

LA REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE D'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE AMAR TELIDJI DE LAGHOUAT

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



MEMOIRE DE MASTER

DOMAIN : Technologie

FILIERE : Electronique

OPTION : Instrumentation

Thème

**Commande d'un système éolien à base d'un
générateur à courant continu connecté au réseau
électrique**

Présenté Par :

1. KERROUM AYOUB

2. GUEFFAF ABDELDJALIL

Devant le Jury de soutenance composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité
Dr. ABOUCHABANA Nabil	MAA	président
Pr. BOUTOUBAT Mohamed	Pr	Encadreur
Dr. ABOU BAKEUR Hadj AISSA	MCA	Examineur

Promotion : 2019 -2020

ملخص:

تسمح الطاقة المتجددة بإنتاج الطاقة الكهربائية اللامركزية ، مما يساهم في حل توفير منطقة معزولة بالطاقة اللازمة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو التحكم في نظام طاقة الرياح على أساس آلة التيار المستمر التي يتم تشغيلها بواسطة توربين متغير السرعة. أولاً ، يتم دراسة نموذج لكل عنصر يشكل نظام تحويل طاقة الرياح. يتم توصيل آلة التيار المستمر بالشبكة الكهربائية بواسطة محولين متتاليين (DC / DC) و (DC / AC) لتقنية MLI. مكنتنا التحكم في سرعة الماكينة باستخدام متحكم PI من التقاط أقصى طاقة من الرياح. بالإضافة إلى ذلك ، تم تنظيم جهد ناقل التيار المستمر عن طريق متحكم PI آخر مطبق على المحول الجانبي للشبكة الجانبية. سمح تنظيم ناقل التيار المستمر بحقن أقصى طاقة منتجة في الشبكة باستخدام عامل طاقة واحد.

الكلمات الرئيسية: نظام تحويل طاقة الرياح ؛ المحولات (DC / DC) و (DC / AC) ، التحكم في السرعة ؛ الحد الأقصى لتتبع نقطة الطاقة (MPPT) ، وحدة تحكم PI ، وحدة التحكم في التباطؤ الحالي ، آلة التيار المستمر ، عامل الطاقة الموحد ، تنظيم ناقل التيار المستمر

Résumé:

L'énergie renouvelable, permet une production d'énergie électrique décentralisée, ce qui contribue à la solution de fournir à une zone isolée l'énergie nécessaire.

L'objectif principal de ce travail est la commande d'un système éolien à base d'une machine à courant continu entraînée par une turbine à vitesse variable. En premier temps, un modèle de chaque étage constituant la chaîne de conversion est étudié. La machine à courant continu est connectée au réseau électrique à travers deux convertisseurs en cascade (DC-DC) et (DC-AC) à MLI. En effet, la commande par un régulateur classique (PI) de la vitesse de la machine nous a permis de capter le maximum de puissance du vent. De plus, la tension du bus continu a été réglée par l'intermédiaire du convertisseur de côté réseau en utilisant un autre régulateur (PI). Le réglage de la tension du bus continu nous a permis d'injecter le maximum de puissance captée dans le réseau électrique avec un facteur de puissance unitaire.

Mots clés : Système de Conversion d'Énergie Éolienne ; Convertisseurs Statiques (DC/DC et DC/AC), MLI à hystérésis de courant, commande, de la Vitesse par PI , Machine à courant continu, Point de Maximum de Puissance, Facteur de puissance unitaire, Commande de la tension du bus continu.

Abstract:

Renewable energy allows decentralized electrical energy production, which contributes to the solution of providing an isolated area with the necessary energy.

The main objective of this work is the control of a wind power system based on DC current machine driven by a variable speed turbine. Firstly, a model of each element constituting the wind energy conversion system is studied. The DC current machine is connected to the electrical network by two cascaded converters (DC/DC and DC/AC) to PWM technique. In fact, controlling the speed of the machine by using a PI controller enabled us to capture the maximum power from the wind. In addition, the DC bus voltage has been also regulated via another PI controller applied to the grid side converter side converter. The DC bus regulation has permitted to inject the maximum produced power into the grid with a unity power factor.

Keywords : Wind Energy Conversion System ; Converters (DC/DC and DC/AC) , Speed Control; Maximum Power Point Tracking (MPPT), PI controller, Hysteresis current controller, DC machine, Unity power factor, DC bus regulation.

Remerciements

Mon remerciement s'adresse en premier lieu à Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné durant toutes ces longues années.

Qu'il nous soit permis ici d'exprimer toute notre gratitude envers celles et ceux qui nous ont aidé à mener à bien le présent mémoire de MASTÈRE,

Tout d'abord, nous tenons à remercier particulièrement le Pr. BOUTOUBAT MOHAMMED pour avoir accepté de diriger ce travail et nous avoir prodigué conseils et encouragements chaque fois que cela s'est avéré nécessaire.

Je remercie aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation et les administrateurs et à tous les membres du jury qui ont accepté à juger ce travail.

Enfin, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance,

D'une part, envers nos familles et les amis qui nous ont accueilli et soutenu durant cette année ; d'autre part, envers nos enseignants

Car leur soutien moral et leur appui logistique ont grandement

Contribué au bon déroulement de cette étude.

DEDICACES

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire

« Ya Kayoum »

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma chère mère...

À mon père, écolier de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que Dieu les garde et les protège.

- *Mes frères et mes sœurs, (laiza, nour, moh taher, hadjer, kais)*
- *Toute ma famille.*
- *tous les amis. (moh, mustapha, taher, abdeljalil, amel, ...)*
- *À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*
- *Toute la promotion 2020 d'électronique.*

KERROUM.Ayoub

DEDICACES

Merci Allah de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire

« Ya Kayoum »

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à ma chère mère...

À mon père, écolle de mon enfance, qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger. Que Dieu les garde et les protège.

- *mes frères et mes sœurs,*
- *toute ma famille.*
- *tous les amis.*
- *À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.*
- *Toute la promotion 2020 d'électronique.*

GUEFFAF. Abdeldjalil

Liste des Figures

Figure I-1: Régions ventées en Algérie.	6
Figure I-2: Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés.....	6
Figure I-3: Puissance énergétique récupérable en altitude à 50 m Algérie.....	7
Figure I-4: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie. ...	7
Figure I-5: Comparaison des puissances récupérables des Sites Ventés	8
Figure I-6: Conversion de l'énergie cinétique du vent.	8
Figure I-7: Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.....	9
Figure I-8 : Installation d'éoliennes offshore en Mer du Nord (Pholo Gunnar Brilse)	9
Figure I-9: Taille des hélices en m et puissance en KW.....	10
Figure I-10: Outils de mesure de la vitesse du vent.....	11
Figure I-11: principe de conversion d'énergie éolienne	11
Figure I-12: Eoliennes de type Darrieus.	12
Figure I-13: Eoliennes de type Savonius.	13
Figure I-14 : Les éoliennes à axe horizontal	14
Figure I-15 : Eoliennes amont et aval	14
Figure I-16: Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal	16
Figure I-17: Un moyeu.....	17
Figure I-18: Une nacelle	17
Figure I-19: Un multiplicateur	18
Figure I-20: Une génératrice	18
Figure I-21: Système de contrôle-commande	19
Figure I-22: Système d'orientation	19
Figure 23: Eoliennes à tour en treillis et à tour tubulaire.....	20
Figure I-24: Machine asynchrone à cage connectée directement au réseau.	23
Figure I-25: Machine asynchrone à cage connectée au réseau à l'aide d'un convertisseur mono directionnel.	24
Figure I-26: Machine asynchrone à rotor bobiné connectée directement au réseau.....	24
Figure I-27: Machine asynchrone à double alimentation	25
Figure I-28 : Machine synchrone à excitation en courant continu connectée directement au réseau	25
Figure I-29: Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/DC/AC.....	25
Figure I-30: Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/DC/AC « configuration d'éolienne sans boîte à vitesse »	26
Figure I-31: Machine synchrone à aimants permanents	27
Figure I-32: Machine à courant continu.....	27
Figure II-1: Système de conversion éolienne à base de la MCC	29
Figure II-2: Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique	32
Figure II-3: Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p	33

Liste des figures et liste des tableaux

Figure II-4: Variation de la vitesse du vent	34
Figure II-5 : Variation du coefficient de puissance en fonction de différence de vitesse....	35
Figure II-6 : Zones de fonctionnement d'une éolienne.....	36
Figure II-7: Flux d'air sur un profil de pale " stall "	37
Figure II-8 : Variation de l'angle de calage d'une pale	38
Figure II-9 : schéma le modèle de la turbine éolienne avec le modèle de l'arbre rapide de la génératrice.....	40
Figure II-10: Les modes de fonctionnements de la MCC.....	40
Figure II-11: schéma d'un moteur à courant continu.....	41
Figure II-12: Symbole de la machine à courant continu [28]	41
Figure II-13: Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu	42
Figure II-14: Schéma équivalent d'un MCC électrique.....	42
Figure II-15: Modélisation électrique d'un Moteur à excitation série.....	43
Figure II-16: Modélisation électrique d'un Moteur à excitation shunt.....	43
Figure II-17: Modélisation électrique d'un Moteur à excitation composée.	44
Figure II-18: Modélisation électrique d'un MCC à excitation séparée	44
Figure II-19: Modèle électrique de la MCC à excitation séparée [5]	44
Figure II-20: schéma de la Bilan des puissances.	46
Figure II-21: Les quatre quadrants de fonctionnement d'une machine électrique tournante.	47
Figure II-22: Schéma de principe d'un hacheur.	48
Figure II-23: Schéma de principe d'un hacheur série	49
Figure II-24: Schéma de principe conduction d'un hacheur série.....	49
Figure II-25: La forme d'onde de la tension en sortie d'un hacheur série	49
Figure II-26: Schéma de principe d'un hacheur parallèle	50
Figure II-27: Schéma de principe conduction d'un hacheur parallèle	50
Figure II-28 : La forme d'onde de la tension en sortie d'un hacheur parallèle	50
Figure II-29: Schéma de principe d'un hacheur parallèle-série	51
Figure II-30: Schéma de principe conduction d'un hacheur série réversible en courant et La forme d'onde de la tension en sortie	52
Figure II-31: un fonctionnement en moteur et freinage avant	52
Figure II-32: Schéma de principe conduction d'un hacheur série réversible en tension et La forme d'onde de la tension en sortie	53
Figure II-33: fonctionnement en moteur avant et freinage arrière.....	53
Figure II-34: Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant et en tension	54
Figure II-35: Hacheur réversible en tension et en courant.....	54
Figure II-36: Allure de la tension aux bornes de la charge.....	55
Figure II-37: Principe de fonctionnement d'un quatre quadrants (réversible en tension et en courant).	55
Figure II-38: un fonctionnement dans les 4 quadrants.....	56
Figure II-39: Schéma de principe de l'onduleur	56
Figure II-40: Schéma de principe de l'onduleur monophasé.....	57
Figure II-41: Schéma d'onduleur de tension triphasé.....	57
Figure II-42: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.....	58

Liste des figures et liste des tableaux

Figure II-43: Schéma du bus continu	59
Figure II-44: Filtre de raccordement au réseau	60
Figure III-1 : Schéma électrique du système éolien étudié.....	63
Figure III-2 : Schéma électrique du convertisseur du côté machine.....	64
Figure III-3 Schéma électrique du convertisseur du côté réseau.	64
Figure III-4 : Contrôleur hystérésis d'un bras de l'onduleur.	67
Figure III-5 : Commande par Hystérésis.	67
Figure III-6 : Coefficient de puissance en fonction la vitesse spécifique $C_p(\lambda)$	68
Figure III-7 : Schéma fonctionnel de l'asservissement de la vitesse de la MCC.	69
Figure III-8 : Structure de la commande à hystérésis de courant du CCM.....	70
Figure III-9 : Allure de la vitesse de vent.....	70
Figure III-10 : Allure de la vitesse de rotation réelle avec sa référence (rad/s).....	71
Figure III-11 : Allure du coefficient de puissance (C_p).....	71
Figure III-12 Allure de la vitesse spécifique (λ).....	72
Figure III-13 :Allure du courant continu de MCC réel.....	72
Figure III-14 : Structure de la commande à hystérésis de courant du CCR.	74
Figure III-15 : Schéma fonctionnel de l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}).	74
Figure III-16 : Allure de la tension du bus continu (V_{dc}) (V).....	75
Figure III-17 : courant de la phase A (i_{ag}) et le courant référence (i_{agref}).....	76
Figure III-18 : Allure de la tension de la phase (a) (V_a) et son courant correspondant (i_a).	76
Figure III-19 : Allures des puissances activer (p_{ui_g}) (W) et réactive (q_{rea_g}) (W).	77

Liste des tableaux

Tableau I-1: Classification de turbines éoliennes.	10
---	----

Nomenclatures

C_r : C'est le couple résistant imposé par la charge

E_a : Force contre-électromotrice en Volts

E_c : Energie cinétique en (joule).

P_m : La puissance extraite par le rotor en (W)

V_1 : La vitesse avant le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

V_2 : La vitesse après le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

V_{ol} : C'est le volume de l'air qui fait tourner les pâles de l'éolienne en (m^3)

m_t : Est la masse par seconde (Kg/s)

a : Nombre de pair de voies de l'enroulement d'induit

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

C_p : coefficient de puissance

E : force électromotrice

E : L'énergie en joule (j).

E : la f.é.m. (V)

f : Coefficient de frottement visqueux ;

G : rapport de multiplication ;

I : courant consommé par le moteur

I : le courant d'induit (A)

J : Inertie totale des parties tournantes [kg.m-3];

m : C'est la masse de l'air en (Kg).

N : Nombre total de brins actifs de l'induit

ϕ : Flux utile par pôle (Weber)

p : Nombre de pair de pôles de l'inducteur

P_{em} : la puissance électromagnétique (W)

P_{fer} : les pertes ferromagnétiques (W)

P_j : les pertes joules à l'induit (W)

P_{je} : les pertes joules à l'inducteur (W)

$P_{méca}$: les pertes mécaniques (W)

P_u : la puissance utile (W)

R : résistance interne du bobinage

r : la résistance d'inducteur (W)

R : la résistance d'induit (W)

S : C'est la surface balayée par les pâles de l'éolienne en (m^2).

t : Le temps en seconde (s).

T_{em} : le couple électromagnétique (N.m)

T_u : le couple utile (N.m)

U : Tension d'alimentation du moteur

v : C'est la vitesse de l'extrémité des pales en (m/s)

V : Vitesse du vent en (m/s).

V_0 : Valeur moyenne de la composante lente.

$V_t(t)$: Fluctuations provoquées par les turbulences.

λ : représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent

Ω : La vitesse angulaire des pales en (rad/s)

\mathcal{Q} : Vitesse de rotation (rd/s)

Ω_r : vitesse de la génératrice (arbre rapide en rad/s);

Ω_t : vitesse de rotation des pales (arbre lent en rad/s).

J : Le moment d'inertie total (machine + charge entraînée)

P : La puissance en watts (W).

R : La longueur des pales en (m)

e : Est l'épaisseur des pales en (m).

f : Le frottement proportionnel à la vitesse de rotation.

ρ : Est la masse volumique de l'air en général elle est égale à 1,25 (Kg/m³).

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
I Chapitre I Généralités sur les systèmes éoliens	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Historique.....	5
I.3 L'énergie Eoliennes en Algérie	6
I.3.1 Répartition régionale de la vitesse du vent	6
I.3.2 L'Atlas de la puissance en Algérie	7
I.4 Etat de l'art sur l'énergie éolienne	8
I.4.1 Définition de l'énergie éolienne	8
I.4.2 Définition de l'aérogénérateur :	8
I.4.3 Développement de l'énergie éolienne.....	9
I.4.4 Emplacement des parcs éoliens	9
I.4.5 Taille de l'éolienne :	9
I.4.6 Définition du vent :	10
I.4.7 La mesure du vent :.....	10
I.4.8 Principe de conversion d'énergie éolienne :	11
I.5 Classement des turbines éoliennes :.....	12
I.5.1 Eolienne à axe vertical :	12
I.5.2 Eoliennes à axe horizontal :	13
I.6 Les différentes technologies d'éoliennes :	15
I.6.1 Fonctionnement à vitesse fixe :	15
I.6.2 Fonctionnement à vitesse variable :	15
I.7 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :	16
I.7.1 Le rotor :	16
I.7.2 La nacelle :	17
I.7.3 Le mât (la tour) :	19
I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :	20
I.8.1 Des Avantages :	20
I.8.2 Inconvénients :	21
I.9 Application des éoliennes :	21
I.9.1 Systèmes isolés :	21
I.9.2 Systèmes hybrides :	22
I.9.3 Systèmes reliés au réseau :	22

I.10	Conversion mécanique électrique :	22
I.10.1	Machine asynchrone à cage :	23
I.10.2	Machine asynchrone à rotor bobinée :	24
I.10.3	Machine synchrone à excitation en courant continu :	25
I.10.4	Machine synchrone à aimants permanents :	26
I.10.5	Les machines à courant continu :	27
I.11	Conclusion :	27
II	Chapitre II Modélisations du système éolien étudié	28
II.1	Introduction :	29
II.2	Description du système éolien étudié	29
II.3	Principe de conversion de l'énergie éolienne	30
II.3.1	Modèle du vent :	30
II.3.2	La puissance délivrée par le vent	30
II.3.3	La limite de BETZ	34
2.2.1.	Zones de fonctionnement d'une éolienne	35
II.4	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :	36
II.4.1	Système à décrochage aérodynamique " <i>stall</i> " :	37
II.4.2	Système d'orientation des pales " <i>pitch</i> " :	38
II.4.3	Le système « <i>stall actif</i> »	38
II.5	Modélisation de la turbine	38
II.5.1	Modèle du multiplicateur :	38
II.5.2	Modéliser l'arbre de la génératrice :	39
II.5.3	Modélisation du générateur	40
II.6	Modélisation mathématique d'un MCC :	44
II.6.1	Force électromotrice induite :	45
II.6.2	Couple électromagnétique :	45
II.6.3	Equation électrique de l'induit :	45
II.6.4	Couple utile :	46
II.6.5	Bilan des puissances :	46
II.6.6	Le rendement :	46
II.6.7	Equation mécanique :	46
II.6.8	Fonctionnement en 4 quadrants du MCC	47
II.7	Modèle de hacheur	47

II.7.1	Domaine d'utilisation des hacheurs	48
II.7.2	Les différents types de hacheur :	48
II.8	Modélisation de l'onduleur	56
II.8.1	Types d'onduleurs autonomes de tension.....	56
II.9	Modélisation du bus continu :	59
II.10	Modélisation du filtre de connexion au réseau :	60
II.10.1	Fréquence de coupure des filtres RL :	60
II.11	Conclusion :	61
III	Chapitre III Commande du système éolien	62
III.1	INTRODUCTION.....	63
III.2	MODELISATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES	63
III.2.1	Modélisation de convertisseur coté machine (CCM).....	63
III.2.2	Modélisation du convertisseur coté réseau (CCR).....	64
III.3	COMMANDE A MLI.....	66
III.3.1	Principe de la MLI à hystérésis de courant	66
III.4	STRATEGIES DE COMMANDE DU SYSTEME EOLIEN	68
III.4.1	Stratégies de commande appliquées au CCM.....	68
III.4.2	Stratégies de commande appliquées au CCR.....	72
III.5	CONCLUSION	77
	Conclusion générale	78
	Références	79

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE :

L'électricité est devenue une énergie indispensable à la vie et sa consommation évolue de jour en jour. La partie majeure de cette production est à base d'hydrocarbures qui ne peut être exploitée que pour quelques décennies, ce qui laisse présager une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente. Il existe deux sources d'énergie en dehors des hydrocarbures qui sont en mesure de fournir de l'énergie à long terme, à savoir le charbon et l'énergie nucléaire. Plusieurs études estiment qu'il y a suffisamment de charbon pour plusieurs siècles au rythme actuel de consommation. Malheureusement, le charbon et le nucléaire présentent de sérieux problèmes d'environnement, parmi lesquels on peut citer le réchauffement climatique dû aux gaz à effet de serre et les différentes pollutions industrielles.

Par ailleurs la surexploitation des ressources naturelles fossiles limitées et épuisables dans le temps poussent les pays développés et émergents à se rabattre vers des énergies inépuisables, propres et renouvelables tels que le solaire, la géothermie, la biomasse et l'énergie éolienne. [1]

L'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer les hydrocarbures. Mais 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. Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. L'Allemagne est aujourd'hui le premier producteur mondial avec une production de 14.6 GW en 2003, l'Espagne est au deuxième rang avec 6.4 GW, les USA au troisième rang avec 6.3 GW et le Danemark au quatrième rang avec 3.1 GW. La France est au dixième rang européen avec 0.253 GW. L'Union Européenne avec 4,15 GW. Alors qu'en Algérie, nous sommes encore dans un stade préliminaire avec une seule ferme éolienne pilote d'une capacité nominale de 10MW, sachant que la vitesse moyenne annuelle du vent est comprise entre 2 et 6m/s. [2]

Les turbines modernes sont plus fiables et efficaces, leur bruit a été réduit de manière significative par rapport à leurs prédécesseurs. Bien que beaucoup d'améliorations aient été apportées, il faut plus de travail à effectuer pour améliorer leur pénétration dans le réseau, réduire leur coût de fabrication et d'installation, et améliorer leur efficacité pour toutes les vitesses du vent.

Le développement de nouvelles stratégies de commande pour maximiser l'obtention de la puissance à partir de la turbine et d'augmentation fera à production d'électricité de vent une source plus fiable de l'énergie à l'avenir. [3]

Les chercheurs travaillant dans le domaine des énergies renouvelables ont de ce fait été naturellement poussés à mettre en place un certain nombre de recherches dans le but d'améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie au réseau. Dans ce cadre, le mémoire ci-après décrit une étude sur l'utilisation des machines à courant continu dans un système éolien alimentant un réseau électrique.

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de 3 chapitres principaux décrits brièvement ci-après :

Dans le premier chapitre de ce mémoire un état de l'art de l'énergie éolienne sera présenté. Il s'agit d'une étude assez détaillée du système éolien et des différentes structures existantes. Puis, on aborde les différents types des génératrices utilisées dans la chaîne de conversion et les différentes architectures possibles.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation détaillée des différents systèmes formant le système éolien à savoir : La turbine, la machine à courant continu, le hacheur et l'onduleur triphasé).

Le troisième chapitre est réservé au développement des différentes stratégies de commande appliquées aux différents convertisseurs (Hacheur et l'onduleur) pour faire fonctionner le système éolien en mode MPPT afin d'extraire le maximum de puissance du vent. La commande de l'onduleur permettra d'injecter la puissance maximale produite dans le réseau électrique.

Enfin, nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale sur les travaux réalisés et nous avancerons quelques perspectives pour donner une suite fructueuse à ce travail dans le futur.

Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction

L'énergie éolienne a été longtemps oubliée alors qu'elle était déjà exploitée depuis l'antiquité avec l'utilisation des moulins à vent. Cependant, elle connaît depuis environ 40 ans un essor sans précédent notamment après la crise pétrolière de 1973 qui a alerté les états producteurs d'énergie fossile. En effet, après l'an 2000, le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable ou l'éolien occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ceci s'est traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien pour lequel les aérogénérateurs ont atteint une certaine maturité technique. Ces aérogénérateurs, généralement à axe horizontal, fonctionnent à vitesse variable permettant l'augmentation de la puissance produite. Le développement des convertisseurs statiques et leur commande a permis le contrôle des puissances produites par ces aérogénérateurs [4].

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux éoliennes à vitesse variable et à axe horizontal avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'aux différents types de générateurs utilisés dans cette chaîne de conversion.

I.2 Historique

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme. Elle fut utilisée pour la propulsion des navires ensuite pour les moulins à céréales. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans avant J-C. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moulinier le blé et assécher les terres inondées au Pays-Bas.

