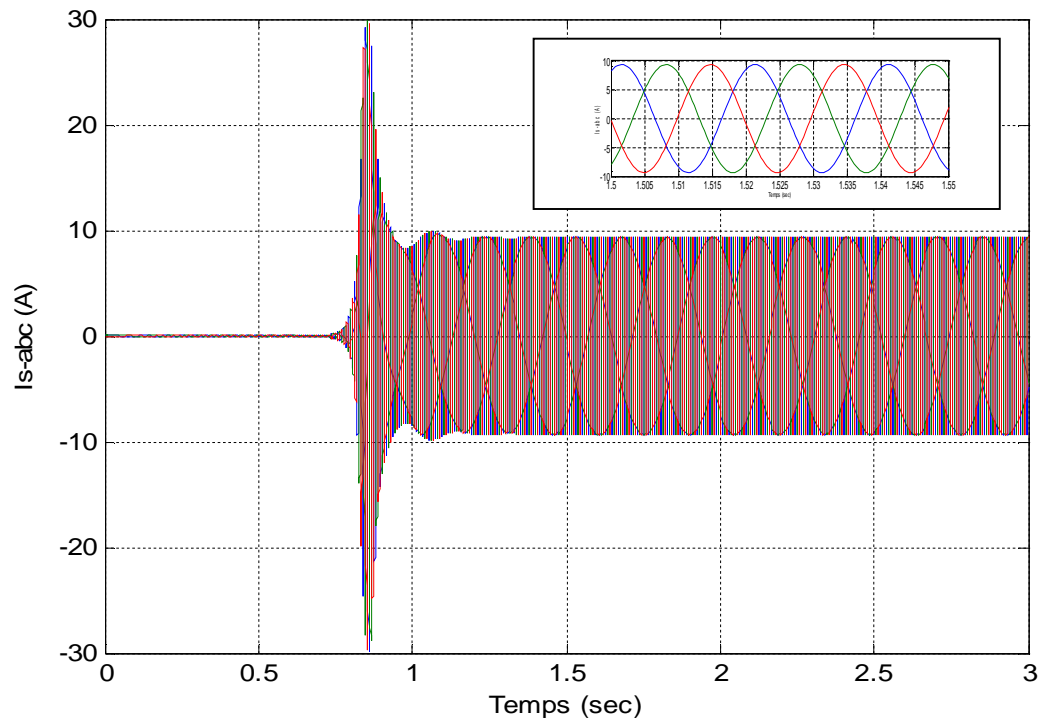


Figure IV-8 : *Courants statoriques.*

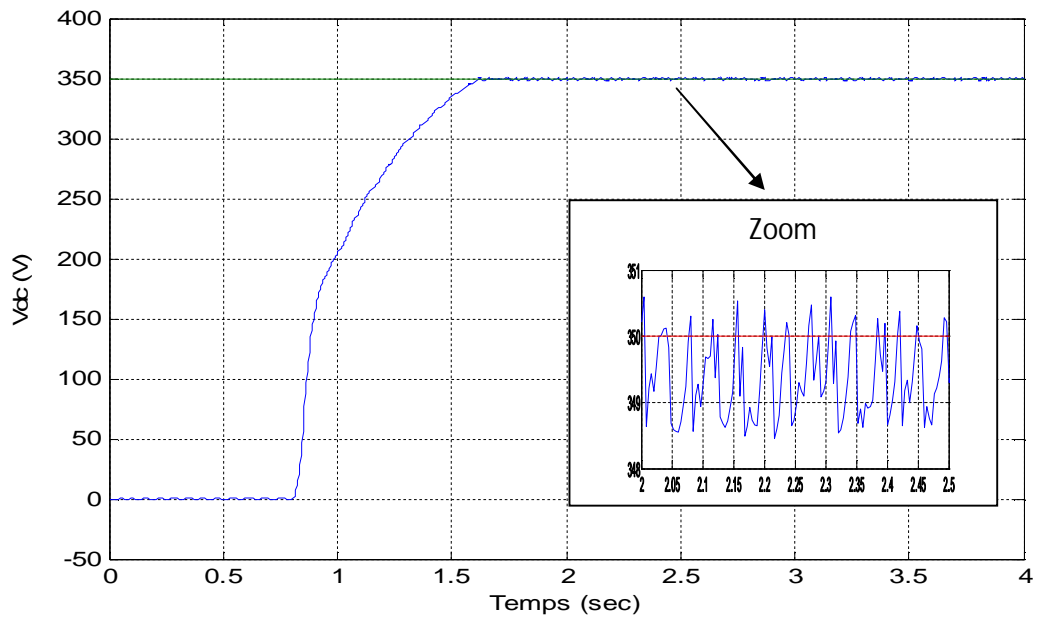


Figure IV-9 : *Tension redressée.*

- Afin d'alimenter des charges en alternatif avec fréquence et amplitude constante on insère l'onduleur MLI attaqué par les signaux de commande MLI et la tension redressée V_{dc} et cela pour avoir des tensions alternatif en triphasé de 220V .