En 1890 Paul La Cour a eu l'idée d'associer une turbine éolienne à une génératrice. Cette application a évolué en termes de puissance et de rendement durant le 20^{ème} siècle et jusqu'au début du 21^{ème}. Elle fut utilisée à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-Bas se sont avérés les leaders incontestés dans les domaines de la construction des éoliennes (50% des éoliennes du monde sont de fabrication Hollandaise) [5].

La crise pétrolière de 1973 a alerté les états non producteurs d'énergie fossile sur la nécessité du développement de l'énergie éolienne. En 2006 l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [6].

I.3 L'énergie Eoliennes en Algérie

I.3.1 Répartition régionale de la vitesse du vent

Pour installer une éolienne il faut choisir un site où la vitesse du vent fournirait l'énergie nécessaire ; nous devons donc faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites. La figure I.1 montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d' Energie Eolienne du Centre de Recherche en Energies Renouvelables (CDER, Algérie).[7]

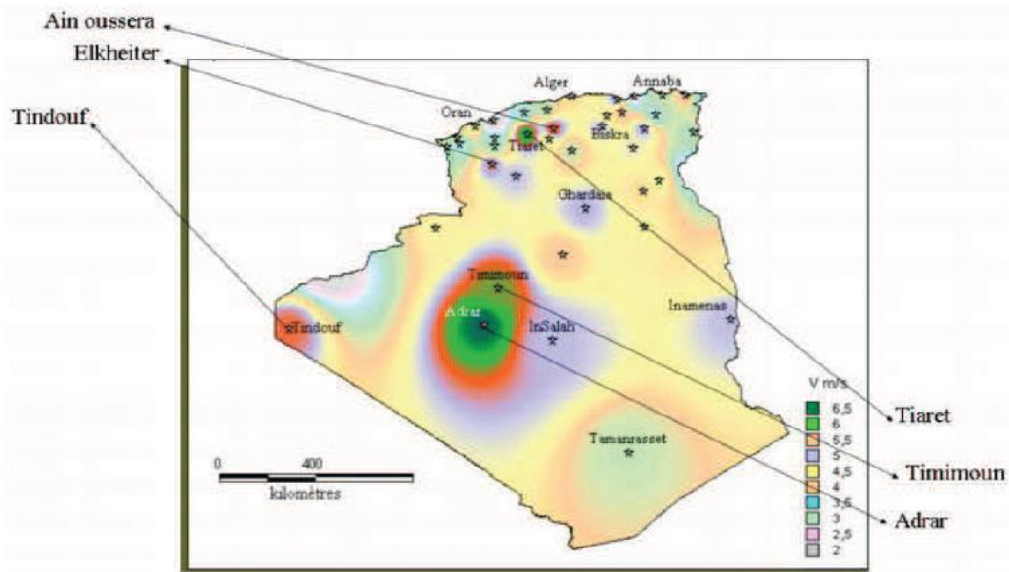


Figure I-1: Régions ventées en Algérie.

D'après les données du CDER, la figure I.2 indique les vitesses des vents pour différents sites situés en Algérie.

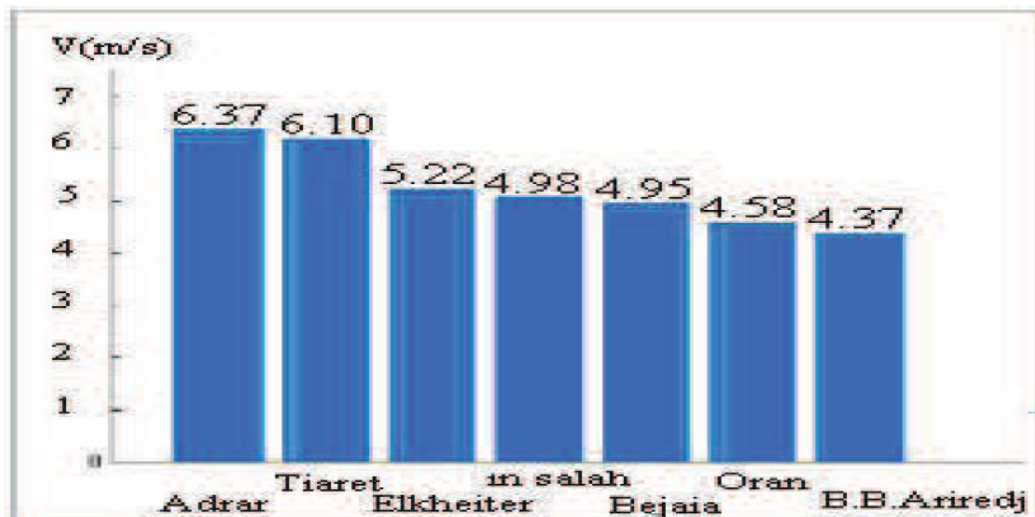


Figure I-2: Comparaison entre les vitesses moyennes de sites ventés.

I.3.2 L'Atlas de la puissance en Algérie

La figure ci-dessous (Figure I.3) représente l'atlas de la puissance énergétique récupérable à 50 m d'altitude en Algérie. [8].

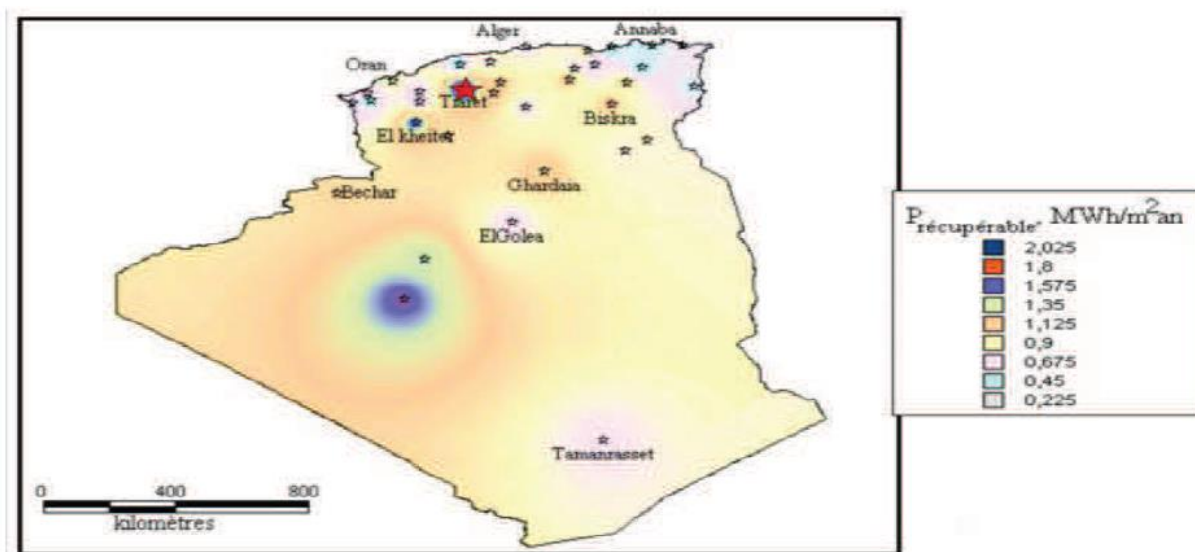


Figure I-3: Puissance énergétique récupérable en altitude à 50 m Algérie.

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4m /s (6m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER (laboratoire de l'énergie éolienne) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie.

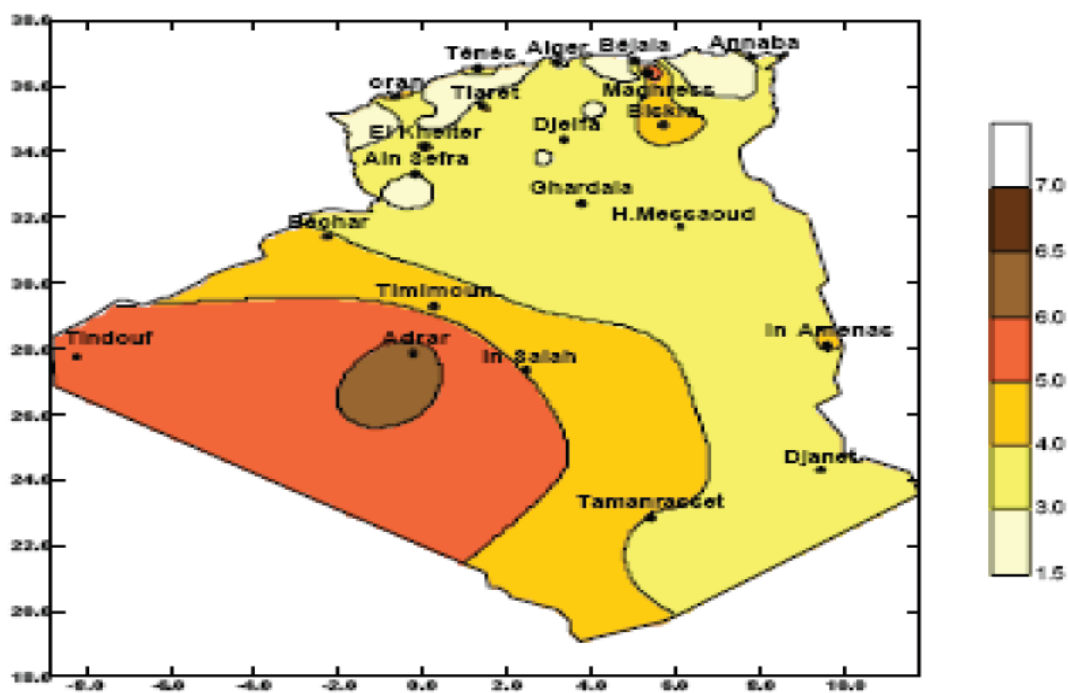


Figure I-4: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie.

La figure suivante représente une comparaison de puissances entre les sites ventés en Algérie

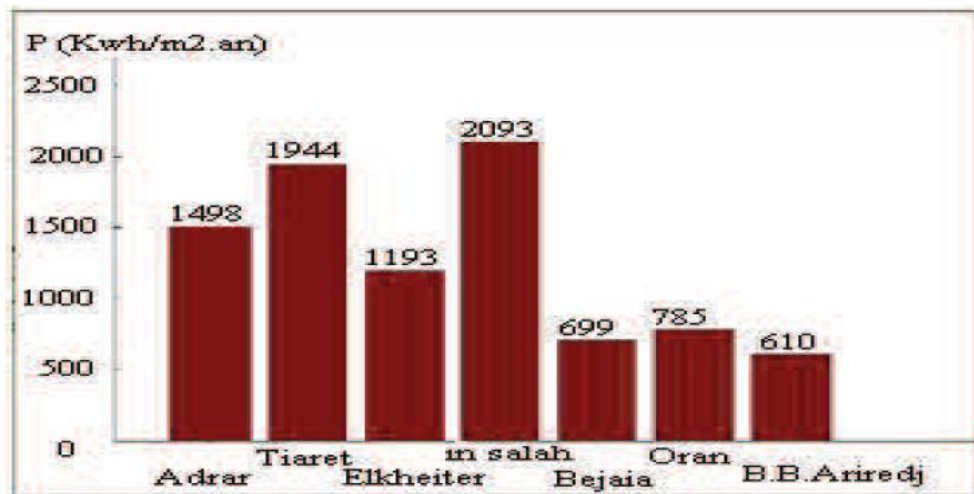


Figure I-5: Comparaison des puissances récupérables des Sites Ventés

I.4 Etat de l'art sur l'énergie éolienne

I.4.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Cette énergie est « renouvelable » c'est-à-dire non dégradée. De plus, c'est une énergie verte car elle produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.[9]

I.4.2 Définition de l'aérogénérateur :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.6). D'un premier regard, le processus paraît simple mais si on se concentre plus, on peut immédiatement découvrir qu'il s'agit d'un domaine très vaste qui représente un champ d'interaction de nombreuses disciplines scientifiques et du savoir-faire de la météorologie à l'écologie.[9]

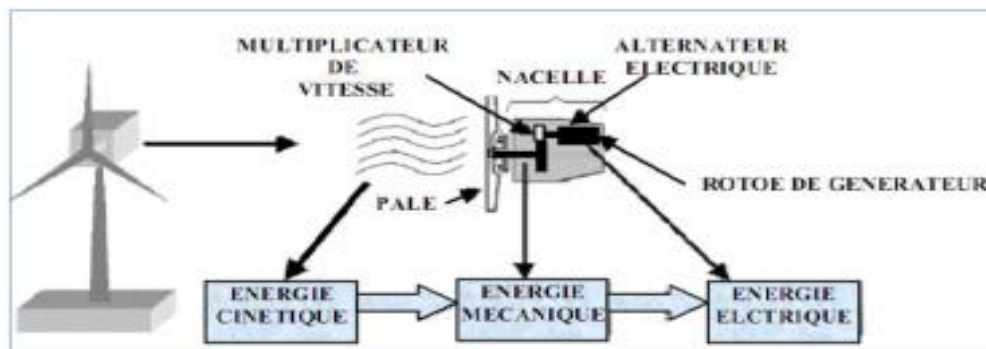


Figure I-6: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.4.3 Développement de l'énergie éolienne

La production de l'électricité par l'énergie éolienne s'est considérablement développée dans le monde ces dernières années (Figure I.7). [9]

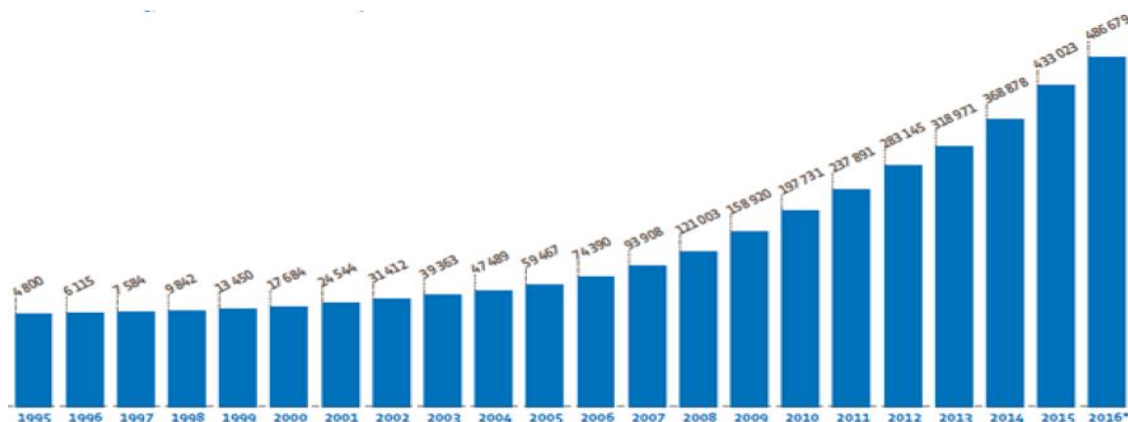


Figure I-7: Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW.

I.4.4 Emplacement des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale de puissance. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent des conditions intéressantes en termes de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits. Ces derniers comportent des dizaines comme on peut le voir sur la figure I.8. [5]



Figure I-8 : Installation d'éoliennes offshore en Mer du Nord (Photo Gunnar Brilse)

I.4.5 Taille de l'éolienne :

Avec le développement récent et le besoin de fournir des puissances croissantes au réseau, les constructeurs et les chercheurs mettent au point des éoliennes de plus en plus puissantes et donc plus grandes, ce qui présente la figure I.9. Pour utiliser le maximum de la force du vent, en cherche à ce que l'hélice balaie une surface où le vent est maximum. Pour cela les éoliennes sont très haut perchées pour ne pas subir les effets de sol qui freinent le vent.

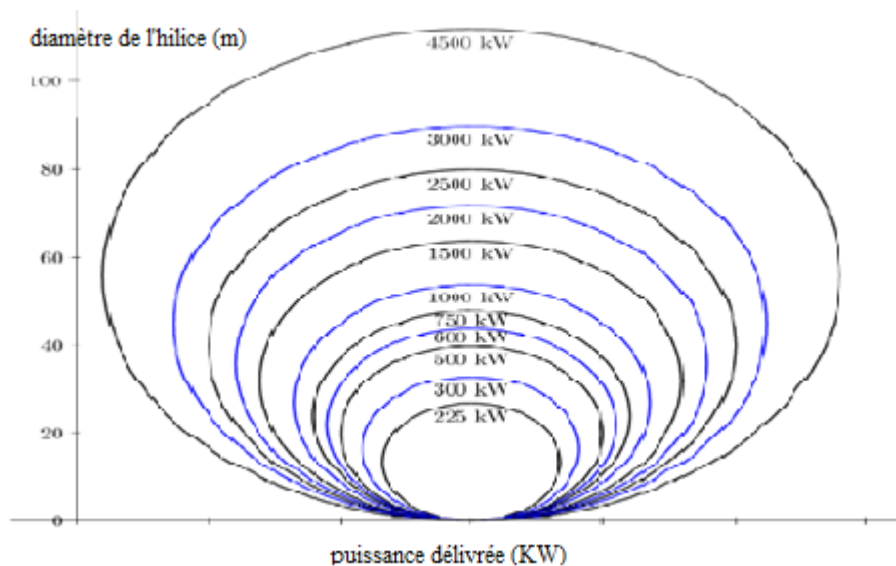


Figure I-9: Taille des hélices en m et puissance en KW.

Les plus grandes éoliennes commercialisées actuellement possèdent une hélice de plus de 100 mètres de diamètres. cette hélice est perchée a plus de 100 mètre de hauteur pour produire jusqu'à 4.5 MW. [5].

Le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice. [10]

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

Tableau I-1: Classification de turbines éoliennes.

I.4.6 Définition du vent :

Le vent est le déplacement de l'air au sein de l'atmosphère. Il est naît sous l'effet des différences de températures et de pressions. Ainsi, lorsqu'il existe une différence de pression entre deux points, l'air circule de l'endroit où la pression est la plus élevée (où l'air est froid) vers l'endroit où elle est la moins élevée (où l'air est chaud). En d'autres termes, l'air se déplace de la haute pression vers la basse pression. Le grand responsable de ce phénomène est le soleil. Il chauffe les mers et les continents mais pas au même rythme (matin et soir). Une fois réchauffés, ces derniers chauffent à leur tour les masses d'air qui les surplombent.[11]

I.4.7 La mesure du vent :

La mesure du vent comprend deux grandeurs à savoir, la vitesse et la direction du vent. Pour mesurer la vitesse du vent on se sert d'un anémomètre. Ce dernier est un instrument qui se compose de 3 petites coupelles hémisphériques, disposées à l'extrémité de bras métalliques espacés de 120° (Figure I.10.a). Un compteur relié à l'axe de rotation permet de lire la vitesse et de l'enregistrer suivant les modèles.

Aussi, il est à noter que la vitesse du vent peut être exprimée en milles, en kilomètres par heure, en mètres par seconde ou en nœuds.

Par ailleurs, pour connaître la direction des vents on se sert d'une girouette, souvent associée à l'anémomètre (Figure I.10.b). Lorsque le vent change de direction, il pousse sur la grosse partie de la flèche (l'arrière) jusqu'à ce qu'elle soit alignée avec le vent (parallèle au vent). Cela a pour conséquence de faire pointer la flèche dans la direction d'où provient le vent. On se réfère alors aux quatre principaux points cardinaux pour juger de la direction d'où vient le vent. On place habituellement la girouette à 10 m du sol.



Figure I-10: Outils de mesure de la vitesse du vent

Ainsi, la direction du vent est exprimée comme un point de la boussole d'où le vent souffle. De l'air se déplaçant du Sud-ouest au Nord-est s'appelle un vent de Sud-Ouest. A noter que la direction peut également être exprimée en degrés, où le vent de Sud-ouest est relatif à une direction de 220° . [11]

I.4.8 Principe de conversion d'énergie éolienne :

L'énergie cinétique contenue dans le vent est transformée en partie en énergie mécanique disponible sur l'arbre de la turbine, puis en énergie électrique par le générateur. Celle-ci ensuite distribuée aux normes sur le réseau électrique, via un transformateur. Le fonctionnement général est illustré par la figure I.11.

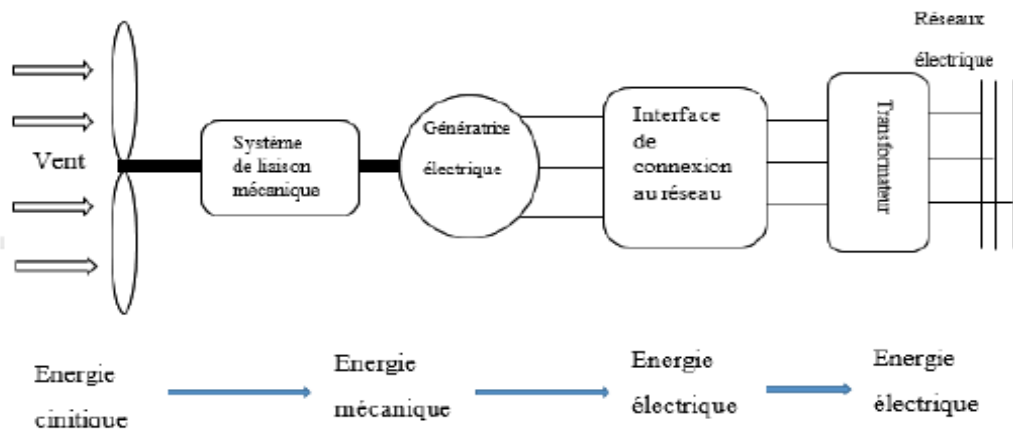


Figure I-11: principe de conversion d'énergie éolienne

Il existe différentes configurations possibles, qui peuvent avoir des différences importantes selon la conception mécaniques et la technologie utilisée. Néanmoins, un aérogénérateur classique est constitué de mêmes éléments de bases, à savoir [12] :

- une turbine ou l'hélice avec ses annexes mécaniques dont le rôle est de convertir une partie de l'énergie du vent en énergie mécanique ;
- un générateur électromécanique qui reçoit de l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique ;
- un système de liaison au réseau électrique.

I.5 Classement des turbines éoliennes :

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

I.5.1 Eolienne à axe vertical :

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux. [13]

I.5.1.1 L'éolienne de rotor Darrieux :

L'éolienne Darrieux est une éolienne qui se base sur un rotor en H, cylindrique ou hélicoïdale, qui tourne autour d'une tige fixe. Ce type d'éolienne verticale a de nombreux avantages dont celui de pouvoir être installé dans des endroits très éventés et de faire très peu de bruit comparé aux autres éoliennes du marché. L'inconvénient de ce type d'éolienne est d'avoir besoin d'un vent relativement fort pour commencer à tourner et donc à produire de l'énergie.

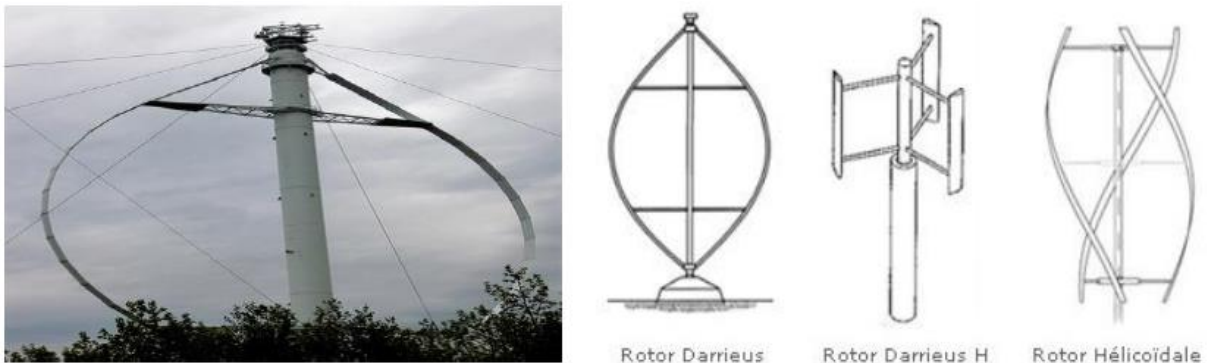


Figure I-12: Eoliennes de type Darrieux.

I.5.1.2 L'éolienne de rotor Savonius :

Ce type d'éolienne a l'avantage d'être particulièrement simple à installer car peu encombrante. Le principe consiste à ce que deux demi-cylindres tournent, s'entraînant l'un et l'autre, et ce même avec un vent très léger. Outre un esthétisme très design qui permet facilement aux installateurs de se projeter avec cette éolienne, l'éolienne Savonius peut très bien fonctionner avec de très faibles vents, ce qui n'est pas le cas avec l'éolienne Darrieux.

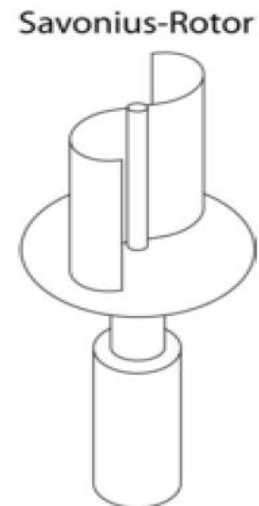


Figure I-13: Eoliennes de type Savonius.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit. [5]

I.5.1.3 Avantage :

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

I.5.1.4 Inconvénient :

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

I.5.2 Eoliennes à axe horizontal :

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, Ils sont constitués d'une ou plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Elles sont Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance et le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. [14]

Cette éolienne capte le vent grâce à des pales assemblées sous forme d'hélice. Ces pales tournent autour d'un mât qui se situe horizontalement par rapport au sol, ce qui explique le nom de cette éolienne.

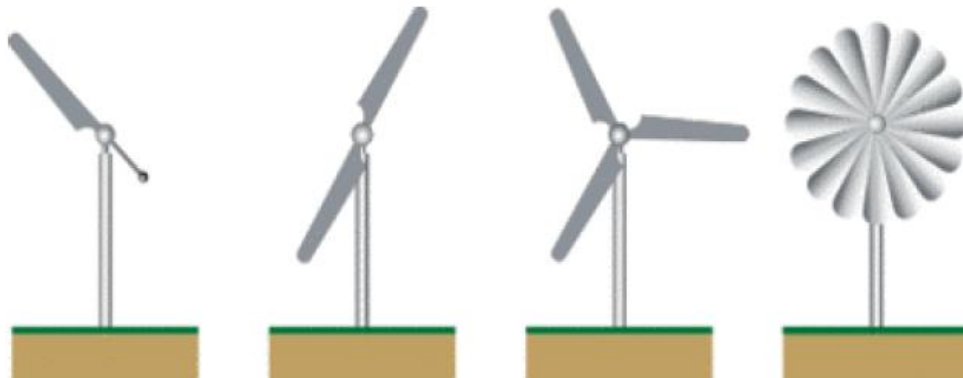


Figure I-14 : Les éoliennes à axe horizontal

Il existe deux catégories d'éoliennes à axe horizontal :

I.5.2.1 Amont :

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

I.5.2.2 Aval :

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.

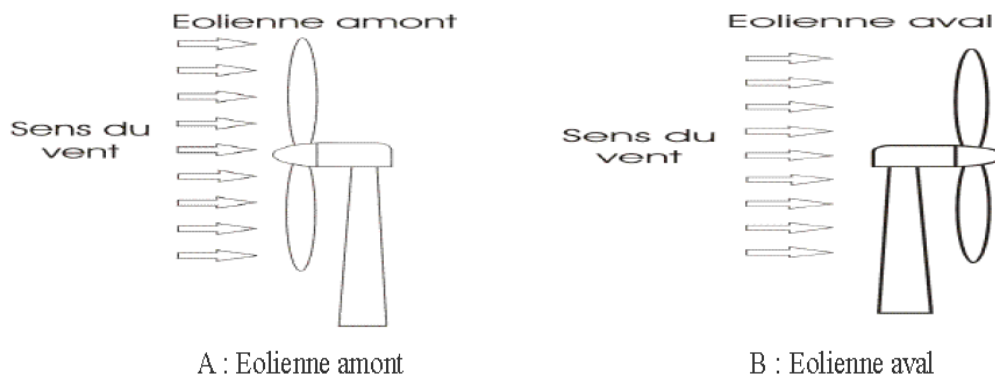


Figure I-15 : Eoliennes amont et aval

I.5.2.3 Avantage :

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

I.5.2.4 Inconvénient :

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
- Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.
- Elles sont de faible puissance destinée à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple.

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch). [15]

I.6 Les différentes technologies d'éoliennes :

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse variable

I.6.1 Fonctionnement à vitesse fixe :

Le générateur tourne à vitesse fixe ou varie très légèrement en jouant sur le glissement de la machine (seules les génératrices asynchrones sont utilisées dans ce cas). Deux génératrices asynchrones sont souvent utilisées dans ce type d'éoliennes. Un générateur dimensionné pour des faibles puissances correspondant à des vitesses de vent faibles et un générateur dimensionné pour des fortes puissances correspondant à des vitesses de vent plus élevés. Le problème majeur de cette solution est la complexité du montage qui augmente la masse embarquée. Une autre solution consiste à utiliser un câblage du stator qui peut être modifié afin de faire varier le nombre de pôles. Cette disposition permet également de proposer deux régimes de rotation l'un rapide en journée et l'autre plus lent la nuit permettant de diminuer le bruit. [16]

I.6.1.1 Les avantages de la vitesse fixe :

- Simplicité d'implantation.
- Plus grande fiabilité.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

I.6.1.2 Les inconvénients de la vitesse fixe :

- En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint.

I.6.2 Fonctionnement à vitesse variable :

Une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle du réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction des convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. [16]

I.6.2.1 Les avantages de la vitesse variable :

- Une meilleure exploitation de l'énergie du vent.
- La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques.
- Il est possible d'augmenter la vitesse de rotation du rotor lors des rafales, tout en stockant l'énergie supplémentaire en forme d'énergie rotative jusqu'à la fin de la rafale. Cela requiert évidemment un système de contrôle très intelligent qui est en mesure de distinguer entre une vraie rafale et simplement des vitesses élevées du vent. De cette manière, on arrive à réduire le couple maximal. [17]

I.6.2.2 Les inconvénients de la vitesse variable :

- L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.
- Convertisseur de puissance «complexe».
- Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA.

I.7 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :

On peut considérer trois composantes essentielles dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour.

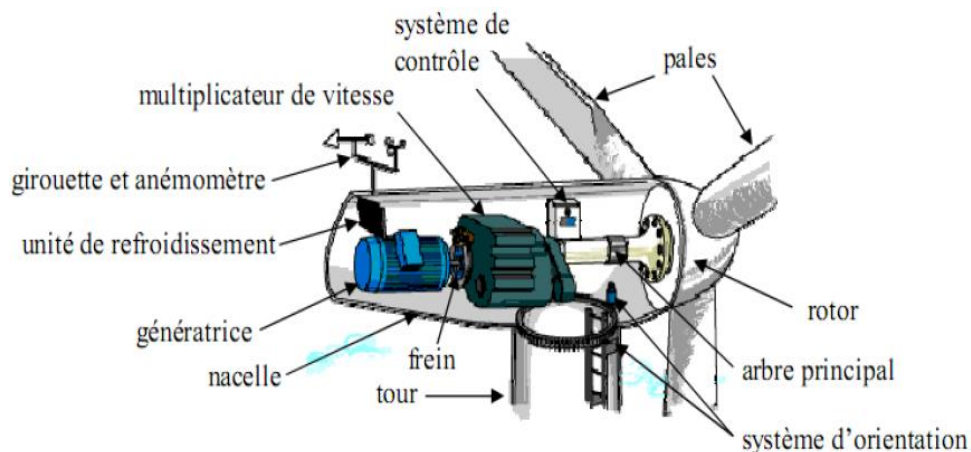


Figure I-16: Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

I.7.1 Le rotor :

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu.

Les pales sont généralement réalisées dans un mélange de fibres de verre et de matériaux composites. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopale et d'améliorer le coefficient de puissance. Ainsi, ce dernier augmente de 10 % en passant d'une pale à deux et de 3% en passant de deux à trois. Enfin, un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien plus des aspects esthétiques du système tripale par rapport au système bipale constituent des atouts supplémentaires. [18].

L'arbre primaire est l'arbre du rotor de la turbine éolienne. Il est dit arbre lent, car il tourne à des vitesses comprises entre 20 et 40 tr/min, il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur mécanique de vitesse.

Le moyeu est la partie mécanique qui supporte les pales figure I.17, Il est pourvu d'un système passif (aérodynamique), actif (vérins hydrauliques) ou mixte (active stall) qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation (prise de vent).



Figure I-17: Un moyeu

I.7.2 La nacelle :

C'est le coffret qui se trouve en haut de la tour, elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. On peut introduire la nacelle comme une petite usine de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique figure I.18.

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. [18]

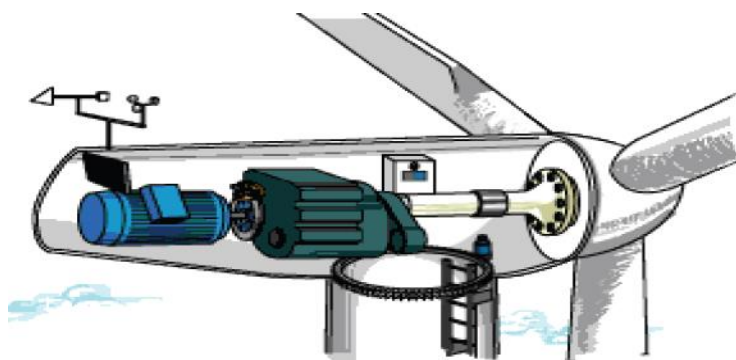


Figure I-18: Une nacelle

Les différents composants d'une nacelle :

I.7.2.1 Le multiplicateur de vitesse :

La vitesse de la turbine est très classiquement inférieure à la vitesse de la génératrice. Par conséquent, dans un système conventionnel de conversion de l'énergie éolienne, la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la génératrice. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. Le multiplicateur relie donc l'arbre (primaire) de la turbine éolienne à l'arbre (secondaire) de la génératrice électrique. La présence de ces multiplicateurs figure I.19 induit des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance. [18]

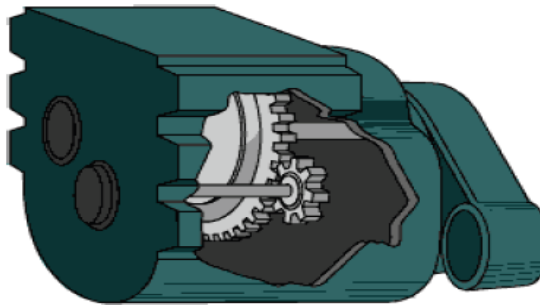


Figure I-19: Un multiplicateur

Il existe des possibilités d'entraînement direct sans multiplicateur. Les éoliennes à attaque directe sont constituées d'une génératrice directement connectée à l'axe de la turbine. Cela permet alors de réduire le coût de l'énergie électrique produite et le bruit du multiplicateur de vitesse. Toutefois, cette solution nécessite l'utilisation de machines électriques non conventionnelles et demeure, à l'heure actuelle, relativement peu répandue. [18]

I.7.2.2 L'arbre secondaire ou arbre rapide :

Elle tourne avec une vitesse donnée et entraîne la génératrice électrique, 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. [18]

I.7.2.3 La génératrice :

Elle peut être un générateur à courant continu ou un alternateur, dans tous les cas elle transforme l'énergie mécanique que lui transmet le rotor, en énergie électrique [18] figure I.20.



Figure I-20: Une génératrice

I.7.2.4 Le système de refroidissement :

Comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau. [18]

I.7.2.5 Le système contrôle-commande :

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et envoie un signal à l'ordinateur de l'opérateur de l'éolienne via un modem téléphonique, Il peut être placé aussi dans le mât [18] Figure I.21.



Figure I-21: Système de contrôle-commande

I.7.2.6 Le système d'orientation :

Le système d'orientation de la nacelle est constitué d'une couronne dentée (crémaillère), utilise des moteurs électriques pour pivoter la nacelle avec le rotor de sorte que celui-ci soit toujours orienté face au vent [18] figure I.22.



Figure I-22: Système d'orientation

I.7.3 Le mât (la tour) :

Généralement, le mât est un tube en acier ou une tour en treillis qui supporte le rotor et la nacelle figure I.24. Il renferme également les câbles qui assurent la liaison électrique. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition souhaitée au vent. En effet, plus le mât est haut, plus la

vitesse du vent, et donc la puissance captée, augmentent mais cela s'accompagne également de l'accroissement du coût de la structure. Généralement, la taille du mât est prise très légèrement supérieure au diamètre des pales. [18]



Figure 23: Eoliennes à tour en treillis et à tour tubulaire

I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.8.1 Des Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [19], [20]

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- 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.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie dans ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement est faible par rapport à celui des centrales aux énergies plus traditionnelles sur les sites plus venteux. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autres avantages économiques certains.

I.8.2 Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne à quelques désavantages [21]:

- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études montrent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- La qualité de la puissance électrique : La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs notamment dans les régions à fort potentiel de vent est augmentée.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique bien qu'en terme du coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

I.9 Application des éoliennes :

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes [22] :

I.9.1 Systèmes isolés :

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple :

- pour produire de l'électricité dans les îles,
- pour le pompage de l'eau dans des champs,
- Pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises.

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes.

Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

I.9.2 Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple :

- turbines éoliennes,
- génératrices Diesel,
- modules photovoltaïques, entre eux.

L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur

I.9.3 Systèmes reliés au réseau :

- Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ;
- toute la génération est livrée directement au réseau électrique.
- Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique

Les systèmes obéissent à une configuration de base ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage

I.10 Conversion mécanique électrique :

On peut regrouper les générateurs éoliens selon différentes catégories. Ils peuvent être classés selon :

- La nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, asynchrone, à courant continu...etc.).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Le type de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).
- Le type de capteur (à axe vertical ou horizontal).

Ces différentes catégories peuvent se croiser, par exemple, une éolienne peut être à vitesse variable, posséder un multiplicateur de vitesse et une génératrice asynchrone.

Le choix de l'utilisation des génératrices dans les applications éoliennes dépend de:

- La simplicité d'utilisation
- La longue durée de vie

- Le coût de maintenance qui doit être le plus faible que possible
- Le faible coût de construction et de réalisation.

Dans cette partie nous allons présenter les génératrices les plus utilisées dans la production éolienne ainsi que les systèmes d'électronique de puissance qui leurs sont associés.[23]

I.10.1 Machine asynchrone à cage :

L'une des machines les plus utilisées dans les applications éoliennes, est la machine asynchrone à cage. Elle est très robuste, nécessite peu d'entretien, et son coût de construction est faible. Son utilisation est simple et elle est aussi facile à connecter au réseau.

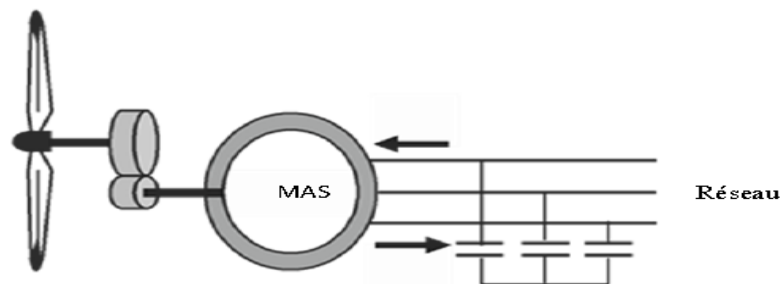


Figure I-24: Machine asynchrone à cage connectée directement au réseau.

Dans les éoliennes équipées d'une machine asynchrone à cage Figure I.24, la plage de variation du glissement est comprise entre 0 et 0.08, d'où l'impossibilité de fonctionnement à vitesse variable [23]. De plus comme la turbine tourne à une vitesse lente, il est alors nécessaire d'utiliser une boîte à vitesse. L'énergie réactive de la machine n'est pas contrôlée, elle dépend de la vitesse du rotor. Souvent des batteries de condensateur sont mises en parallèle et connectées au stator de la machine pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la machine.

Avec l'utilisation des convertisseurs d'électronique de puissance, le rendement des éoliennes est amélioré. La gamme de vitesse de la génératrice à laquelle on fait fonctionner les éoliennes est plus grande (la vitesse peut varier entre 0,8 et 1,2 de la vitesse de synchronisme). La tension produite par la génératrice au stator est d'abord redressée puis transformée en tension alternative à la fréquence du réseau grâce à un onduleur Figure. I.25. L'utilisation des convertisseurs a pour avantage de permettre de contrôler le facteur de puissance côté réseau, par contre pour magnétiser la machine, le réactif est toujours fourni par les batteries de condensateurs. Le coût de l'onduleur est élevée car ce dernier est dimensionné pour la puissance totale produite par l'éolienne, de plus la nécessité d'une boîte à vitesse rend cette configuration très coûteuse et peu exploitée.

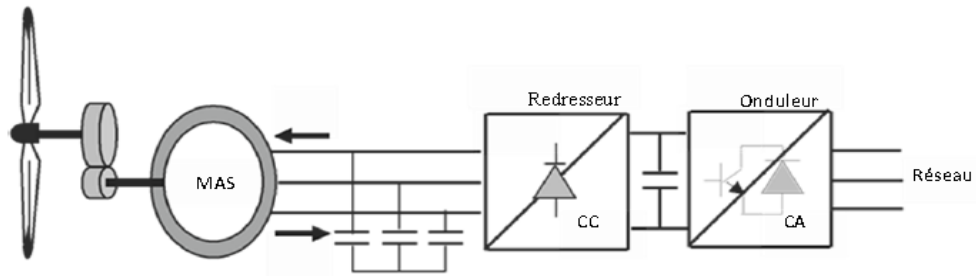


Figure I-25: Machine asynchrone à cage connectée au réseau à l'aide d'un convertisseur mono directionnel.

I.10.2 Machine asynchrone à rotor bobinée :

Cette machine nécessite l'utilisation d'une boîte à vitesse, par contre sa robustesse est légèrement diminuée par la présence du système à bagues et balais. La machine asynchrone à un rotor bobiné à un réglage électronique qui assure la variation du glissement. Ceci permet à l'ensemble de fonctionner à vitesse variable sur une plage de vitesse plus grande par rapport à la machine asynchrone à cage. Le fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants tel que Vestas, Gamesa [23], utilisent ce type de machine.

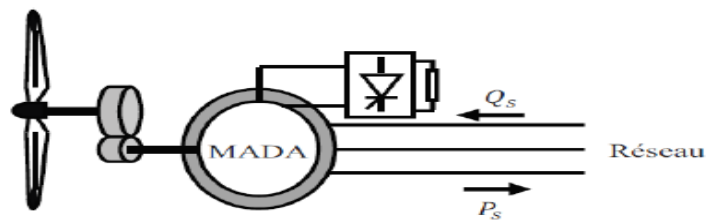


Figure I-26: Machine asynchrone à rotor bobiné connectée directement au réseau

La Figure I.26 montre le schéma du principe permettant de faire varier le glissement entre 0, 0.1 et 0.3 [24]. L'inconvénient de cette solution est la dissipation de la puissance du rotor dans les éléments résistifs, de plus la machine consomme de l'énergie réactive. L'un des grands avantages de la machine asynchrone à double alimentation Figure I.27 est le contrôle du glissement. La puissance dans le rotor peut avoir deux sens différents, ce qui augmente la plage d'exploitation de cette machine en vitesse 0,3 et 1,3 de la vitesse de synchronisme. Le rotor de la génératrice à double alimentation est couplé au réseau à travers deux convertisseurs. Le dimensionnement de la chaîne rotorique se limite à 30% de la puissance nominale de la machine. Le fonctionnement hyper synchrone permet de produire de l'énergie du rotor vers le réseau. De plus l'angle rotorique ne dépend pas de la position du rotor, ce qui donne une meilleure stabilité à la machine en comparaison à la machine synchrone [25].

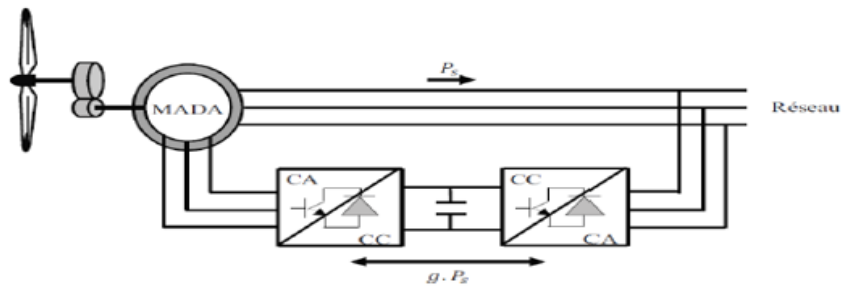


Figure I-27: Machine asynchrone à double alimentation

I.10.3 Machine synchrone à excitation en courant continu :

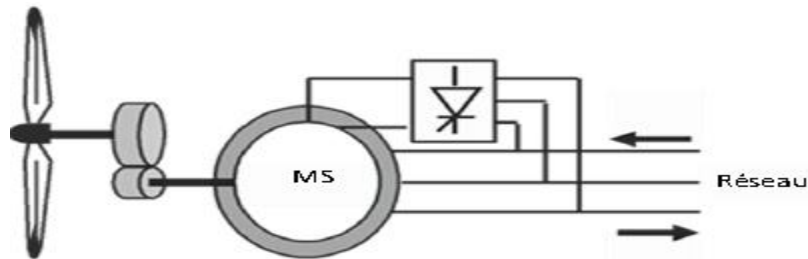


Figure I-28 : Machine synchrone à excitation en courant continu connectée directement au réseau

Avec une structure connectée directement au réseau sans convertisseur d'électronique de puissance. La machine synchrone n'a pas beaucoup été utilisée dans les installations éoliennes, comme le cas d'une machine asynchrone, car elle est plus complexe à commander et elle demande une vitesse constante au rotor pour créer une tension à fréquence constante au stator. La Figure I.28 représente le schéma principal de la machine synchrone connectée directement au réseau, où la régulation du système de la turbine doit maintenir une vitesse constante [24].

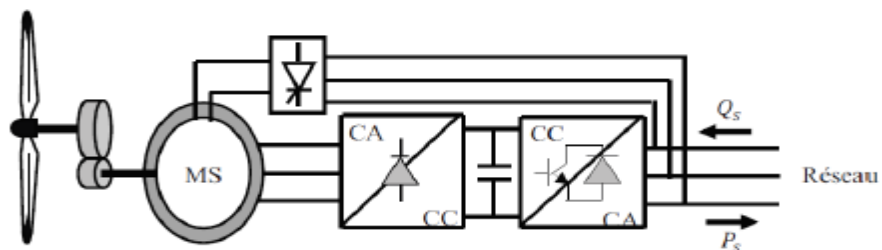


Figure I-29: Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/DC/AC

Une autre solution est proposée pour faire fonctionner la machine synchrone à vitesse variable. Elle consiste à utiliser un ensemble onduleur redresseur tel que représenté sur la Figure I.29. La plage de variation de la vitesse est de 0.5 jusqu'à 1.2 de la vitesse de synchronisme. Mais, contrairement aux cas de la génératrice asynchrone à Double Alimentation, la chaîne de conversion placée sur le stator doit être dimensionnée pour la totalité de la puissance du système de production.