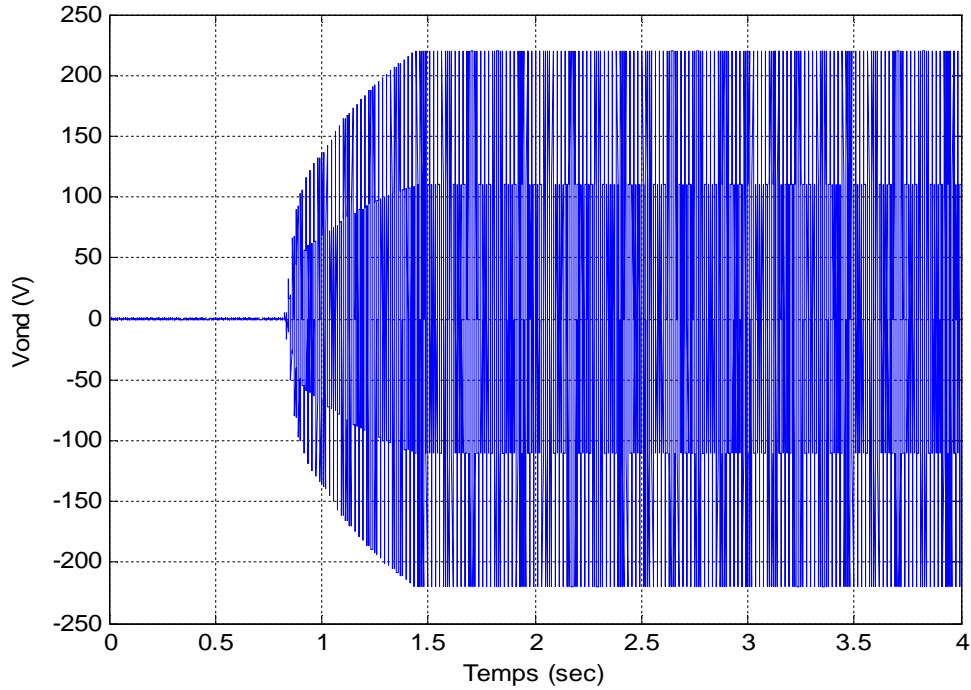


Figure IV-10: *Tension à la sortie de l'onduleur.*

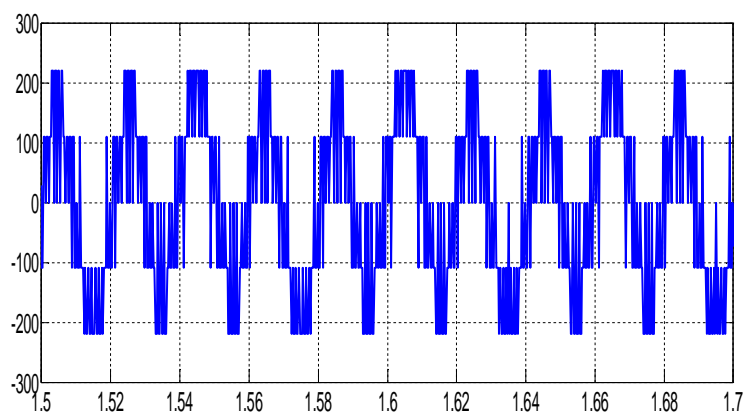


Figure IV-11 : *Zoom sur la tension ondulée (Vond).*

Commentaire :

Les résultats obtenus au cours de cet essai dont 02 méthodes de contrôle ont été introduit, le contrôle par hystérésis de la tension du bus continu et le contrôle par MLI pour les tensions ondulées (à la sortie de l'onduleur), ces résultats nous prouve en premier lieu le bon fonctionnement des deux méthodes de contrôle. Sachant que les allures (tensions et courants de la GAS) passent par 3 régimes dont le premier est le retard à l'amorçage de la génératrice, le régime transitoire et le régime permanent, le système (GAS+Commande) reste toujours performant vis-à-vis le suivie de consigne dans un minimum de temps.

▪ L'influence de la vitesse de vent :

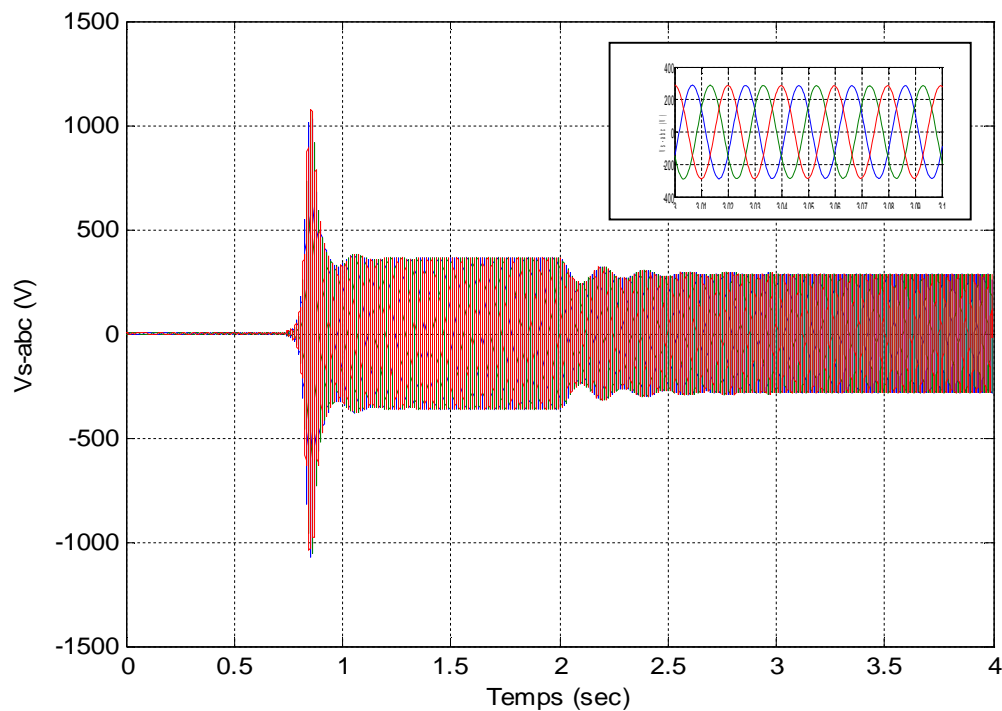


Figure IV-12 : *Influence de la vitesse de vent sur la tension statorique.*

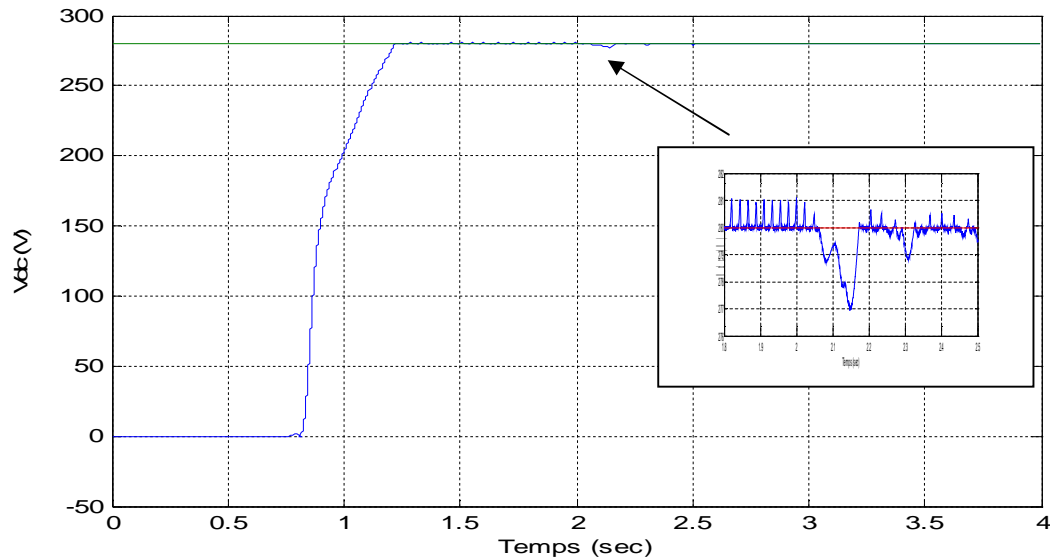


Figure IV-13 : Variation de la tension en fonction de la vitesse de vent.