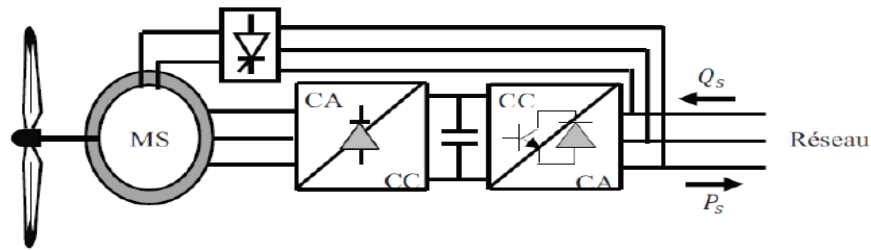


Figure I-30: Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur AC/DC/AC « configuration d'éolienne sans boîte à vitesse »

Une autre alternative permet de supprimer la boîte à vitesse Figure I.30 qui présente de grands problèmes pour la production de l'énergie éolienne. Dans ce cas la machine a un très grand nombre de paires de pôles pour compenser la fréquence par rapport à la vitesse réduite, mais ces avantages sont contrebalancés par une complexité de conception et une réactance synchrone importante qui dégrade le facteur de puissance. Il existe des problèmes liés à la commande causés par la forme non sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer et aux fortes saturations locales [25]. La plage de variation de vitesse reste grande, elle varie de 0.5 à 1.2 de la vitesse de synchronisme, et les deux convertisseurs utilisés pour contrôler la puissance débitée au réseau sont dimensionnés pour la puissance totale de la génératrice.

I.10.4 Machine synchrone à aimants permanents :

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

Ce type de machine utilise un aimant permanent au rotor à plusieurs pôles, ce qui donne l'avantage de développer un très grand couple massique Figure I.31 et de supprimer la boîte à vitesse. De plus la machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le circuit rotorique. La plage de variation de vitesse est de 0.6 jusqu'à 1.2 de la vitesse de synchronisme.

Les systèmes sans boîte à vitesse ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais pour les génératrices à aimants. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple).

Les machines synchrones à aimants permanents ont généralement un bobinage fractionnaire qui permet d'obtenir un grand nombre de paires de pôles avec un nombre réduit d'encoches au stator. Ce type de bobinage crée un champ d'entrefer contenant de nombreux harmoniques qui produisent des pertes joule [24], (cuivre et isolat, ce qui accélère le claquage des isolants et réduit la durée de vie du cuivre).

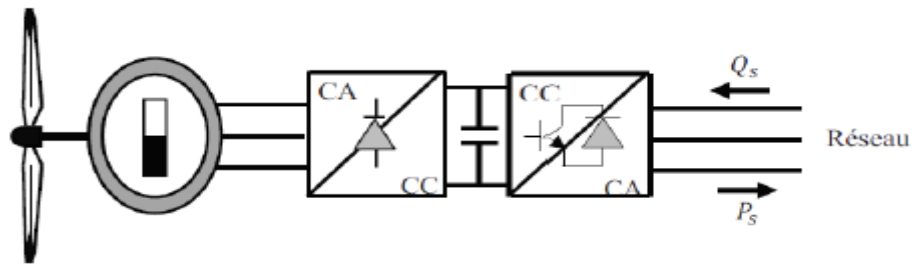


Figure I-31: Machine synchrone à aimants permanents

I.10.5 Les machines à courant continu :

Les moteurs à courant continu constituent l'essentiel du mouvement mécanique que nous voyons autour de nous. Ils convertissent l'énergie électrique sous forme de courant continu en énergie mécanique. En raison de son fonctionnement et de ses contrôles simples et en raison de sa disponibilité dans une large gamme de puissances nominales, il a été choisi pour simuler le vent dans le système d'éolienne. Nous nous concentrerons sur les moteurs à courant continu et leur utilisation comme génératrices dans les systèmes éoliens dans le chapitre suivant.

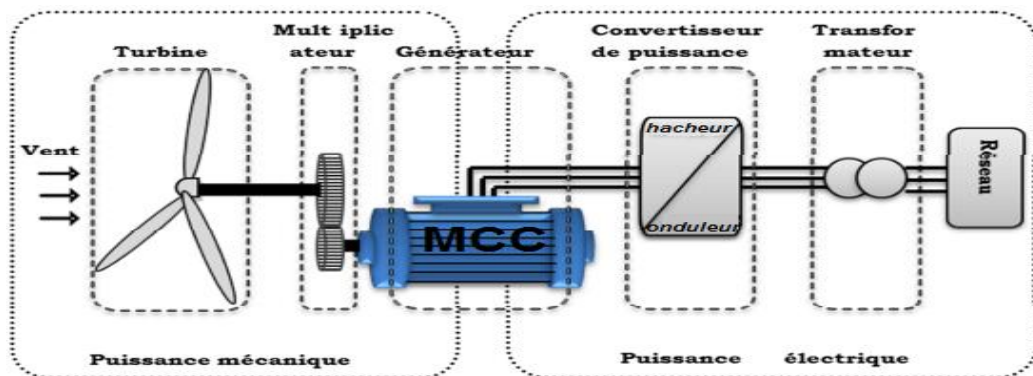


Figure I-32: Machine à courant continu.

I.11 Conclusion :

Une brève description du domaine des énergies éoliennes a été présentée dans ce chapitre. Quelques principales notions sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, ses types de sa classification, ses principaux constituants et son principe de fonctionnement d'une chaîne éolienne, les différents types de machines utilisées caractérisant leurs principes de fonctionnement. Ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients.

Après avoir présenté les différentes génératrices (machines) utilisées dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. La suite de ce travail est principalement consacrée à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

Chapitre II

Modélisations du système éolien étudié

II.1 Introduction :

Comme s'est déjà dit auparavant, Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique, et d'une manière générale une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, une éolienne doit comporter :

- un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pâles de l'éolienne, orientation de la nacelle).
- un système qui permet de la contrôler électriquement (Machine électrique associée à l'électronique de commande).

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation du système éolien

II.2 Description du système éolien étudié

La chaîne de conversion éolienne sur laquelle sont basés les travaux de cette mémoire est constituée d'une turbine éolienne, un multiplicateur, une machine à courant continu (MCC), un bus continu et deux convertisseurs statiques de puissance (hacheur + onduleur).

Le système éolien étudié se compose d'une turbine éolienne entraînant une machine à courant continu (MCC) à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur de vitesse. La machine à courant continu est connectée au réseau électrique à travers de deux convertisseurs statiques (hacheur + Onduleur) qui sont mis en cascade à travers un bus continu, comme le montre la figure II.1.

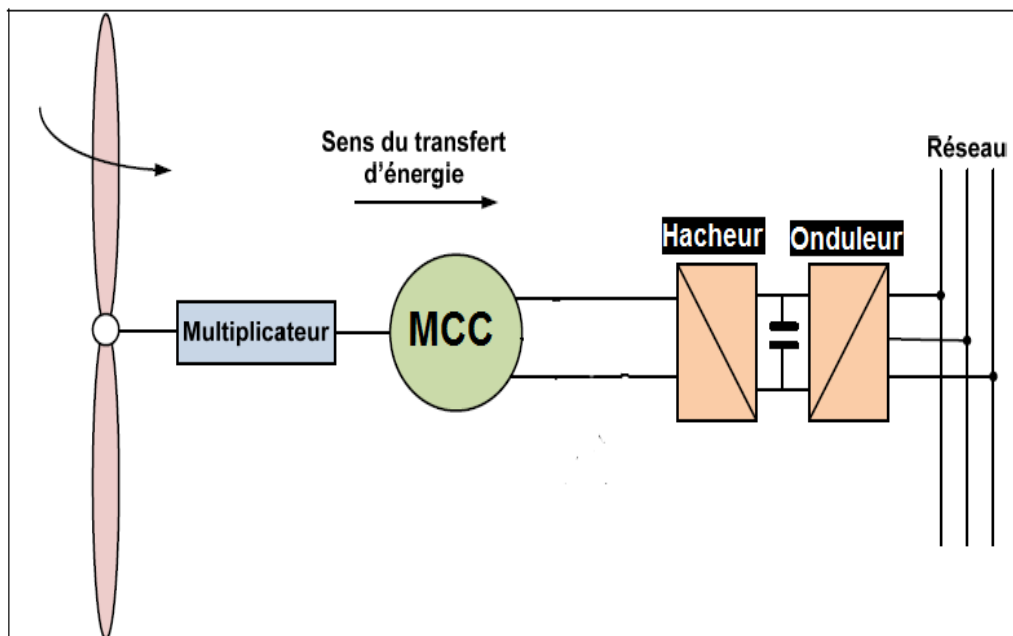


Figure II-1: Système de conversion éolienne à base de la MCC

II.3 Principe de conversion de l'énergie éolienne

II.3.1 Modèle du vent :

Le vent représente la source de l'énergie électrique produite par l'éolienne. Tout en étant l'entrée et la raison d'être du système éolien, Il est également la perturbation principale. Le vent est une grandeur stochastique même si certaines de ses caractéristiques sont déterministes. On ne peut pas le représenter par des expressions exclusivement déterministes. Ce sont avant tout les paramètres statistiques qui le définissent. La vitesse du vent ($V(t)$) peut être décomposée en deux composantes : une moyenne variant lentement, et l'autre avec des fluctuations tel que :

$$V(t) = V_0 + V_t(t) \quad (II.1)$$

Avec:

V_0 : Valeur moyenne de la composante lente.

$V_t(t)$: Fluctuations provoquées par les turbulences.

Il existe trois niveaux de vent suivant la valeur moyenne [26] :

- Vent faible pour ($6 < V_0 < 12$ m/s).
- Vent moyen ($12 < V_0 < 18$ m/s).
- Vent fort ($V_0 > 18$ m/s).

II.3.2 La puissance délivrée par le vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur l'arbre. L'énergie cinétique des particules d'air d'une masse m et qui se déplacent à une vitesse V est donnée par [18] :

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (II.2)$$

Avec,

E_c : Energie cinétique en (Joule).

V : Vitesse du vent en (m/s).

m : C'est la masse de l'air en (Kg).

Si on applique cette relation sur les éoliennes donc on doit préciser sur la masse qui tourne les pâles de l'éolienne, cette masse est donnée par la formule :

$$m = \rho \cdot V_{ol} \quad (II.3)$$

Avec :

ρ : Est la masse volumique de l'air en général elle est égale à $1,25$ (Kg/m^3).

V_{ol} : C'est le volume de l'air qui fait tourner les pâles de l'éolienne en (m^3) et ce volume est donné par la formule suivante :

$$V_{ol} = S \cdot e \quad (II.4)$$

Avec,

S : C'est la surface balayée par les pâles de l'éolienne en (m^2).

e : Est l'épaisseur des pales en (m).

Donc on peut exprimer l'énergie théoriquement produite par l'éolienne comme suit :

$$E_{c\ vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot e \cdot V^2 \quad (II.5)$$

Mais on sait que la puissance P est donnée par la relation suivante :

$$P = \frac{E}{t} \quad (II.6)$$

P : La puissance en watts (W).

E : L'énergie en joule (j).

t : Le temps en seconde (s).

Donc si on remplace la formule (II.5) on obtient la formule suivante :

$$P_{vent} = \frac{\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot e \cdot V^2}{t} \quad (II.7)$$

Avec :

$$V = \frac{d}{t}; \quad d = e; \quad V = \frac{e}{t} \quad (II.8)$$

$d = e$: la distance (épaisseur) de pales

Donc la formule sera :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (II.9)$$

S est donnée par la formule $S = \pi R^2$ avec R le rayon du rotor en (m), donc la puissance fournie par le vent est la suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (II.10)$$

L'équation (II.10) montre que la puissance fournie par le vent est proportionnelle au cube de la vitesse du vent et de carrée de rayon de rotor (la longueur de la pale) [18]. D'autre part, Une éolienne ne pourra jamais récupérer la puissance totale fournie par le vent donc il y a un coefficient que nous sommes obligés d'en tenir compte dans notre formule c'est le coefficient de puissance C_p . Donc la puissance réelle récupérée par l'éolienne est la suivante :

$$P = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \quad (II.11)$$

Ce coefficient de puissance indique l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie mécanique du vent en électricité. Ce coefficient diffère suivant les turbines car il

est proportionnel à la vitesse spécifique λ et l'angle de calage β (l'angle du vent par rapport à l'axe de pale) [18].

La vitesse spécifique λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. La vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne est donnée par la formule :

$$v_1 = R \cdot \Omega \quad (II.12)$$

Avec :

v_1 : C'est la vitesse de l'extrémité des pales en (m/s)

R : La longueur des pales en (m)

Ω : La vitesse angulaire des pales en (rad/s)

Et comme les éoliennes ont différentes longueurs de pales donc chaque éolienne est caractérisée par sa vitesse résultante de déplacement des pales. On peut introduire maintenant le rapport entre cette vitesse v_1 et la vitesse du vent (V) primaire par la vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V} \quad (II.13)$$

Cette vitesse est une caractéristique importante pour les éoliennes, chaque éolienne a sa vitesse spécifique nominale λ_{nom} et d'après cette vitesse on peut classer les éoliennes.

Dans la pratique il y a des rotors avec $0,9 < \lambda < 15$, dans des cas exceptionnels $\lambda = 20$. La vitesse spécifique nominale λ_{nom} permet de cataloguer les rotors de la façon suivante. Celles avec une valeur de λ égale à 3 et on les appelle les éoliennes lentes et celles avec λ supérieur à 4 et on les appelle éoliennes rapides comme on peut le constater sur la figure II.2. [18]

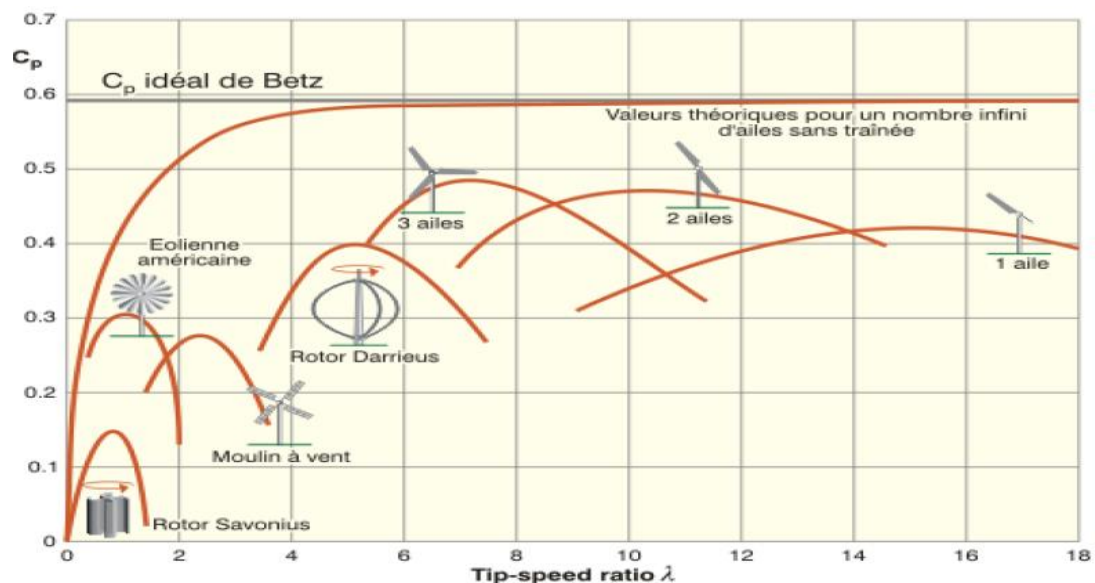


Figure II-2: Caractéristiques du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique

L'autre paramètre qui influe sur le coefficient de puissance est l'angle de calage β . La figure II.3 illustre la variation du C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de β

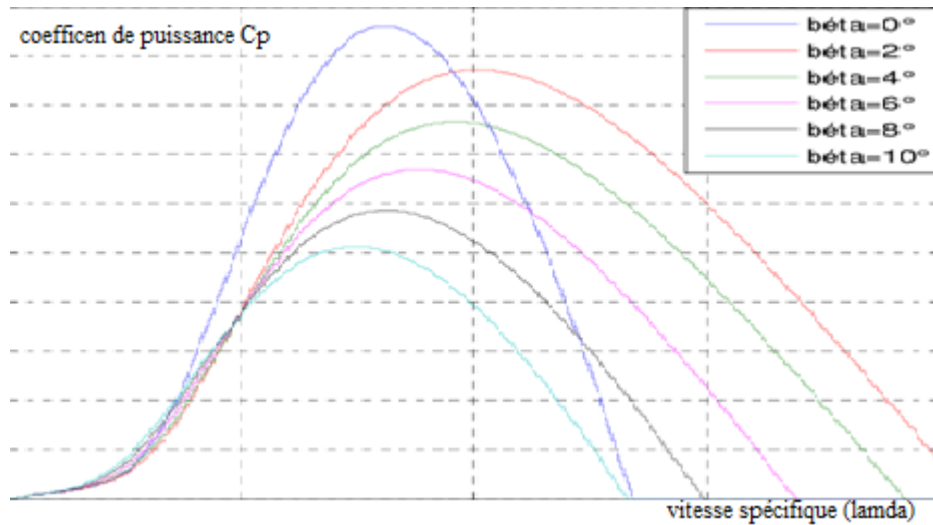


Figure II-3: Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p .

Théoriquement le coefficient de puissance C_p peut être exprimé par la relation empirique suivante :

$$C_p = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \cdot \lambda \quad (II.14)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (II.15)$$

$$C_1=0.5, C_2=116, C_3= 0.4, C_4=5, C_5=21, C_6=0.0068 ;$$

Sur la Figure II.3, plusieurs courbes sont distinguées, mais nous sommes intéressés à celle qui possède le plus haut sommet ($\beta=0$). Cette courbe est caractérisée par le point optimal ($\lambda_{opt}=8.1$; $C_{p \max} =0.475$) qui est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance C_p et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée. Nous remarquons que l'augmentation de β permet de réduire le coefficient C_p et par conséquent, provoque la diminution de la puissance mécanique récupérée sur l'axe de la turbine éolienne.

II.3.3 La limite de BETZ

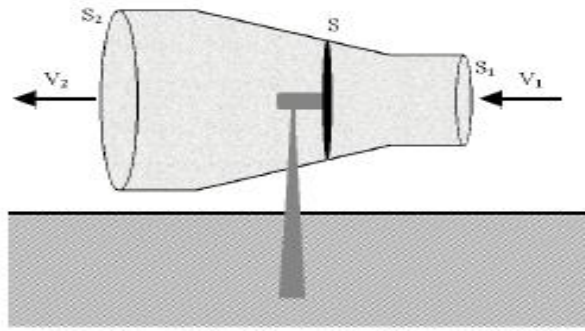


Figure II-4: Variation de la vitesse du vent

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure II.4 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (II.16)$$

La masse d'air en mouvement m_t (Kg/s) de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m_t = \rho \cdot S \cdot V \quad (II.17)$$

Avec V c'est la vitesse moyenne du vent traversant le rotor en (m/s) donc la formule sera :

$$m_t = \rho \cdot S \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (II.18)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (selon la seconde loi de Newton $P = ((E_{en} - E_{sort}) / 2)$).

$$P_m = \frac{1}{2} m_t (V_1^2 - V_2^2) \quad (II.19)$$

Avec :

P_m : La puissance extraite par le rotor en (W)

m_t : Est la masse par seconde (Kg/s)

V_1 : La vitesse avant le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

V_2 : La vitesse après le passage à travers le plan de rotor en (m/s)

On peut voir que la fonction atteint son maximum pour $V_2 / V_1 = 1/3$, (freinage du vent à $1/3$ de sa vitesse originale) la valeur maximale pour la puissance extractible du vent étant de $0,59$ ou $16/27$ de la puissance totale contenue dans le vent [18].

Il est important de souligner que le coefficient de puissance peut être en fonction de la vitesse relative $C_p(\lambda)$ pour les turbines éoliennes utilisant un système à décrochage aérodynamique "stall" ou en fonction de la vitesse relative λ et de l'angle de calage β , $C_p(\lambda, \beta)$ pour les turbines éoliennes utilisant un système d'orientation des pales "pitch" [8].

Soit en remplaçant m_t par son expression dans II.19 nous obtenons

$$P_m = \frac{\rho S}{4} (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (II.20)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_0 correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_1^3 \quad (II.21)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$C_p = \left(\frac{P_m}{P_{mt}} \right) = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \right) \quad (II.22)$$

D'où P_{mt} est la puissance totale d'un flux d'air non perturbé en watts (W)

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus figure II.5, on s'aperçoit que le ratio $\left(\frac{P_m}{P_{mt}} \right)$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de **16 / 27** soit **0,59**. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent et de l'angle de l'orientation de la pale β [19].

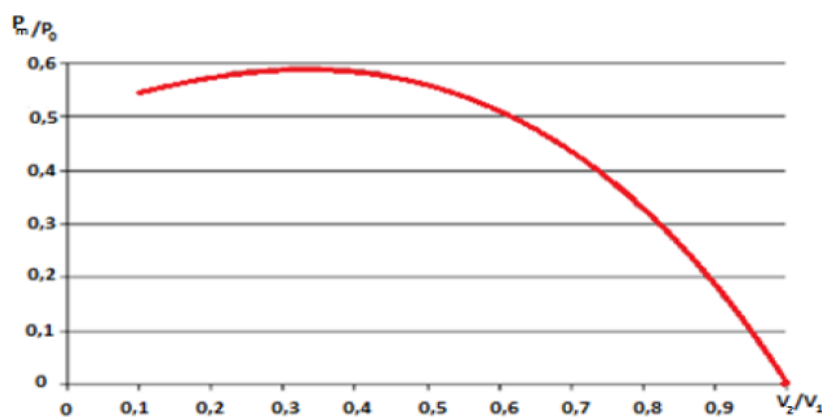


Figure II-5 : Variation du coefficient de puissance en fonction de différence de vitesse

2.2.1. Zones de fonctionnement d'une éolienne

On peut définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent figure II.6.

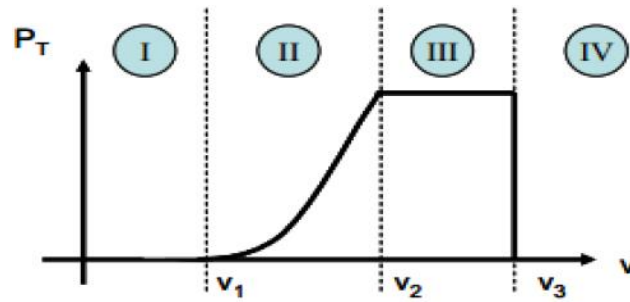


Figure II-6 : Zones de fonctionnement d'une éolienne

V1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, **V1** varie entre **2.5m/s** et **4m/s** pour les éoliennes de forte puissance.

V2 : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, **V2** varie entre **11.5m/s** et **15m/s** en fonction des technologies.

V3 : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, **V3** vaut **25m/s** [19].

Zone I ($V < V1$) : La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II ($V1 < V < V2$) : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III ($V2 < V < V3$) : La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de turbine P_n . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Zone IV ($V > V3$) : La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée (les pales de la turbine sont mises en drapeaux $\beta = 90^\circ$). Donc la puissance extraite est nulle.

II.4 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne :

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne contre le vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_{max} qui pourrait endommager la turbine.

Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on va s'intéresser pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir.

II.4.1 Système à décrochage aérodynamique "*stall*" :

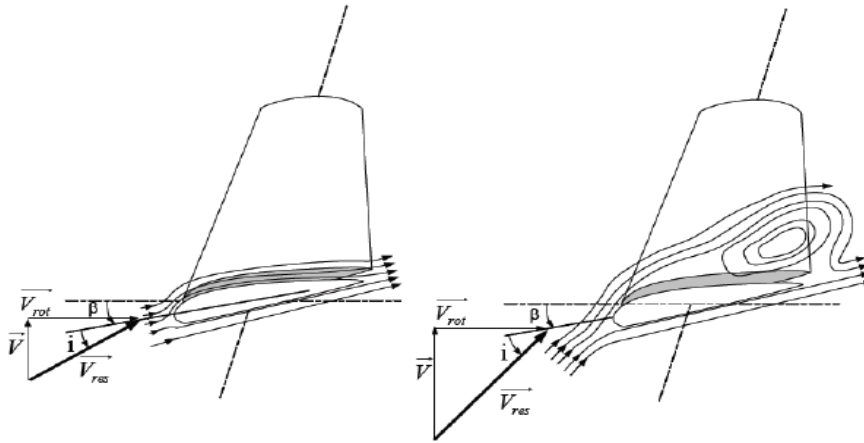


Figure II-7: Flux d'air sur un profil de pale "*stall*"

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "*stall*". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale Figure II.7 et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut, dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "*stall* actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent.

Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "*stall*" de la pale. La répercussion des variations de vitesse de vent sur le couple mécanique fourni par l'éolienne est ainsi moins importante [24].

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

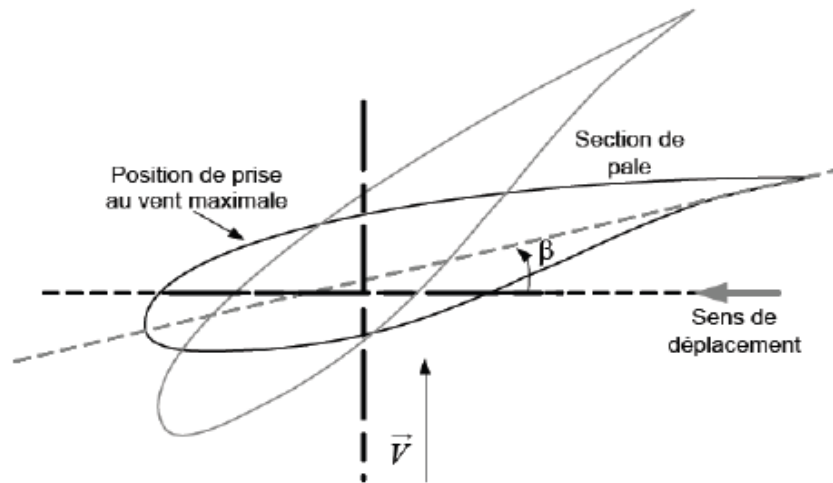


Figure II-8 : Variation de l'angle de calage d'une pale

Ce système de régulation utilise l'angle des pales pour maintenir une vitesse de rotation constante. En effet, il dévie la pale jusqu'à ce qu'elle prenne une position angulaire opportune à chaque variation de vent spécialement pour profiter au maximum du vent instantané ainsi mettre en contrôle la puissance en cas des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale.[18]

II.4.3 Le système « *stall actif* »

Le système "*stall actif*" est la combinaison des deux systèmes décrits précédemment, il est utilisé pour les machines de très forte puissance. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pales étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux [18].

II.5 Modélisation de la turbine

II.5.1 Modèle du multiplicateur :

La turbo génératrice doit effectuer deux tâches principales. Tout d'abord, elle doit produire de l'énergie électrique. Ensuite, en ajustant la charge électrique, le couple de freinage de la génératrice va contrôler la vitesse de la turbine pour atteindre le ratio de vitesse optimal correspondant au coefficient de puissance C_p optimal pour la vitesse du vent actuelle. Le système à vitesse variable proposé est censé être connecté à travers une boîte de vitesse. Cette dernière, branchée entre la turbine et la génératrice, adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice en multipliant la vitesse de la turbine par un simple gain comme suit :

$$\Omega_{mec} = G \cdot \Omega_t \quad (II.23)$$

Où :

Ω_{mec} : vitesse de la génératrice (arbre rapide en rad/s) ;

G : rapport de multiplication ;

Ω_t : vitesse de rotation des pales (arbre lent en rad/s).

Afin d'obtenir le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice, le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport de multiplication comme suit :

$$C_{mec} = \frac{1}{G} C_t \quad (II.24)$$

Où :

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

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

II.5.2 Modéliser l'arbre de la génératrice :

Le modèle mécanique du système éolien considère une inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

$$J = \frac{J_{tur}}{G^2} + J_{mach} \quad (II.25)$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique totale (C_{mec}) appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.26)$$

Le couple mécanique déduit de cette équation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II.27)$$

C_{em} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : le couple résistant du aux frottements.

Avec :

$$C_f = f \cdot \Omega_{mec} \quad (II.28)$$

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_g - C_{em} - f \Omega_{mec} \quad (II.29)$$

Où :

J : Inertie totale des parties tournantes [kg.m³];

f : Coefficient de frottement visqueux ;

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

Le schéma bloc suivant récapitule l'association entre le modèle de la turbine éolienne avec le modèle de l'arbre rapide de la génératrice.

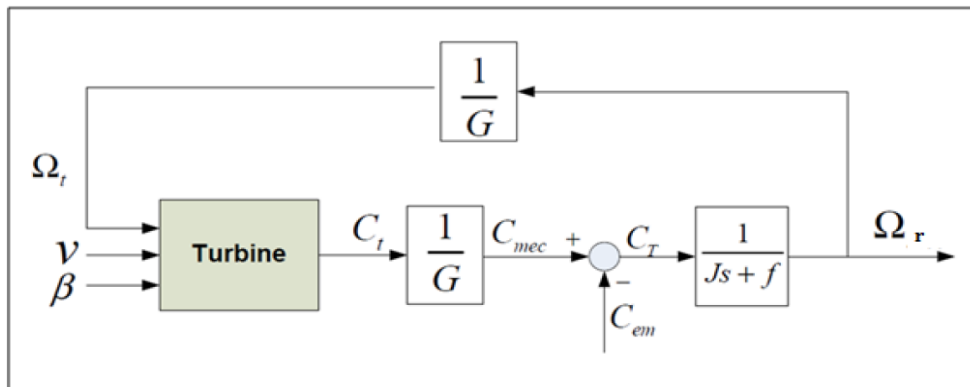


Figure II-9 : schéma le modèle de la turbine éolienne avec le modèle de l'arbre rapide de la génératrice

II.5.3 Modélisation du générateur

II.5.3.1 Définition :

Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques d'énergie : Soit ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique lorsqu'ils sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur. Soit ils convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînant. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en générateur [27].

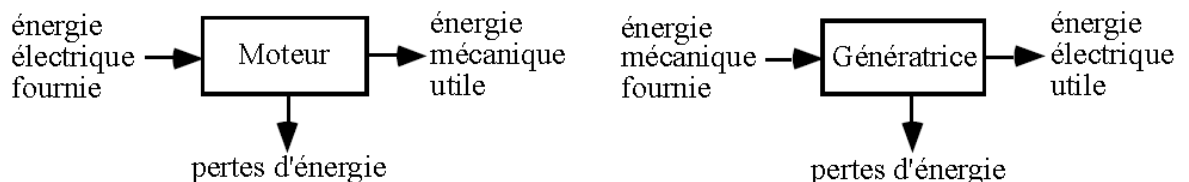


Figure II-10: Les modes de fonctionnements de la MCC

II.5.3.2 Description de la machine à courant continu :

Les machines à courant continu sont constituées comme tous les machines de 2 parties principales :

- La partie fixe : appelée stator que l'on appelle aussi INDUCTEUR
- La partie mobile : appelée rotor que l'on appelle aussi INDUIT

a. L'induit (rotor) :

L'induit est la partie tournante de la machine, le noyau d'induit est en fer pour canaliser les lignes de champ, les conducteurs sont logés dans des encoches sur le rotor, deux conducteurs forment une spire.

b. Inducteur (stator) :

C'est la partie fixe, Il est formé soit d'aimants permanents en ferrite soit de bobines placées autour des noyaux polaires. Lorsque les bobines sont parcourues par un courant continu, elles créent un champ magnétique dans le circuit magnétique de la machine notamment dans l'entrefer, espace séparant la partie fixe et la partie mobile.

c. Collecteur et balais :

Le dispositif collecteur / balais permet de faire circuler un courant dans l'induit, le collecteur est un ensemble de lames de cuivre, isolées latéralement les unes des autres par des feuilles de mica, et disposées suivant un cylindre, en bout de rotor. Ces lames sont réunies aux conducteurs de l'induit et transforment le courant alternatif dans le bobinage en courant continu. Les balais, portés par le rotor, frottent sur les lames du collecteur, ces contacts glissants entre lames et balais permettent d'établir une liaison électrique entre l'induit, qui tourne et l'extérieur de la machine.

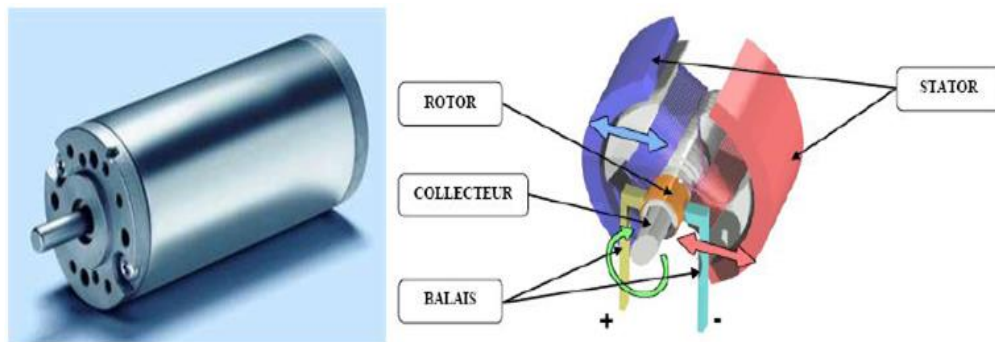


Figure II-11: schéma d'un moteur à courant continu.

II.5.3.3 Symbole de la machine à courant continu :

Figure II-12: Symbole de la machine à courant continu [28]

II.5.3.4 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du moteur à courant continu est basé sur le principe des forces de Laplace :

Un conducteur de longueur (L), placé dans un champ magnétique et parcouru par un courant, est soumis à une force électromagnétique.

Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit : Chacun des (N) conducteurs de longueurs (L) placé dans le champ (B) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une force électromagnétique perpendiculaire au conducteur :

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \alpha \quad (I - 1) \quad (II.30)$$

Ces forces de Laplace exercent un couple proportionnel à l'intensité (I) et au flux (Φ) sur le rotor. Le moteur se met à tourner à une vitesse proportionnelle à la tension d'alimentation (V) et, inversement proportionnelle au flux (Φ).

Au passage de tout conducteur de l'induit sur la ligne neutre, le courant qui le traverse change de sens grâce au collecteur. Le moteur conserve le même sens de rotation.

Pour inverser le sens de rotation du moteur, il convient d'inverser le sens du champ produit par l'inducteur par rapport au sens du courant circulant dans l'induit :

- Soit on inverse la polarité de la tension d'alimentation de l'induit.
- Soit on inverse la polarité d'alimentation du circuit d'excitation [27].

Le principe de fonctionnement est résumé sur les deux figures suivantes:

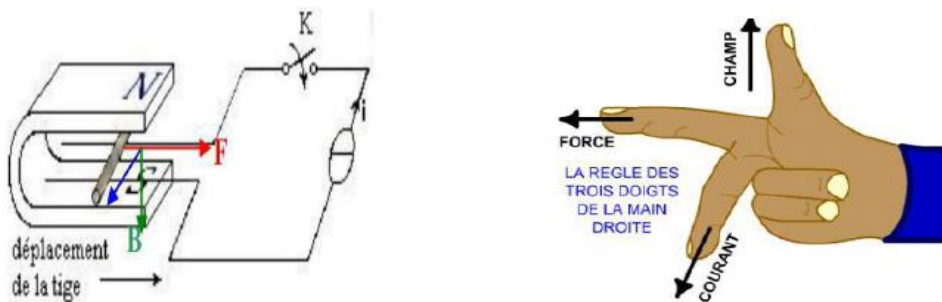


Figure II-13: Principe de fonctionnement d'un moteur à courant continu

II.5.3.5 Schéma équivalent d'un MCC électrique :

Le moteur se comporte comme une résistance en série avec un générateur de tension (FEM : force électromotrice).

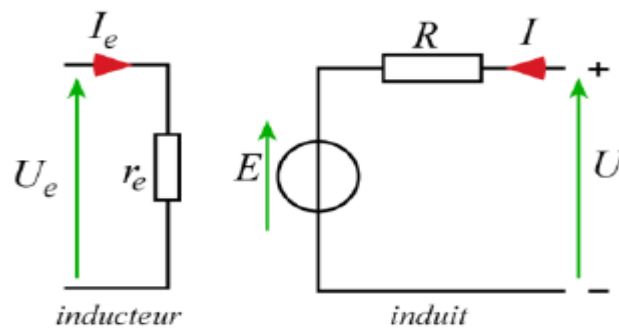


Figure II-14: Schéma équivalent d'un MCC électrique

I : courant consommé par le moteur

U : Tension d'alimentation du moteur

E : force électromotrice

R : résistance interne du bobinage

En réalité, il existe aussi une inductance L dans le circuit que l'on peut négliger ici si le courant est en régime continu.

II.5.3.6 Modes d'excitation de la MCC :

Les moteurs à courant continu se différencient par la manière dont on fournit le courant d'excitation. Les différents cas possibles sont [29]:

a. Excitation série :

Le circuit d'excitation est placé avec l'induit du moteur. Sa particularité est d'avoir un inducteur qui est traversé par le même courant, l'inducteur possède donc une résistance plus faible que celle des autres types de machines. L'inducteur est en série avec l'induit : une seule source d'alimentation suffit. On change le sens de rotation en permutant les connexions de l'induit et de l'inducteur. Le circuit électrique est représenté par la suivante :

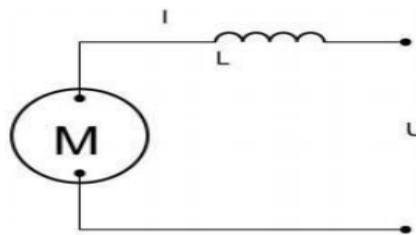


Figure II-15: Modélisation électrique d'un Moteur à excitation série

b. Excitation shunte :

L'enroulement d'excitation est connecté en parallèle sur l'alimentation du moteur, il possède les mêmes propriétés que le moteur à excitation séparée du fait que, dans les deux cas, l'inducteur constitue un circuit extérieur à celui de l'induit. Le circuit électrique est représenté par la suivante :

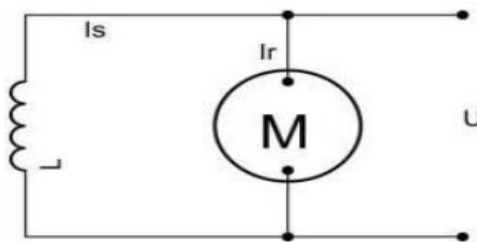


Figure II-16: Modélisation électrique d'un Moteur à excitation shunt

c. Excitation composée :

Le moteur à excitation composé, est raccordé avec deux excitations, excitation série et excitation shunt en même temps.

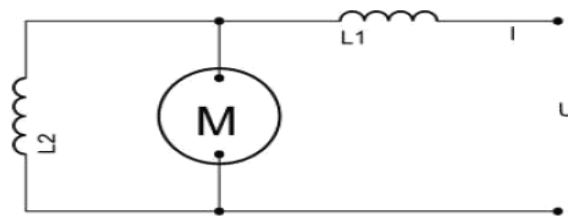


Figure II-17: Modélisation électrique d'un Moteur à excitation composée.

d. Moteur à excitation séparée :

Ce mode d'excitation nécessite deux sources d'alimentations distinctes. L'alimentation de l'enroulement inducteur est prise sur une source indépendante de la source principale. On change le sens de rotation en permutant les bornes de l'induit ou de l'inducteur. Le circuit électrique est représenté sur la figure suivante :

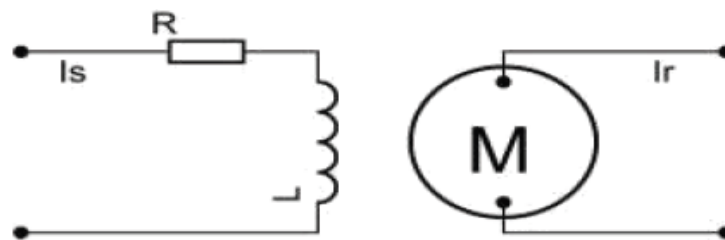


Figure II-18: Modélisation électrique d'un MCC à excitation séparée

II.6 Modélisation mathématique d'un MCC :

La machine à courant continu peut être modélisée à travers les équations électriques, électromécaniques et mécaniques.

Le modèle électrique de la machine à courant continu à excitation séparée est donné sur la Figure II.21.

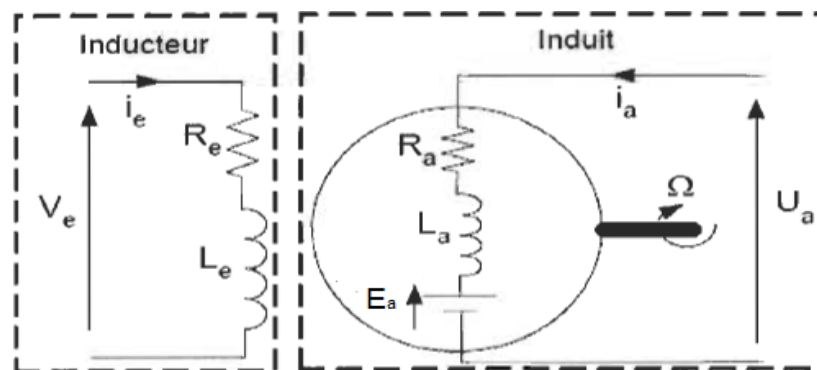


Figure II-19: Modèle électrique de la MCC à excitation séparée [5]

II.6.1 Force électromotrice induite :

L'induit est le siège d'une f.e.m (force électromotrice) E_a qui dépend de la structure de la machine et elle exprimée par :

$$E_a = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi} \Omega \cdot \phi \quad (II.31)$$

- p : Nombre de paire de pôles ;
- a : Nombre de paire de voies de l'enroulement d'induit ;
- N : Nombre total de brins actifs de l'induit ;
- ϕ : Flux utile par pôle (Weber) ;
- Ω : Vitesse de rotation (rd/s) ;
- E_a : Force contre-électromotrice en Volts ;

Le facteur $\frac{p}{a} \frac{N}{2\pi}$ est constant. Posons : $k = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi}$; il vient :

$$E_a = k \cdot \Omega \cdot \phi \quad (II.32)$$

On suppose que le flux fourni par l'inducteur est constant :

$$k \cdot \phi = K \quad (II.33)$$

Donc :

$$E_a = K \cdot \Omega \quad (II.34)$$

II.6.2 Couple électromagnétique :

Définition : C'est le couple qui correspond à la puissance passée de la forme électrique à la forme mécanique. Cela apparait clairement dans le bilan des puissances du moteur. Raisonons sur un moteur à excitation séparée :

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \quad (II.35)$$

$$P_{em} = E_a \cdot I_a \quad (II.36)$$

$$C_{em} = \frac{E_a \cdot I_a}{\Omega} = \frac{\frac{p}{a} \frac{N}{2\pi} \Omega \cdot \phi \cdot I_a}{\Omega} \quad (II.37)$$

$$C_{em} = k \cdot \phi \cdot I_a = K \cdot I_a \quad (II.38)$$

II.6.3 Equation électrique de l'induit :

D'après la (figure II.1), l'équation électrique de l'induit s'écrit :

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a \quad (II.39)$$

Soit en régime permanent :

$$U_a = R_a I_a + E_a \quad (II.40)$$

D'où l'on tire l'expression de la f.e.m :

$$E_a = V_a - R_a I_a \quad (II.41)$$

II.6.4 Couple utile :

C'est la puissance mécanique disponible sur l'arbre du moteur

$$C_u = \frac{P_u}{\omega} = \frac{P_{em} - P_c}{\omega} = C_{em} - C_p \quad (II.42)$$

C_p : couples des pertes.

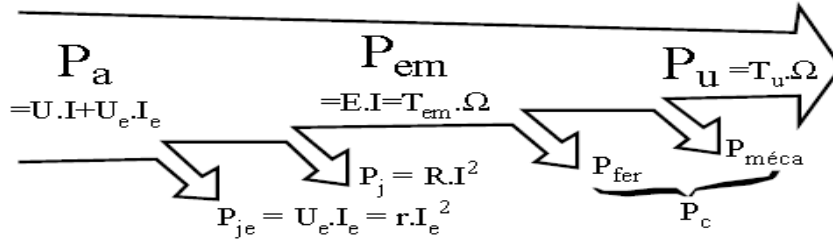
II.6.5 Bilan des puissances :

Figure II-20: schéma de la Bilan des puissances.

P_{em} : la puissance électromagnétique (W) ;

P_u : la puissance utile (W) ;

P_{je} : les pertes joules à l'inducteur (W) ;

P_j : les pertes joules à l'induit (W) ;

P_{fer} : les pertes ferromagnétiques (W) ;

$P_{méca}$: les pertes mécaniques (W) ;

E : la f.é.m. (V) ;

I : le courant d'induit (A) ;

T_{em} : le couple électromagnétique (N.m) ;

T_u : le couple utile (N.m) ;

R : la résistance d'induit (W) ;

r : la résistance d'inducteur (W).

II.6.6 Le rendement :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (II.43)$$

II.6.7 Equation mécanique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = -f\Omega - C_r + C_{em} \quad (II.44)$$

C_r : C'est le couple résistant imposé par la charge;

J : Le moment d'inertie total (machine + charge entraînée);

f : Le frottement proportionnel à la vitesse de rotation.

II.6.8 Fonctionnement en 4 quadrants du MCC

Les moteurs (MCC) convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique et sont capables de fournir une puissance mécanique suffisante pour démarrer puis entraîner une charge en mouvement. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en moteur.

Mais ils peuvent aussi convertir l'énergie mécanique reçue en énergie électrique lorsqu'ils subissent l'action d'une charge entraînant. On dit alors qu'ils ont un fonctionnement en génératrice, capable de se comporter comme un frein.

Fonctionnement des machines à courant continu dans les 4 quadrants : le variateur de vitesse associé au MCC sait gérer des accélérations et décélérations, ainsi que des freinages dans toutes les situations disponibles.[30] (Voir la figure suivante:).

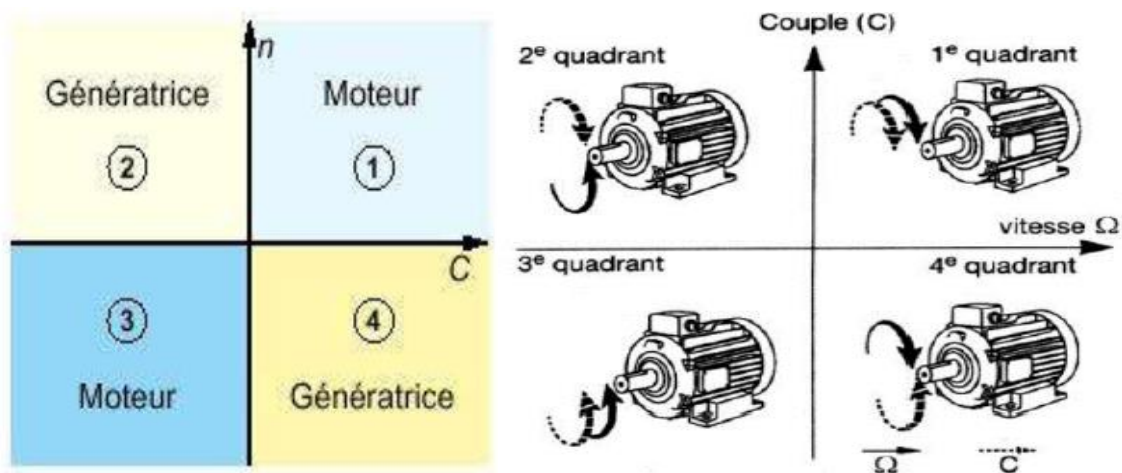


Figure II-21: Les quatre quadrants de fonctionnement d'une machine électrique tournante.

La figure ci-contre représente les différents modes de fonctionnement du moteur en fonction du signe de la vitesse et du couple au niveau de l'arbre.