Commentaire :

- L'influence de la vitesse de vent :

Afin de tester l'influence de la vitesse du vent sur les tensions statoriques de notre génératrice on fait diminuer à l'instant $t=2s$ la vitesse du vent de 10% par rapport à la valeur initiale (10m/s).

On remarque que la puissance (tension et courant) débitée par la génératrice est proportionnelle à la vitesse du vent sachant que, lorsque la vitesse du vent augmente, on récupère le maximum de la puissance.

On refait la même procédure afin d'évaluer l'influence de la vitesse du vent sur la tension redressée à partir de l'instant $t=2s$.

Les résultats obtenus ci-dessus nous montre que la vitesse influe considérablement sur les tensions générées par la génératrice, ceci prouve que le vent est l'élément influant directement sur la puissance délivrée par la génératrice. Par contre on remarque que la tension redressée n'est pas influée par cette variation du vent ce qui prouve la robustesse de la commande.

- **L’Influence de la variation de la charge :**

- Au début on insert une charge purement résistive de 50 Ohm et à l’instant $t=2s$, pour une vitesse du vent de 10m/s et on fait augmenté la charge à 150 Ohm afin d’évaluer l’influence de la charge sur la tension à la sortie du redresseur.

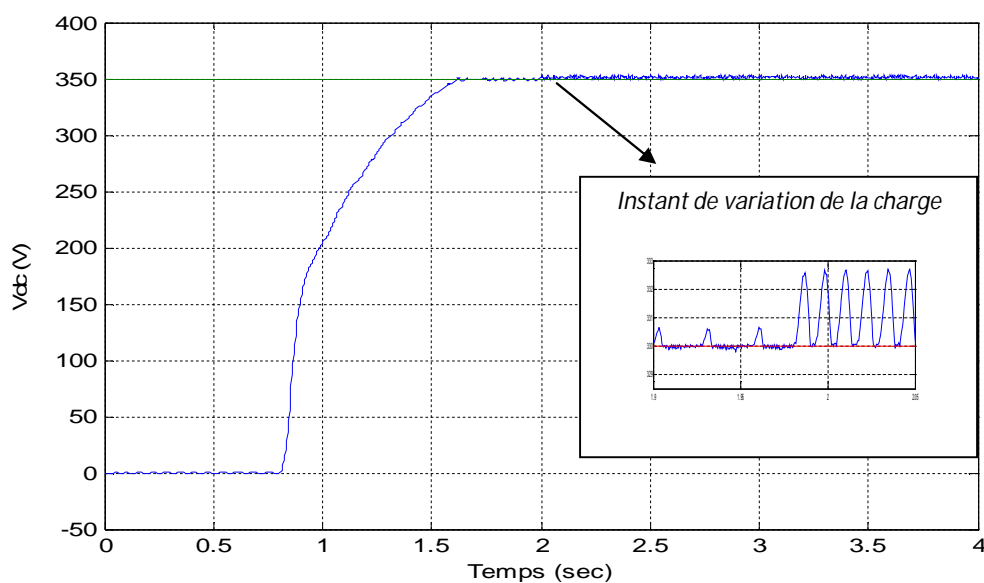


Figure IV-14 : *influence de la charge sur la tension redressée.*

Commentaire :

Le contrôle de la tension redressé nous a permis d’avoir des résultats satisfaisants malgré les variations de charges introduites au cours du temps.

Cette commande a encore montré dans cette partie son efficacité à suivre la consigne pour des charges compatibles (non surchargé) à la puissance nominale de la génératrice.

IV.4. Conclusion :

L'objectif de la commande est de contrôler la tension du bus continu à la sortie du redresseur V_{dc} . La mise en œuvre de la commande nécessite d'estimer le flux rotorique la mesure du couple électromagnétique et le calcul de la pulsation statorique.

Le courant « i_{q-ref} » est calculé à partir de la valeur du couple électromagnétique de référence. Les résultats ont montré, d'une manière générale, une bonne dynamique, tout en gardant une meilleure précision du contrôle, ce qui est reflété par une très bonne régulation de la tension de bus continu et cela pour les deux types de turbine, avec une certaine sensibilité aux variations de la charge et du vent. Toutefois, la régulation permet à la tension redressée de retrouver rapidement sa valeur de référence.