Les quadrants 1 et 3 correspondent à un fonctionnement en moteur : $P_u = C_u \cdot \Omega > 0$, le moteur fournit de l'énergie mécanique à la charge.

Les quadrants 2 et 4 correspondent à un fonctionnement en génératrice :

$P_u = C_u \cdot \Omega < 0$, le moteur reçoit de l'énergie mécanique de la charge.

II.7 Modèle de hacheur

Un hacheur ou "chopper" est un convertisseur statique qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une autre tension continue réglable. C'est l'équivalent du transformateur en alternatif. La figure II.22 montre le schéma de principe du hacheur :

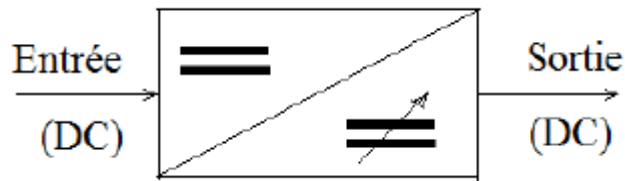


Figure II-22: Schéma de principe d'un hacheur.

Le hacheur permet la modulation de l'énergie entre une source et une charge continues. Cette source et cette charge peuvent être soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant). Il est constitué d'un interrupteur commandable qui peut être un transistor (pour des faibles puissances) ou un thyristor (pour grande puissance).

II.7.1 Domaine d'utilisation des hacheurs

Un des gros domaines d'utilisation des hacheurs est la variation de vitesse du moteur à courant continu (MCC), Ils équipent par exemple la majorité des engins de moyenne traction, tels que ceux utilisés pour le métro. La première génération de TGV est équipée d'ensembles hacheurs-moteurs à courant continu.

On trouve aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire. Ils permettent de rendre constante une tension d'entrée très versatile. Les hacheurs sont également utilisés dans l'alimentation des moteurs pas à pas.

II.7.2 Les différents types de hacheur :

On distingue :

- Le hacheur série.
- Le hacheur parallèle.
- Le hacheur parallèle série.
- Les hacheurs 2 et 4 quadrants.
- Les alimentations à découpage.

II.7.2.1 Hacheur abaisseur ou série :

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie est inférieure à celle de l'entrée. Il comporte un interrupteur à amorçage et à blocage commandés (transistor bipolaire, transistor MOS ou IGBT, ...) et un interrupteur à blocage et amorçage spontanés ou une diode Figure II.23. Ce type de hacheur est considéré comme une liaison directe entre une source de tension continue et un récepteur de courant continu.

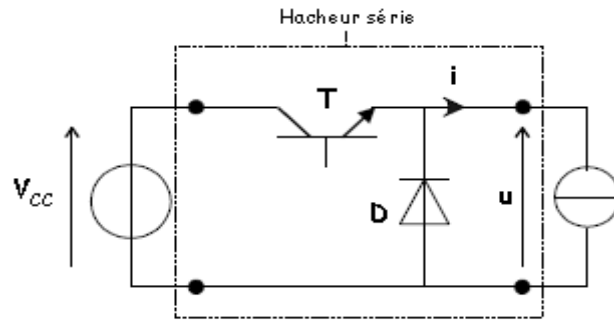


Figure II-23: Schéma de principe d'un hacheur série

- La forme d'onde de la tension en sortie du hacheur série :

Les conductions de T et D sont complémentaires : quand T est passant (T=1) alors D est bloquée (D=0) et vice-versa.

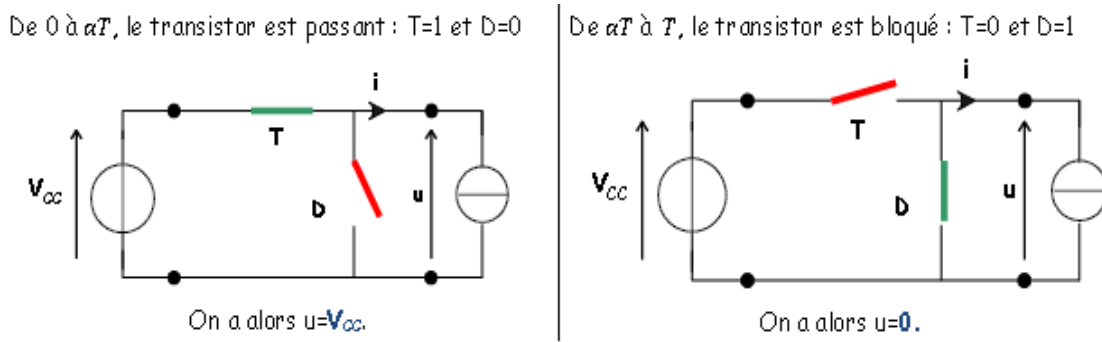


Figure II-24: Schéma de principe conduction d'un hacheur série

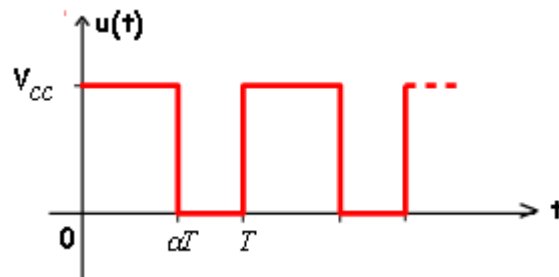


Figure II-25: La forme d'onde de la tension en sortie d'un hacheur série

- L'expression de la valeur moyenne de la tension en sortie du hacheur série

$$\langle u \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot dt \quad (II.45)$$

$$\langle u \rangle = \alpha \cdot V_{cc} \quad (II.46)$$

II.7.2.2 Hacheur parallèle :

Dans ce hacheur, la tension moyenne de sortie est supérieure à la tension d'entrée. Cette structure nécessite un interrupteur commandé à l'amorçage et au blocage (transistor bipolaire, MOS, IGBT, ...) et une diode Figure II-24. C'est un hacheur à stockage inductif

qui peut être considéré comme une liaison directe entre une source de courant continu et un récepteur de tension continu. L'inductance permet de lisser le courant appelé de la source.

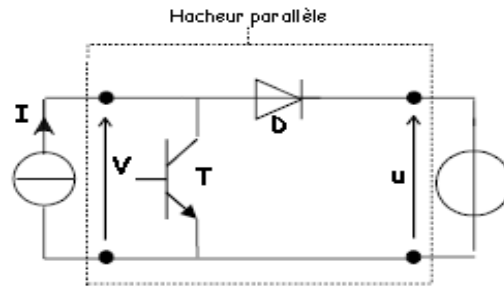


Figure II-26: Schéma de principe d'un hacheur parallèle

- La forme d'onde de la tension en sortie du hacheur parallèle :

Les conductions de T et D sont complémentaires : quand T est passant (T=1) alors D est bloquée (D=0) et vice-versa.

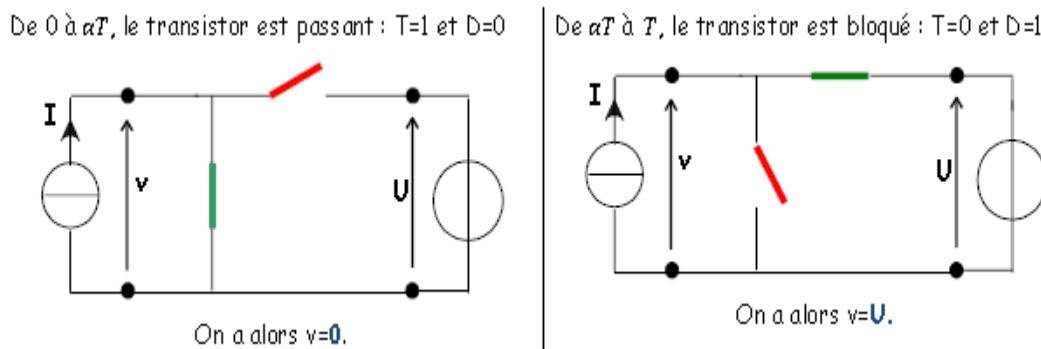


Figure II-27: Schéma de principe conduction d'un hacheur parallèle

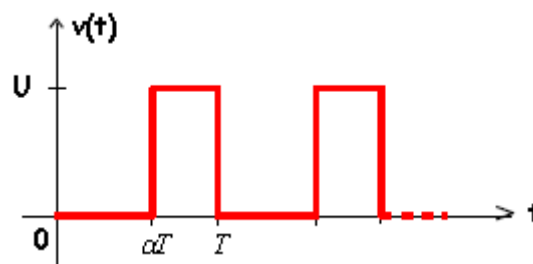


Figure II-28 : La forme d'onde de la tension en sortie d'un hacheur parallèle

- L'expression de la tension en sortie d'un hacheur parallèle :

$$\langle v \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot dt \tag{II.47}$$

$$U = \frac{\langle v \rangle}{1-\alpha} \tag{II.48}$$

II.7.2.3 Hacheur élévateur-abaisseur ou parallèle-série :

Dernier convertisseur de la famille des hacheurs non isolés, le convertisseur parallèle-série Figure II.29, également appelé élévateur-abaisseur pour son aptitude à fournir une tension plus faible ou plus élevée que celle appliquée à son entrée, ceci dépend de la valeur

du rapport cyclique. De plus c'est un montage inverseur de tension et qui peut être considéré comme une liaison indirecte entre deux sources de tension continue par l'intermédiaire d'une source de courant continu (bobine).

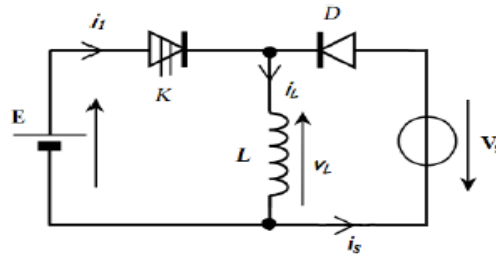


Figure II-29: Schéma de principe d'un hacheur parallèle-série

II.7.2.4 Hacheur série réversible en courant : [35]

Dans ce système, le changement du sens de parcours de l'énergie est lié au changement de signe du courant alors que la tension reste de signe constant.

Cette fois, la cellule est formée de deux composants. Le premier est un composant commandé à l'amorçage et au blocage (transistor, IGBT, GTO, ...) alors que le second est une diode. Ils sont montés en anti-parallèle Figure II.30.

Le courant dans l'interrupteur peut être positif ou négatif. Il n'y aura plus de phénomène de conduction discontinue, dû à l'impossibilité, pour le courant, de changer de signe. Simplement, suivant le sens du courant, l'un ou l'autre des composants assurera la conduction.

Nous allons reprendre la structure du hacheur série classique par des interrupteurs réversibles en courant. Nous avons modifié la charge (inutile de demander à une résistance de se transformer en génératrice, ...) en prenant une machine à courant continu, qui peut, sous tension constante, fonctionner en génératrice ou en moteur.

Ce type de hacheur est très employé pour l'entraînement d'une machine à courant continu dans un sens de rotation avec freinage par récupération (domaine de la traction électrique à courant continu).

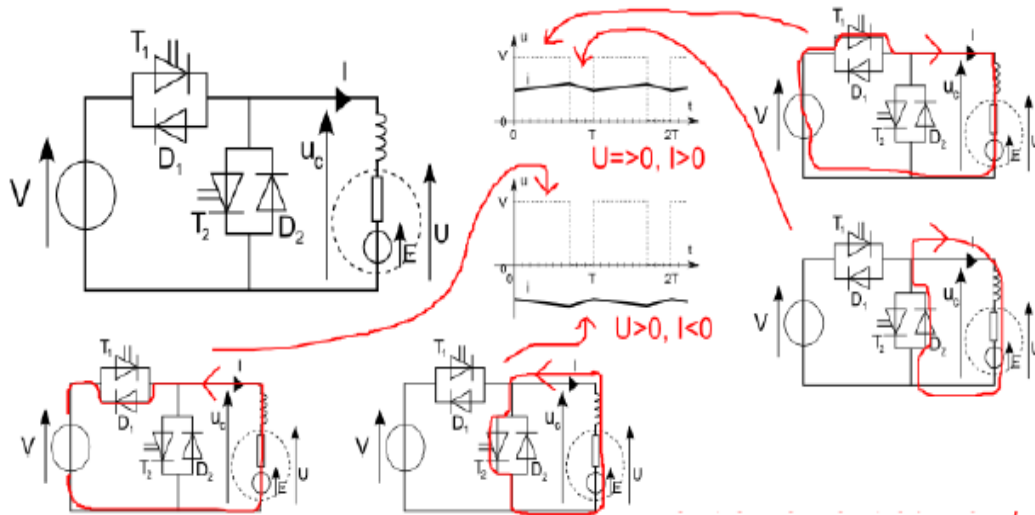


Figure II-30: Schéma de principe conduction d'un hacheur série réversible en courant et La forme d'onde de la tension en sortie

On a alors :

$$\langle u_c \rangle = \alpha \times V \tag{II.49}$$

Ce montage permet un fonctionnement en moteur et freinage avant.

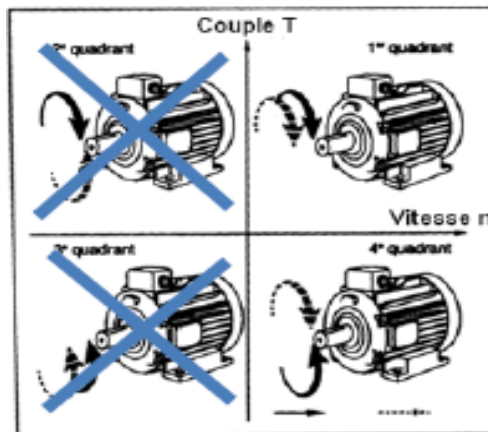


Figure II-31: un fonctionnement en moteur et freinage avant

II.7.2.5 Hacheur série réversible en tension

La tension appliquée à la charge peut prendre les valeurs positives (+V) ou négatives (-V), ce qui permet (suivant la valeur du rapport cyclique) de donner une valeur moyenne de tension de sortie positive ou négative. En revanche, le courant doit rester de signe constant dans la charge, car les interrupteurs ne sont pas réversibles Figure II.32.

Ce type d'hacheur est utilisé pour l'entraînement d'une machine à courant continu dans un sens de rotation pour le fonctionnement en moteur avec freinage par récupération dans l'autre sens de rotation, pour le fonctionnement en génératrice, c'est le cas des ascenseurs.

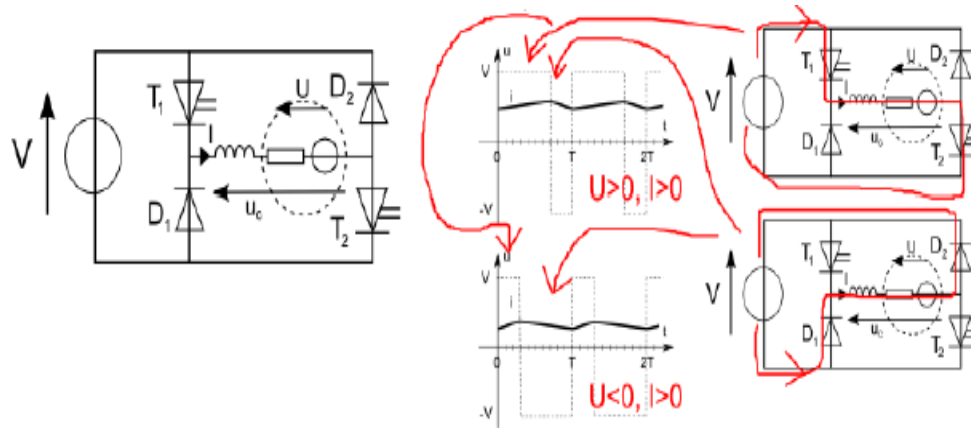


Figure II-32: Schéma de principe conduction d'un hacheur série réversible en tension et La forme d'onde de la tension en sortie

On a alors :

$$\langle u \rangle = (2\alpha - 1) \times V \tag{II.50}$$

Ce montage permet un fonctionnement en moteur avant et freinage arrière.

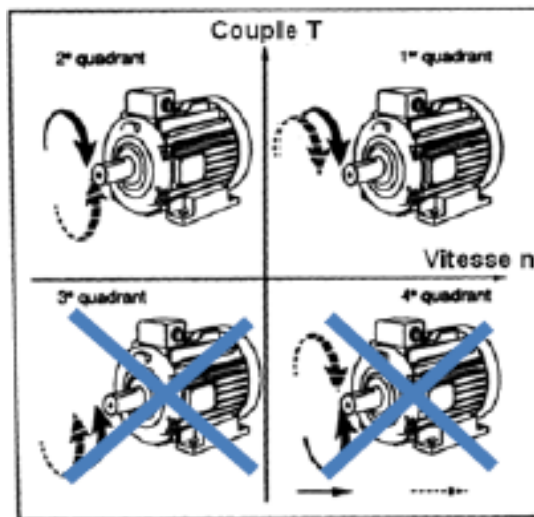


Figure II-33: fonctionnement en moteur avant et freinage arrière

II.7.2.6 Hacheurs quatre quadrants (réversible en tension et en courant)

On reprend la structure du hacheur réversible en tension que nous venons de donner en remplaçant les interrupteurs par des interrupteurs réversibles en courant. Dans ce cas, le courant dans la charge peut changer de signe Figure II.34. Comme pour le hacheur simplement réversible en courant, ce sera la diode ou le transistor qui sera passant, suivant le signe du courant dans l'interrupteur.

Cette fois, la tension moyenne et le courant moyen de sortie peuvent être positifs ou négatifs. Source et charge peuvent avoir leurs rôles inversés suivant le signe de ces grandeurs.

Ce type de hacheur est souvent employé pour l'entraînement d'une machine à courant continu dans les deux sens de rotation avec freinage par récupération (domaine de la traction électrique à courant continu).

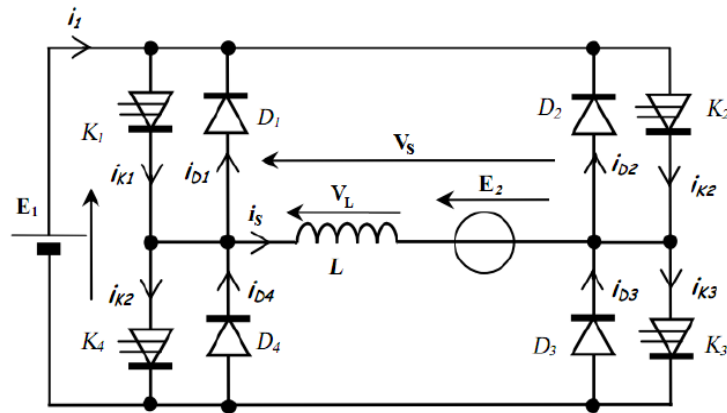


Figure II-34: Schéma de principe d'un hacheur réversible en courant et en tension

Puisque ce type d'hacheur qui sera retenu pour être utilisé dans la commande de génératrice à courant continu de notre système éolien, nous allons analyser son fonctionnement en détail.

La structure recherchée doit permettre une réversibilité totale en tension et en courant de la source de courant.

La source de tension impose une tension E constante mais devra être réversible en courant. La structure générale du convertisseur sera forcément une structure en pont. Celle-ci nous permet d'effectuer systématiquement une modulation du type ± 1

Si dans un premier temps, nous ne considérons qu'une réversibilité en tension, avec par exemple un sens positif permanent du courant, nous sommes ramenés au cas précédent et les deux séquences de fonctionnement sont celles de la figure II. 37.

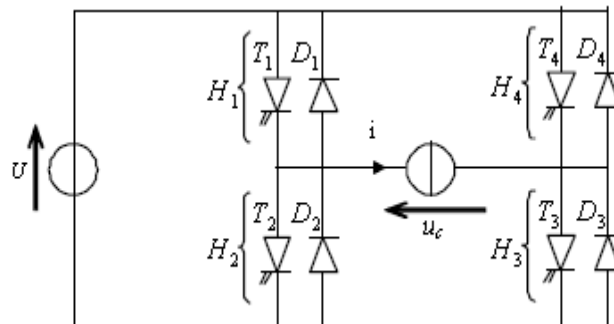


Figure II-35: Hacheur réversible en tension et en courant

- $0 < t < \alpha T$: H1 et H3 commandés.
- $\alpha T < t < T$: H2 et H4 commandés.

La tension aux bornes de la charge (u_c) se calcule en fonction de la tension d'alimentation (U) de la manière suivante :

- Pour $0 < t < \alpha T$: H1 et H3 commandés. H1 et H3 ou D1 et D3 conduisent. $u_c = U$
- pour $\alpha T < t < T$: H2 et H4 commandés. H2 et H4 ou D2 et D4 conduisent. $u_c = -U$

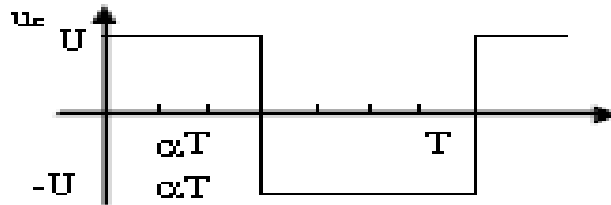


Figure II-36: Allure de la tension aux bornes de la charge

La valeur moyenne de U_c se calcule comme suit:

$$u_{cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T u_c(t) dt = \frac{1}{T} (\alpha TU + T(1-\alpha)(-U)) \tag{II.51}$$

$$u_{cmoy} = (2\alpha - 1)U \tag{II.52}$$

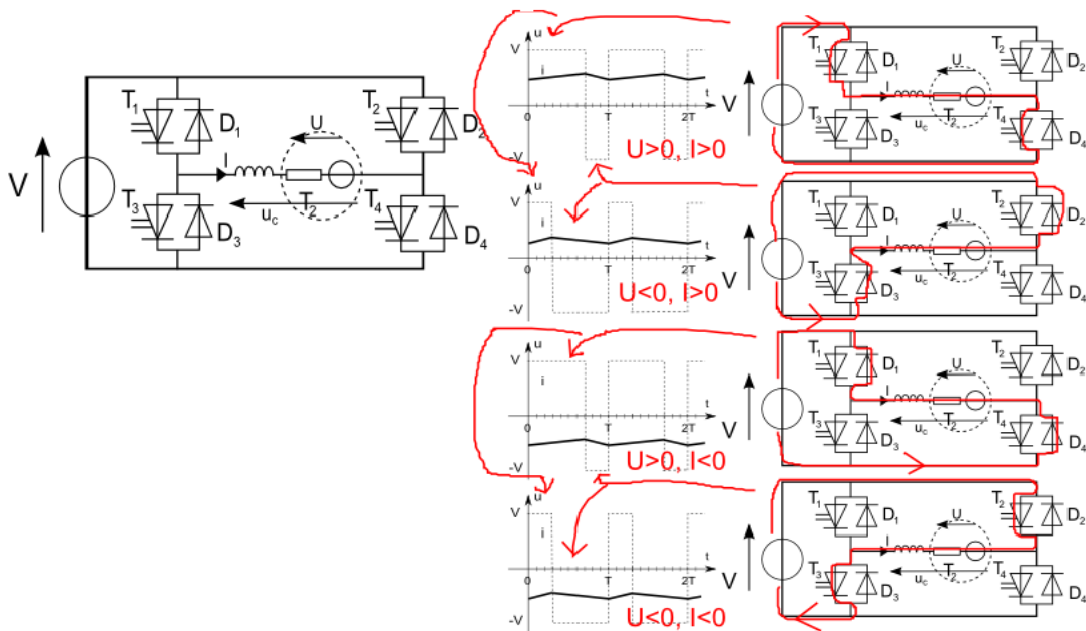


Figure II-37: Principe de fonctionnement d'un quatre quadrants (réversible en tension et en courant).

On a alors :

$$\langle u_c \rangle = (2\alpha - 1) \times V \tag{II.53}$$

Ce montage permet un fonctionnement dans les 4 quadrants

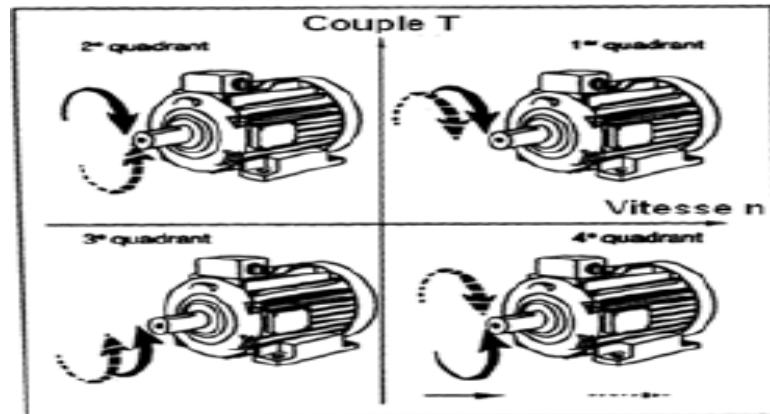


Figure II-38: un fonctionnement dans les 4 quadrants

II.8 Modélisation de l'onduleur

Dans notre étude, nous considérons le cas d'un onduleur triphasé idéal à deux niveaux de tension, à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée.

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continue – alternative, alimenté en continu, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie et permet d'obtenir l'alternatif à la sortie. L'onduleur est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication.) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux.). La représentation symbolique d'un onduleur est donnée par la figure II.39 :



Figure II-39: Schéma de principe de l'onduleur

Il est constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristors GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau standard 220/380 V-50 Hz [36].

II.8.1 Types d'onduleurs autonomes de tension

II.8.1.1 Les onduleurs monophasés

Pour obtenir une tension alternative à partir d'une tension continue en utilisant deux interrupteurs, il faut un point milieu, soit du côté de la sortie alternative, soit du côté de l'entrée continue, cela correspond à : - L'onduleur monophasé avec transformateur de sortie à point milieu appelé onduleur push- pull.

- L'onduleur monophasé avec diviseur capacitif à l'entrée appelé onduleur en demi pont. Si on veut varier la largeur relative des créneaux formant les alternances de la tension de sortie, il faut quatre interrupteurs c'est : l'onduleur monophasé en pont figure II.40 [36].

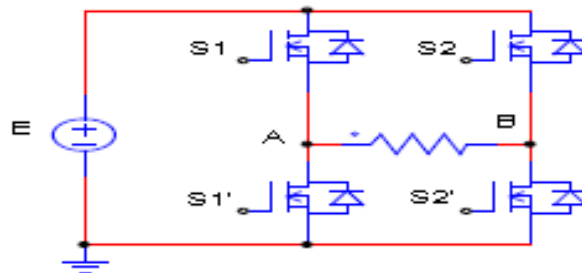


Figure II-40: Schéma de principe de l'onduleur monophasé

II.8.1.2 Les onduleurs triphasés :

L'onduleur de tension triphasé découle immédiatement de trois demi pont monophasé, on obtient l'onduleur triphasé à six interrupteurs.

Chaque demi pont comprend un thyristor (ou un transistor) et une diode.

La source de tension continue est obtenue à partir d'un pont redresseur. Pour assurer la continuité des courants de sortie alternatif I_a, I_b, I_c , les interrupteurs S1, S'1 et S2, S'2, S3 et S'3 doivent être complémentaires deux à deux. On définit $S_i = (T_i, D_i)$ [37].

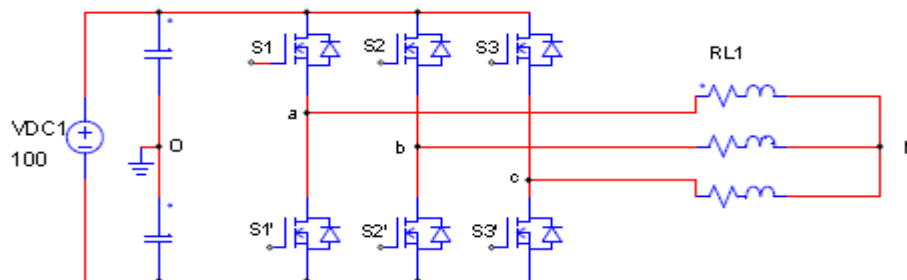


Figure II-41: Schéma d'onduleur de tension triphasé

a. Principe de fonctionnement

Le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels, chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche Figure II.42 Les couples d'interrupteurs (K11, K21), (K12, K22), (K13, K23) sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans la charge d'une part, et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part [2]. Pour se prémunir d'un court-circuit intempestif, il est nécessaire laisser un petit intervalle de temps entre la commande à la fermeture de T21 (ou T22 ou T23) et la commande à l'ouverture de T11 (ou T12 ou T13) et inversement [24].

Les diodes D_{ij} ($i \in [1,2], j \in [1, 2,3]$) sont des diodes à roue libre assurant la protection des thyristors [47].

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande S_j ($j = 1, 2, 3$) [26]:

$$V_{ko} = U_{dc} \left(S_j - \frac{1}{2} \right) \tag{II.54}$$

- $S_j = 1$ le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_j = 0$ le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

On peut écrire les tensions V_{ko} ($k = A, B, C$) en fonction des signaux de Commande S_j et en tenant compte du point fictif "o" représenté sur la Figure II.42 :

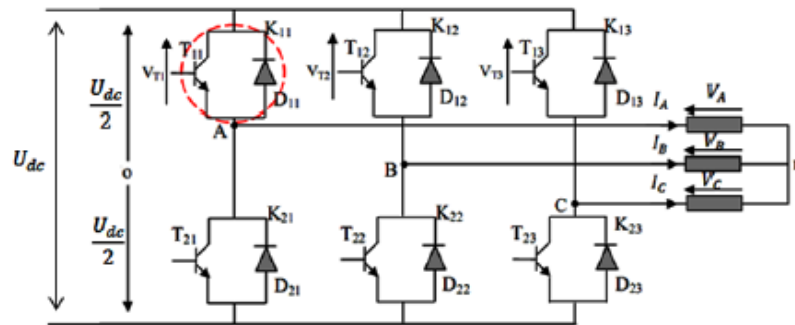


Figure II-42: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Pour simplifier l'étude nous supposons que [35]:

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable c'est-à-dire l'interrupteur supposé idéalisé.
- La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Les trois tensions composées : V_{AB} , V_{BC} , et V_{CA} sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{An} - V_{Bn} \\ V_{BC} = V_{Bn} - V_{Cn} \\ V_{CA} = V_{Cn} - V_{An} \end{cases} \tag{II.55}$$

Le système V_A, V_B, V_C étant équilibré ($V_{An} + V_{Bn} + V_{Cn} = 0$), on aura donc :

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{1}{3}(V_{AB} - V_{CA}) \\ V_{Bn} = \frac{1}{3}(V_{BC} - V_{AB}) \\ V_{Cn} = \frac{1}{3}(V_{CA} - V_{BC}) \end{cases} \tag{II.56}$$

En faisant apparaître le point "o", les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AO} - V_{BO} \\ V_{BC} = V_{BO} - V_{CO} \\ V_{CA} = V_{CO} - V_{AO} \end{cases} \tag{II.57}$$

En remplaçant (II.56) dans (II.57) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (II.58)$$

Des relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{AO} = V_A - V_{no} \\ V_{BO} = V_B - V_{no} \\ V_{CO} = V_C - V_{no} \end{cases} \quad (II.59)$$

On peut déduire le potentiel entre les points n et o :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (II.60)$$

L'utilisation de l'expression (II.61) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (II.61)$$

Le système (II.62) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

De plus la relation entre le courant modulé par le convertisseur (I_{dc}) et les courants alternatifs (i_a, i_b et i_c) est définie par l'équation suivante :

$$I_{dc} = [S_1 \quad S_2 \quad S_3] \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (II.62)$$

II.9 Modélisation du bus continu :

Le couplage des deux convertisseurs statiques (coté rotor et coté réseau) est fait par l'intermédiaire d'un bus continu, il est donc nécessaire d'avoir le modèle mathématique de ce circuit. La figure II.43, représente le bus continu et on peut voir qu'il est représenté par le condensateur ou sont connectée les deux convertisseurs [25].

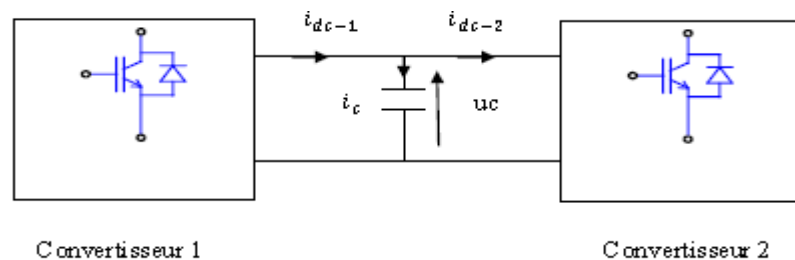


Figure II-43: Schéma du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (II.63)$$

$$i_c = i_{dc-1} - i_{dc-2} \quad (II.64)$$

$$U_c(t) = U_c + \frac{1}{c} \int_{t_1}^{t_2} i_c dt \quad (II.65)$$

U_c : valeur initiale de condensateur

Le réglage du bus continu est réalisé au moyen d'une boucle de régulation permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur proportionnel intégral générant la référence du courant à injecter dans le condensateur (i_{c-ref}).

II.10 Modélisation du filtre de connexion au réseau :

La liaison du l'onduleur au réseau électrique est réaliser par un filtre R-L dans le but de respecter l'alternance des sources et de minimiser les composantes harmoniques dues aux commutations du l'onduleur .la figure II.44.

Les tensions modulées et les courants qui transitent filtre sont regroupés dans l'équation différentielle suivante [13] :

$$\begin{pmatrix} V_{ma} \\ V_{mb} \\ V_{mc} \end{pmatrix} = R_f \begin{pmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{mc} \end{pmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{ma} \\ i_{mb} \\ i_{mc} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} V_{ga} \\ V_{gb} \\ V_{gc} \end{pmatrix} \quad (II.66)$$

En appliquant la transformation de Park, l'équation précédente devient :

$$\begin{cases} V_{md} = (R_f + L_f s) i_{md} - L_f \omega_g i_{mq} + V_{gd} \\ V_{mq} = (R_f + L_f s) i_{mq} - L_f \omega_g i_{md} + V_{gq} \end{cases} \quad (II.67)$$

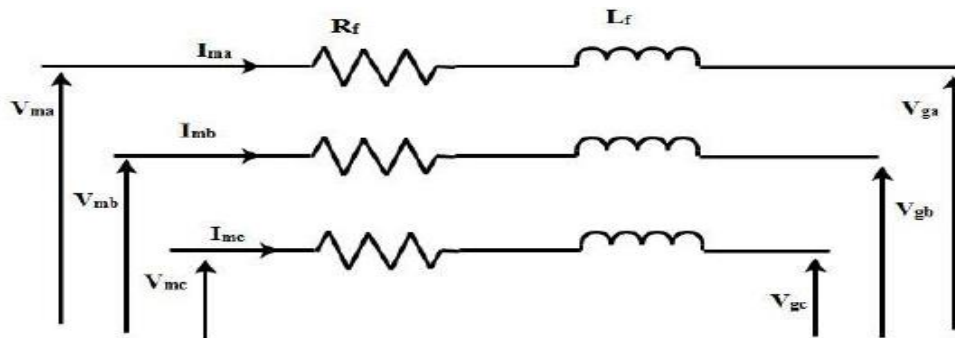


Figure II-44: Filtre de raccordement au réseau

II.10.1 Fréquence de coupure des filtres RL :

Pour déterminer cela nous appliquera pour les cellules RL passe-haut ou passe-bas la formule suivante :

$$F_0 = \frac{R}{2\pi L} \quad (II.68)$$

II.11 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et l'analyse d'un système éolien basé sur une machine à courant continu (MCC) fonctionnant à vitesse variable. En premier lieu, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis. En effet, on a tout d'abord décrit les différents types d'excitation de la machine à courant continu. Ensuite, on s'est intéressé à l'établissement du modèle mathématique de la machine à courant continu. Puis, on a décrit en détail le principe de fonctionnement des hacheurs en se concentrant principalement sur le fonctionnement de l'hacheur en pont. On a enchainé la modélisation du système éolien par l'introduction du modèle détaillé du convertisseur du côté réseau et la ligne triphasée reliant le convertisseur au réseau électrique. Ce chapitre a été clôturé par le modèle simple du continu. Après la modélisation détaillée du système éolien, on s'aperçoit qu'il est prêt à être commandé par des stratégies de commande afin d'achever des performances prédéfinies du système.

Chapitre III

Commande du système éolien

III.1 INTRODUCTION

Après avoir modélisé au chapitre précédent le système de conversion d'énergie éolien basé sur la MCC, on va s'intéresser dans ce présent chapitre au développement des stratégies de commande à appliquer au système afin de satisfaire certains objectifs. Ces derniers sont réalisés en commandant deux convertisseurs à MLI [10].

Dans ce chapitre, on va tout d'abord rappeler la modélisation détaillée des convertisseurs d'électronique de puissance formant le système éolien. Ensuite, on procède à l'application de la commande à hystérésis du courant au convertisseur du côté machine (CCM) afin de réguler la vitesse de la MCC qui va nous permettre de capter le maximum de puissance du vent et l'envoyer au réseau électrique. La même technique sera appliquée aussi au convertisseur du côté réseau (CCR) afin d'asservir la tension du bus continu à sa valeur de référence. Ceci permettra l'injection de la puissance produite au réseau électrique. Enfin, la présentation et la discussion des résultats de simulation clôtureront ce chapitre.

III.2 MODELISATION DES CONVERTISSEURS STATIQUES

Comme on a déjà mentionné précédemment, la structure de notre système éolien étudié est basée sur la MCC dont le stator est relié au réseau électrique par le biais de deux convertisseurs à MLI (convertisseur du côté machine (CCM) et convertisseur du côté réseau (CCR) (voir la Figure III.1). L'objectif de cette section est de modéliser les deux convertisseurs.

III.2.1 Modélisation de convertisseur coté machine (CCM)

Le schéma du système éolien mené de ses convertisseurs d'électroniques de puissance est illustré sur la (Figure (III.1)) :

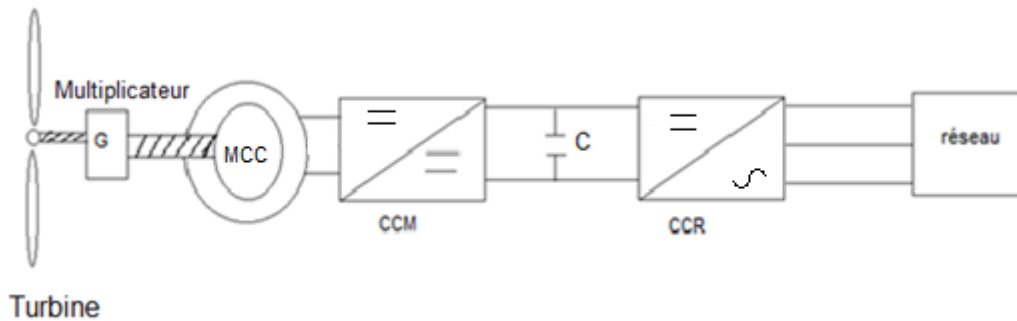


Figure III-1 : Schéma électrique du système éolien étudié.

Un convertisseur statique peut permettre la conversion de courant continu en un courant continu réglable et joue ainsi le rôle d'un hacheur ou il convertit la tension continue en tensions triphasées et joue ainsi le rôle d'un onduleur. Le CCM est bidirectionnel en courant et classiquement composé de deux cellules de commutation. Chacune est composée de deux transistors qui sont connectés à deux diodes en antiparallèle. L'hypothèse de la conduction continue nous conduit à considérer un convertisseur équivalent à interrupteurs idéaux et donc sans pertes. Ils sont présentés comme des interrupteurs (demi-bras) et peuvent être commandés en ouverture ou en fermeture, et chaque demi-bras possède son demi-bras

complémentaire.

La tension de sortie de l'onduleur est en fonction des états de ces interrupteurs [11].

Le schéma électrique de ce convertisseur est présenté sur la figure (III.2) :

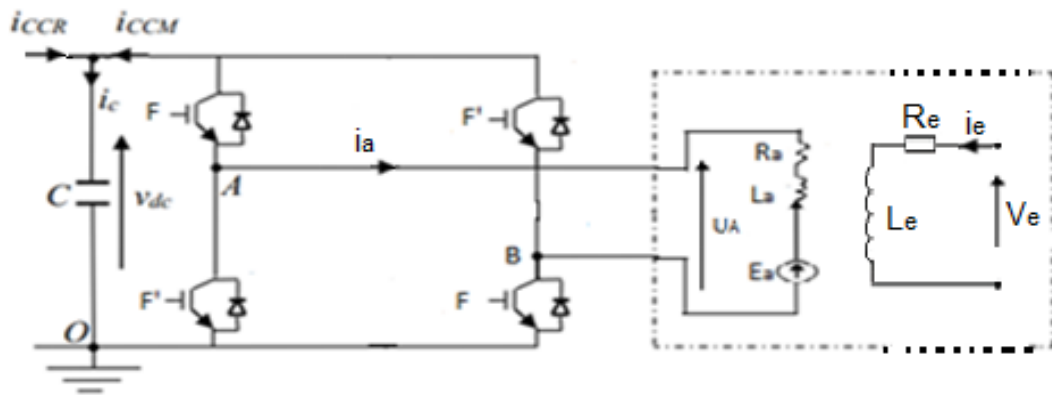


Figure III-2 : Schéma électrique du convertisseur du côté machine.

Hacheur travaille selon l'état des interrupteurs comme suivant :

$$\begin{cases} F \text{ fermé} & F' \text{ ouvert}, & U_A = V_{dc} & , & i_{CCM} = -i_a \\ F \text{ ouvert} & F' \text{ fermé}, & U_A = -V_{dc} & , & i_{CCM} = i_a \end{cases} \quad (III.1)$$

Cette dernière équation représente le modèle détaillé de l'hacheur en pont.

III.2.2 Modélisation du convertisseur coté réseau (CCR)

Le CCR est composé de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture. Chaque interrupteur est Formé d'un transistor et d'une diode montée en antiparallèle. Le schéma électrique de ce convertisseur est illustré sur la figure (III.3).

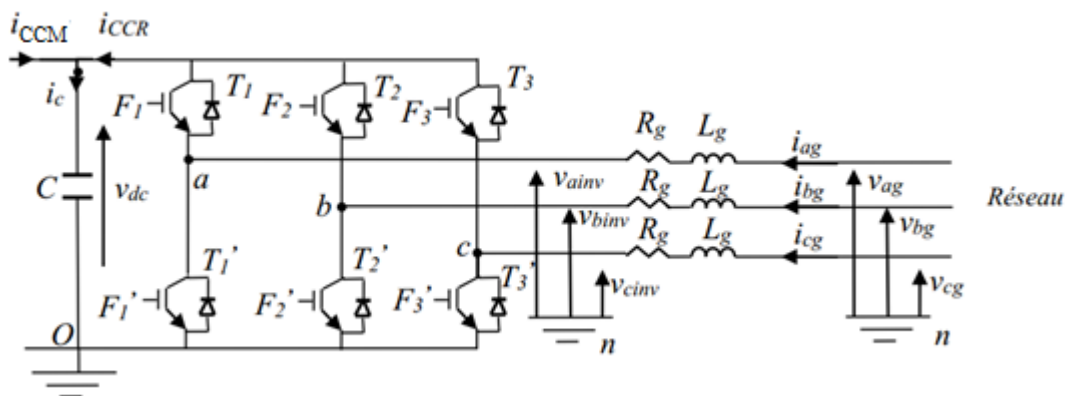


Figure III-3 Schéma électrique du convertisseur du côté réseau.

R_g et L_g Sont respectivement la résistance et l'inductance de la ligne triphasée reliant le CCR au réseau.

A partir du schéma électrique, on peut écrire les équations suivantes :

$$V_{ao} = U_{ainv} + V_{no}$$

$$V_{bo} = U_{binv} + V_{no} \quad (III.2)$$

$$V_{co} = U_{cinv} + V_{no}$$

La somme des tensions dans le système triphasé équilibre est nulle, donc la somme des tensions à MLI à la sortie du convertisseur sont nulles ($U_{ainv} + U_{binv} + U_{cinv} = 0$).

Par conséquent la tension V_{no} s'exprime de la manière suivante :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (III.3)$$

Nous remplaçons l'équation (III.3) dans l'équation (III.2), on peut exprimer les tensions à MLI à la sortie du CCR comme suit :

$$\begin{cases} U_{ainv} = \frac{1}{3}(2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ U_{binv} = \frac{1}{3}(-V_{ao} + 2V_{bo} - V_{co}) \\ U_{cinv} = \frac{1}{3}(-V_{ao} - V_{bo} + 2V_{co}) \end{cases} \quad (III.4)$$

D'autre part, on peut exprimer les tensions (V_{ao}, V_{bo}, V_{co}) en fonction de la tension du bus continu V_{dc} , suivant les états logiques des interrupteurs comme suit :

$$\begin{aligned} V_{ao} &= \begin{cases} V_{dc} & \text{si } T_1 \text{ fermé} & T'_1 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_1 \text{ ouvert} & T'_1 \text{ fermé} \end{cases} \\ V_{bo} &= \begin{cases} V_{dc} & \text{si } T_2 \text{ fermé} & T'_2 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_2 \text{ ouvert} & T'_2 \text{ fermé} \end{cases} \\ V_{co} &= \begin{cases} V_{dc} & \text{si } T_3 \text{ fermé} & T'_3 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_3 \text{ ouvert} & T'_3 \text{ fermé} \end{cases} \end{aligned} \quad (III.5)$$

Alors à la fin, on obtient les tensions de MLI à la sortie de convertisseur exprimée en fonction de l'état logique F_i des interrupteurs $T_i (i=1, 2, 3)$ et de la tension du bus continu comme suit :

$$\begin{bmatrix} U_{ainv} \\ U_{binv} \\ U_{cinv} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

En outre, on peut écrire le courant redressé i_{CCR} en fonction des courants de la ligne (i_a, i_b, i_c) est de l'état des interrupteurs (F_i) comme suit :

$$i_{CCR} = F_1 i_{ag} + F_2 i_{bg} + F_3 i_{cg} \quad (III.7)$$

Notons que la détermination des états logiques (F_i) et (S_i) des intercepteurs dépend de la stratégie de commande à appliquer aux CCM et CCR.

En appliquant la loi de maille, nous pouvons écrire les relations mathématiques reliant les tensions de la sortie du CCR aux tensions du réseau de la manière suivante :

$$\begin{aligned} V_{ag} &= R_g i_{ag} + L_g \frac{di_{ag}}{dt} + V_{ainv} \\ V_{bg} &= R_g i_{bg} + L_g \frac{di_{bg}}{dt} + V_{binv} \\ V_{cg} &= R_g i_{cg} + L_g \frac{di_{cg}}{dt} + V_{cinv} \end{aligned} \quad (III.8)$$

L'application de la transformation de Park au système d'équations (III.8), nous permet d'obtenir :

$$\begin{cases} V_{dg} = R_g i_{dg} + L_g \frac{di_{dg}}{dt} - \varphi_s L_g i_{qg} + V_{dinv} \\ V_{qg} = R_g i_{qg} + L_g \frac{di_{qg}}{dt} - \varphi_s L_g i_{dg} + V_{qinv} \end{cases} \quad (III.9)$$

Le courant traversant le bus continu est donné par :

$$C \cdot \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = i_{cc}(t) \quad (III.10)$$

Le courant dans la capacité peut aussi être écrit comme suit :

$$i_{cc} = i_{CCM} + i_{CCR} \quad (III.11)$$

Donc l'équation (III.10) peut être exprimée en fonction des états d'interrupteurs comme suit :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -(2F - 1)ia + F_1 i_{ag} + F_2 i_{bg} + F_3 i_{cg} \quad (III.12)$$

III.3 COMMANDE A MLI

On peut appliquer à la l'hacheur en pont et au convertisseur du côté réseau plusieurs types de commande (commande à hystérésis de courant, commande sinus-triangle,...). Dans notre cas et vu sa simplicité, on s'est limité à l'application de MLI à hystérésis de courant. Le principe de cette technique est décrit en détail ci-après :

III.3.1 Principe de la MLI à hystérésis de courant

Dans ce paragraphe, nous nous intéressons à présenter le principe de la technique à MLI à hystérésis. En effet, la commande par hystérésis appelée aussi tout ou rien, utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant mesuré. L'erreur obtenue est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis (ΔI). Le principe de cette technique est illustré sur la Figure (III.4), A l'aide d'un comparateur à hystérésis, les impulsions

d'amorçage et de blocage des interrupteurs de l'onduleur sont produites, de façon à limiter le courant de phase dans la bande d'hystérésis (ΔI) autour du courant de référence [12].