Conclusion générale

A la lumière de notre modeste travail de la modélisation de la génératrice asynchrone, en vue de la production de l'énergie éolienne, on a vu les différents problèmes considérés par l'utilisation de cette machine au système éolienne pour produire l'énergie électrique.

Cette étude a simplifié exactement la génératrice asynchrone à cage d'écureuil auto-excitée, qu'elle est considérée, grâce à ses avantages, la plus utilisée, dans les domaines industriels.

Ce travail a commencé par connaître les différentes parties du système éolien par la première utilisation de la turbine, dans la production d'énergie et pour connaître le principe du travail en générale et même pour connaître ses types et choisir le type adéquat selon les avantages, afin de l'utiliser dans cette étude ,puis dans le deuxième chapitre, on a commencé par connaître la génératrice selon les informations générales et connaître la transformation de Park qui nous a permis d'obtenir les équations, et avec l'aide de logiciel MATLAB (Simulink), on a obtenu les courbes dans le régime linéaire.

Dans la dernière partie dans ce mémoire, nous avons vu le phénomène de la saturation magnétique et sa modélisation que nous avons implanté dans MATLAB. Ensuite nous avons étudié la génératrice asynchrone débitant sur charge autonome de type résistif.

A la fin de ce mémoire nous avons introduit une commande afin de contrôler la tension au borne de la charge, reste que la para-métrisation des régulateurs de la commande vectorielle était le seul inconvénient de cette commande.

Les résultats obtenus ont montrés une bonne régulation de la tension redressée pour des variations de charge et de vitesse tout en ayant une certaine sensibilité à leurs variations.

La performance du système a été quantifiée à travers l'introduction des variations de vitesse et de charge, Toutefois la régulation a permis à la tension redressée de retrouver sa valeur de référence, reste que le types des régulateurs (PI) et leur paramétrisation est l'un des inconvénient de ces derniers, ce qui nous encouragera au futur à introduire des régulateurs flous ainsi que d'autres commandes très avancés dont les recherches actuelle s'intensifient de plus en plus sur elles et de valider les résultats expérimentalement.

ANNEXE

- **Paramètres de la turbine**

- La puissance nominale : $P_t = 10 \text{ kW}$
- Rayon : $R_t = 3,5 \text{ m}$
- La vitesse nominale : $\Omega_t = 750 \text{ tr/mn}$
- Vitesse moyenne du vent : $V_v = 10 \text{ m/s}$
- Le multiplicateur : $G = 3,1475$

- **Paramètres de la machine asynchrone**

Les caractéristiques électriques :

- Rotor de type de cage d'écureuil
- 4 paires de pôles
- 230/400 V – 23,8/13,7 – 5,5 kW – 50 Hz – 690 tr/mn
- $R_s = 1.07131 \Omega$
- $R_r = 1,29511 \Omega$
- $L_s = 0.08938 \text{ H}$
- $L_r = 0.048613 \text{ H}$

Les paramètres mécaniques

- $J = 0,120 \text{ kg.m}^2$
- $f = 0,09 \text{ N.m/rad.s}^{-1}$

- **Paramètres de simulation**

- ❖ Les paramètres du bus continu
- ❖ Générateur de tension continu de 350 V
- ❖ Capacité du bus continu $C = 1000 \mu\text{F}$

- **Régulateurs**

- ❖ Régulateur du flux et du couple PI : $K_i= 20$ et $K_p= 17$
- ❖ Régulateur de la tension continue PI : $K_i= 1$ et $K_p= 0.908$
- ❖ Le pas de simulation est de 0.0001sec .

- **La MLI**

- Amplitude des tensions de référence de la MLI est de 220V
- Porteuse triangulaire d'amplitude 300v et de fréquence 4200Hz .

Bibliographie

- [1] **A. Mirecki**, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 5 avril 2005.
- [2] **O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, A. Larsson**, « A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines », European wind energy conf., 1994.
- [3] **Gabriel-Octavian Cimuca**, « Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens », thèse doctorat, E.N.S.A.M, centre de Lille, 2005.
- [4] **O'Connor M, Gallopin G-C., Funtowicz S., Ravetz J**, « La science pour le XXIe siècle : du contrat social aux fondements scientifiques », revue internationale des sciences sociales, N°168, juin 2001.
- [5] **K. Idjdarene** « Analyse et contrôle d'une chaîne de conversion électrique par énergie éolienne ». Mémoire de magister, université A. Mira de Bejaia, Algérie, 2005.
- [6] **L, AICHE-HAMAE.A.KHELLAF**. « Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie » congrée sur le photovoltaïque et l'énergie éolienne (IPCWE) Tlemcen, Algérie (Novembre2003).
- [7] **L. H. Hansen, L. Helle, F. Blaabjerg, E. Ritchie, S. Munk-Nielsen, H. Bindner, P. Sorensen and B. Bak-Jensen**, « Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines », Riso national laboratory, Roskilde, Denmark, december 2001.
- [8] **R. Ramakumar, P. Chiradeja**, « Distributed generation and renewable energy systems 3 », 2002 37th intersociety energy conversion engineering conference, IECEC 2002.
- [9] **S El Aimani**, « Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », thèse de doctorat, l'université des sciences et technologies de Lille (USTL).

- [10] **R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin**, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001.
- [11] **Technique de l'ingénieur D 3 960**.
- [12] **E. Muljadi, C.P. Butterfield, Yih-Huei Wan**, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications », IEEE industry applications conference, St Louis, november 5-8, 1998.
- [13] **Mathew, S.** (2006). Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Springer, Germany.
- [14] **Windpower (2006)**, Site Web de la Danish Wind Industry Association, <http://www.windpower.org>.
- [15] **T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion**, « Eoliennes en milieu urbain -État de l'art », janvier 2006.
- [16] **J. Chen, C. Nayar, L. XU**, « Design and FE analysis of an outer-rotor PM generator for directlycoupled wind turbine applications », proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, USA, 1998, vol 1.
- [17] **R. Michaux, P. Letellier**, « Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique », revue de l'électricité et de l'électronique, N° 3, mars 1997.
- [18] **Bernard Multon, Gael Robin, Marie Ruellan, Hamid Ben Ahmed**, « 3 ème situation énergétique mondiale à l'aube du millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables », revue 3Ei n°36 mars 2004.
- [19] **H. Ben Ahmed**, « Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés », séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004.
- [20] **J.W. Smith, J.A. Taylor, D. L. Books, R.C. Dugan**, « Interconnection studies for wind generation », conference papers IEEE2004, paper N° 04 C3, pp. C3-1.C3-8.

[21] **R. Ramakumar, Albrecht Naeter**, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à12, 2004.

[22] **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].

[ibt02] R Ibtouen, M Benhaddadi, A Nesba, S Mekhtoub et O Touhami ” Dynamic performances of a self-excited induction generator feeding different static loads”. 15 th international conference on electrical Machine ICEM 2002. Brugge, belguim, 25-28 august 2002 pp.1-6

[23] **Adam MERIKI**, étude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, thèse doctorale, INP Toulouse, 2005.

[24] **Armand BOYETTE**, contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne, thèse doctorale, université Henri POINCARÉ Nancy, 2006.

[25] **F POITIERS**, étude et commande des génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne, thèse doctorale, école polytechnique de l'université de Nantes, 2003.

[26] **Abdenour ABDELLI**, optimisation multicritère d'une chaine éolienne passive, thèse doctorale, INP de Toulouse, 2007.

[27] **Mémoire de magister Ait Ramdane N.** commande robuste d'une génératrice asynchrone à double alimentation pour la conversion d'énergie éolienne.

[28] **Communication à l'académie des technologie pour un progrès résonné de Bernard Tardieu** « Rapport énergie hydraulique éolienne », novembre 2005.

[29]: **D.Rekioua, T. Rekioua , K.Idjdarene et A.Tounzi** “An approach for the modeling of an autonomous induction generator taking into an account of saturation effect ” , International journal of emerging electrical power systems, vol. 4 Issue 1, December 2005, pp.1-25.

[30] : **K.Idjdarene** « Contribution à l'étude et à la commande de génératrices asynchrone à cage dédiées à des centrales électrique éoliennes autonomes ».

[32] [**M. Machmoum , F. Poitiers, L. Moreau et M.E. .Zaïm, R. le Doeuff**, « Etude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA) »]

[33] [H. Tamrabet «robustesse d'un contrôle vectoriel de structure minimale d'une MAS» mémoire de magister option électronique de puissance univ de Batna soutenu le 20/05/2006] :