De ce fait, les conditions de commutation des trois Interrupteurs statiques $F_i (i=a, b, c)$ (voir Figure (III.5)) de l'onduleur sont définies en terme des états Logiques correspondants de la façon suivante :

$$F_i = 1 \text{ si } i_{iref} - i_i > \Delta I \tag{III.13}$$

$$F_i = -1 \text{ si } i_{iref} - i_i < -\Delta I \tag{III.14}$$

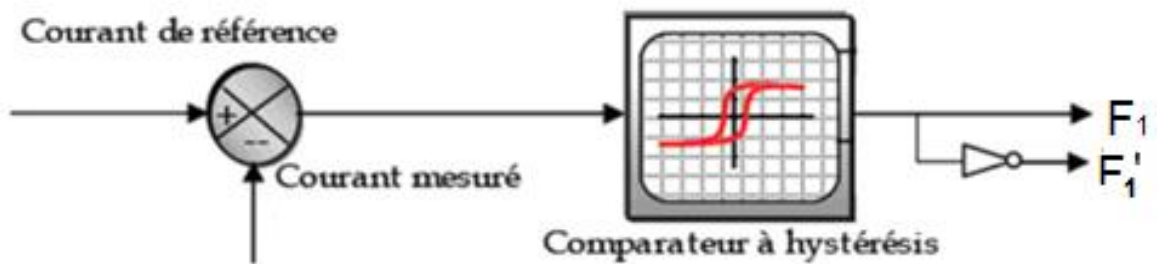


Figure III-4 : Contrôleur hystérésis d'un bras de l'onduleur.

Le principe de cette technique est détaillé dans la figure suivante :

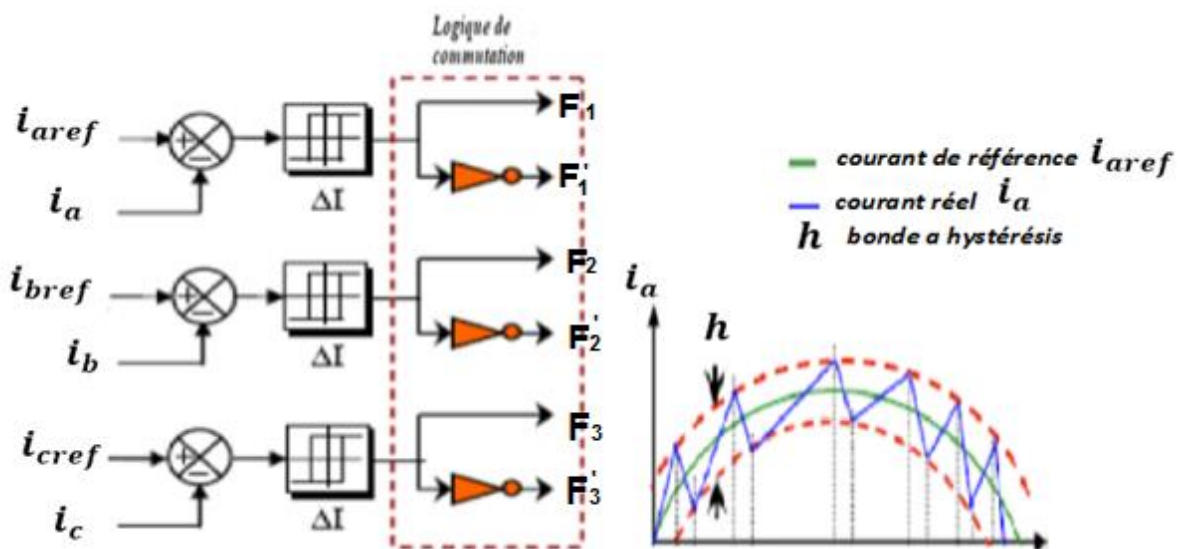


Figure III-5 : Commande par Hystérésis.

III.4 STRATEGIES DE COMMANDE DU SYSTEME EOLIEN

Dans ce travail on va s'intéresser au développement des stratégies de commande des deux convertisseurs (Hacheur et onduleur) formants le système éolien afin de réaliser les performances désirées.

III.4.1 Stratégies de commande appliquées au CCM

L'objectif principal fixé par la commande du convertisseur du côté machine (Hacheur en pont) est l'extraction de puissance maximale du vent et l'injecter dans le réseau électrique. La variation du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique est présentée sur la figure suivante :

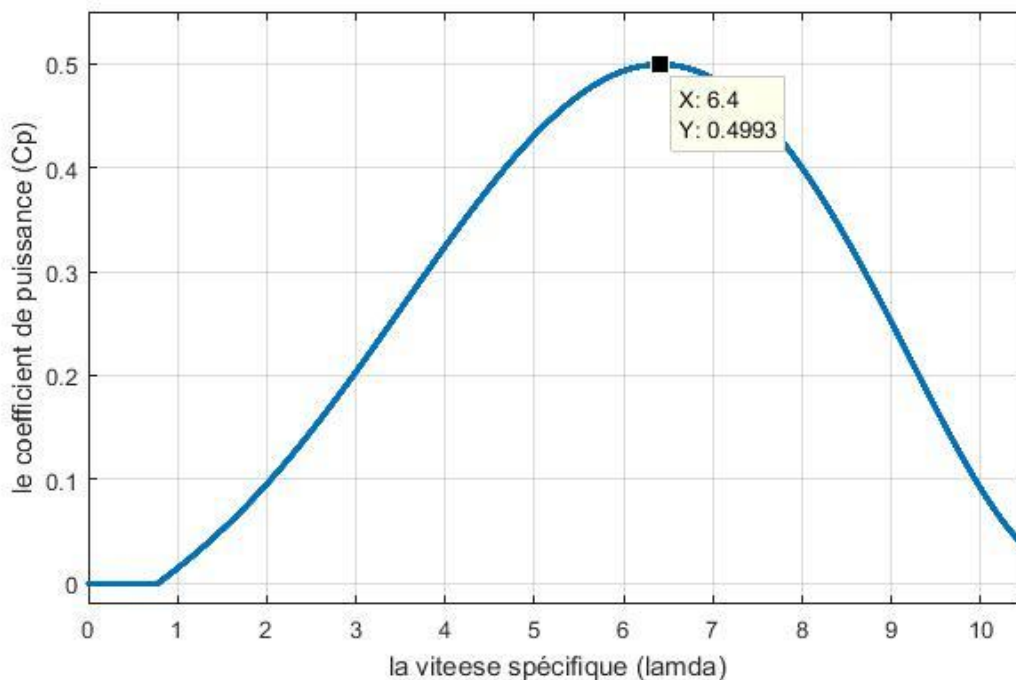


Figure III-6 : Coefficient de puissance en fonction la vitesse spécifique $C_p (\lambda)$.

On a vu déjà que la vitesse spécifique est donnée par :

$$\lambda = \frac{R.\Omega_t}{v} \quad (\text{III.15})$$

Pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et réaliser ce qu'on appelle MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), il faut assurer que la vitesse spécifique (λ) soit gardée pratiquement égale à sa valeur optimale, pour chaque vitesse de vent (v), exprimée par :

$$\lambda_{op} = \frac{R.\Omega_{tref}}{v} \quad (\text{III.16})$$

Par conséquent la vitesse de la MCC doit suivre sa valeur de référence donnée par :

$$\Omega_{gref} = \frac{\lambda_{op} \cdot v}{R} \cdot G \tag{III.17}$$

Dans notre cas, nous avons choisi à utiliser un régulateur de type PI pour asservir la vitesse de la génératrice (Ω_g) à sa valeur de référence optimale (Ω_{gref}) afin de réaliser MPPT..

Le schéma fonctionnel de l’asservissement de la vitesse est présenté sur la figure suivante :

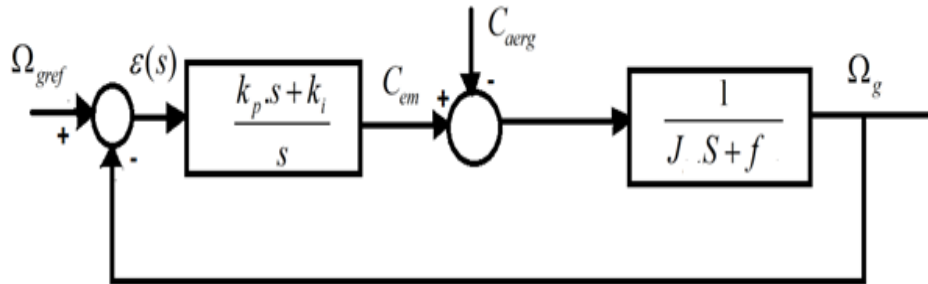


Figure III-7 : Schéma fonctionnel de l’asservissement de la vitesse de la MCC.

La fonction de transfert standard d’un régulateur PI est la suivante :

$$\frac{C_{em}(S)}{\varepsilon(S)} = \frac{K_p \cdot S + K_i}{S} \tag{III.18}$$

L’objectif de la régulation de la vitesse est de pouvoir rejeter la perturbation due au couple éolien. D’après la Figure (III.7), la fonction de transfert de système en boucle ouverte est :

$$G_o(s) = \left(\frac{K_p \cdot S + K_i}{S} \right) \left(\frac{1}{J \cdot S + f} \right) \tag{III.19}$$

Et par conséquent la fonction de transfert en boucle fermé est :

$$G_F(s) = \left(\frac{K_p \cdot S + K_i}{J \cdot S^2 + (f + K_p) \cdot S + K_i} \right) \tag{III.20}$$

On remarque que la dynamique de la fonction de transfert en boucle fermé est de deuxième ordre. Son polynôme caractéristique est de la forme suivante :

$$P_1(S) = \frac{R_s}{w_0^2} S^2 + \frac{2\xi}{w_0} S + 1 \tag{III.21}$$

ξ : Le coefficient d’amortissement,

w_0 : La pulsation propre de système,

Par comparaison de l'équation (III.21) et le dénominateur de l'équation (III.20), on trouve facilement les deux gains du régulateur PI comme suit :

$$K_i = Jw_0^2 \text{ Et } K_p = \frac{2\xi K_i}{w_0} - f \tag{III.22}$$

En fin le schéma détaillé de la commande de CCM pour assurer MPPT est donné par la figure suivante :

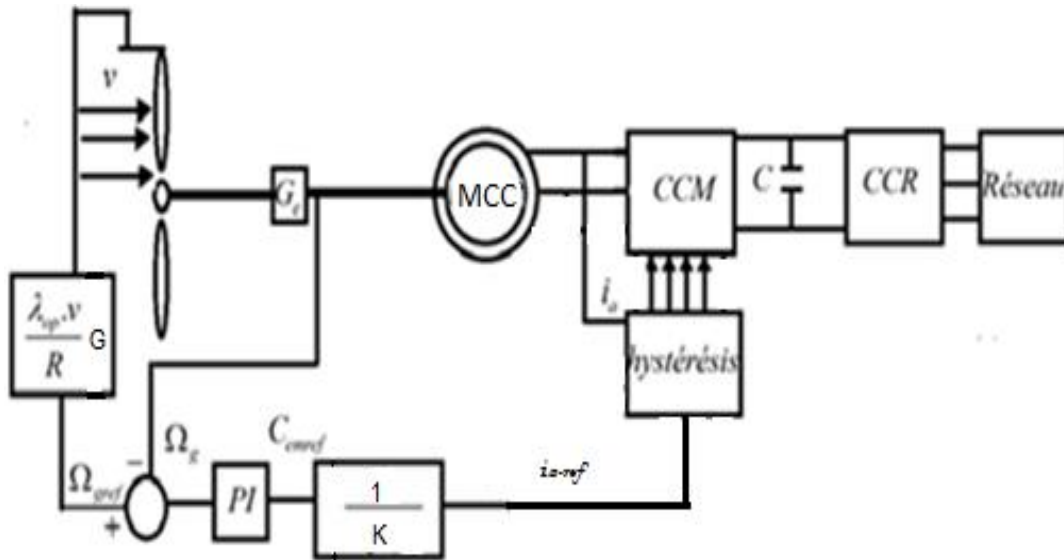


Figure III-8 : Structure de la commande à hystérésis de courant du CCM.

Le fonctionnement en mode MPPT du système éolien a été testé pour une vitesse du vent sous la forme illustrée sur la figure suivante :

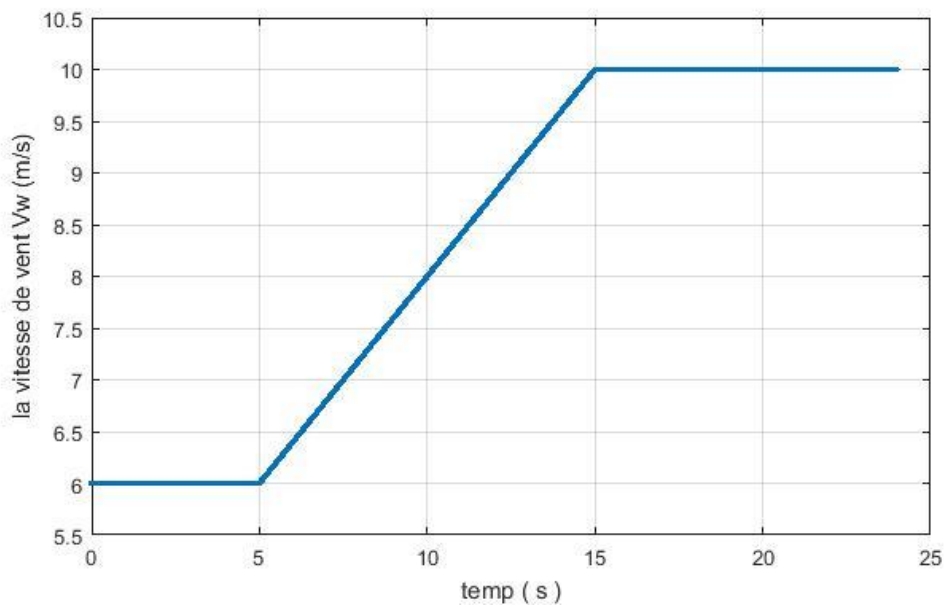


Figure III-9 : Allure de la vitesse de vent.

Les Figures (III (10-13)) illustrent les résultants de simulation obtenus.

D'après la Figure (III.10) la vitesse de la génératrice (Ω_g) poursuit la vitesse optimale de référence (Ω_{gref}) pour extraire le maximum de puissance et assurer le fonctionnement en mode MPPT. De plus, le coefficient de puissance C_P est resté proche de sa valeur optimale ($C_{Popt}=0.4993$) (voir figure III.11). De même pour la vitesse spécifique qui est gardée autour de sa valeur optimale ($\lambda_{op}=6.4$) (voir figure III.12) durant tout le fonctionnement du système éolien.

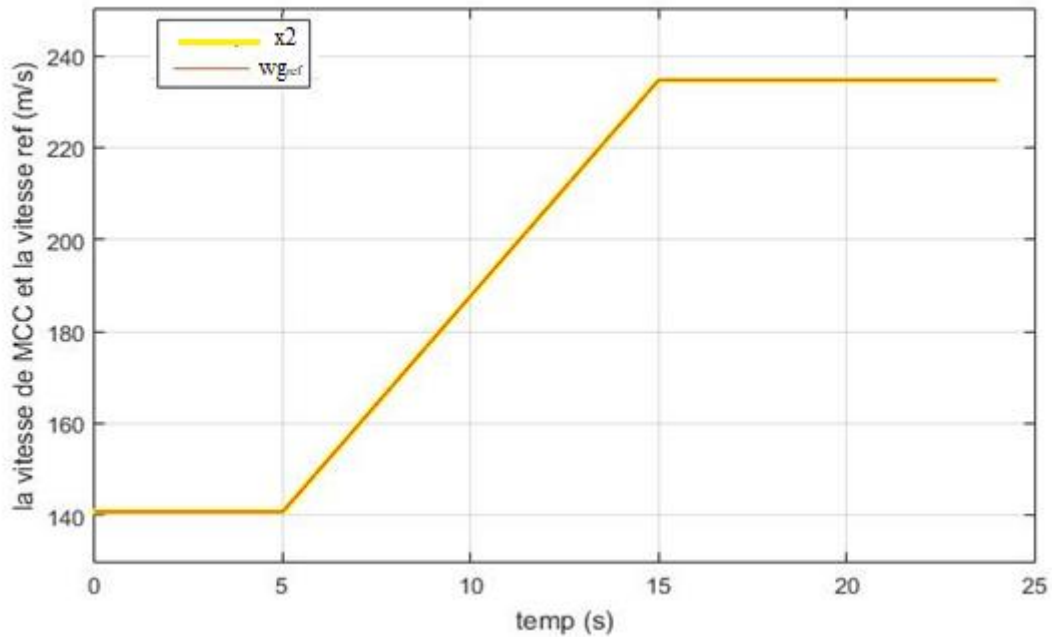


Figure III-10 : Allure de la vitesse de rotation réelle avec sa référence (rad/s).

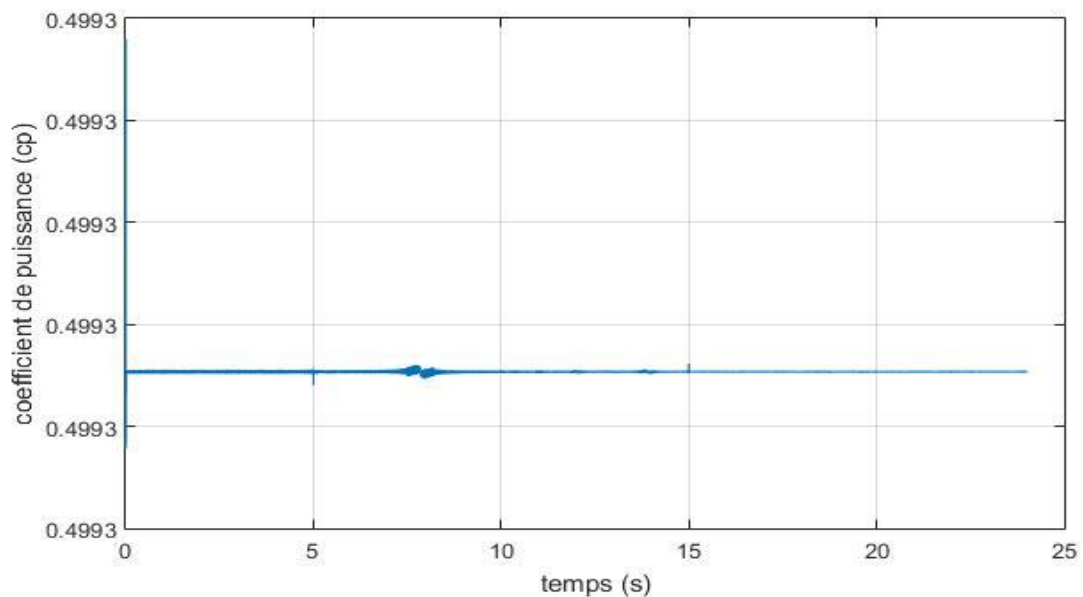


Figure III-11 : Allure du coefficient de puissance (Cp).

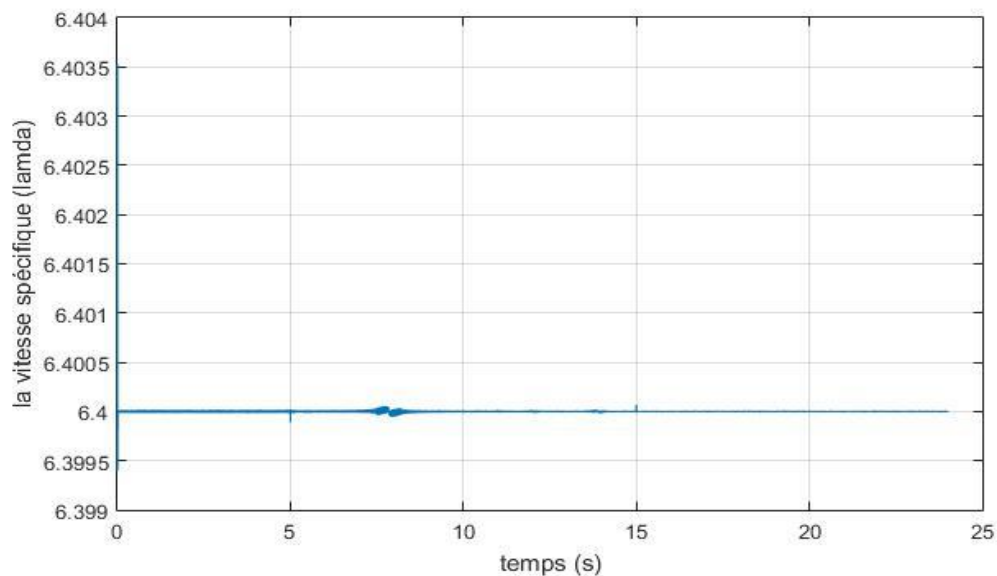


Figure III-12 Allure de la vitesse spécifique (λ).

La Figure (III.13) présente le courant continu du MCC (i_a) avec sa référence (i_{aref}). Par comparaison des figures III.9 et III.13, on remarque que le courant continu MCC augmente et diminue avec la vitesse de vent. Ceci prouve que la MCC produit à travers son induit le maximum de puissance extraite du vent.

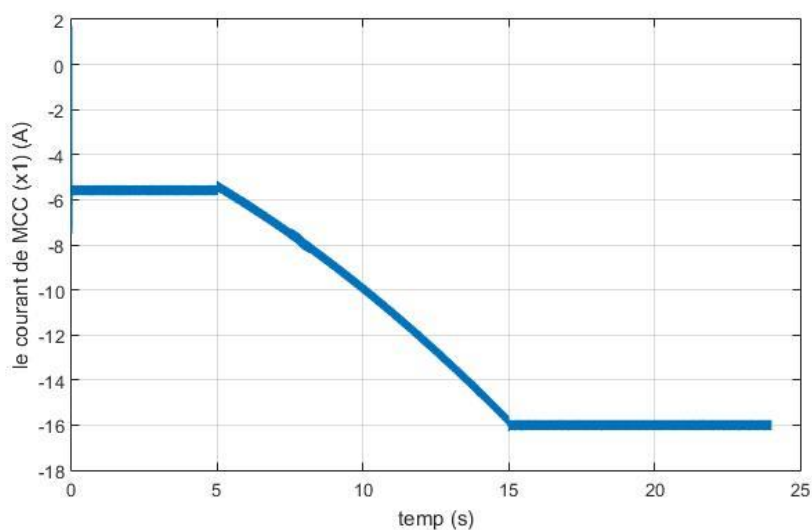


Figure III-13 :Allure du courant continu de MCC réel.

III.4.2 Stratégies de commande appliquées au CCR

Ce convertisseur, modélisé auparavant, est commandée indépendamment du CCM de telle sorte que :

- La tension du bus continu soit gardée constante quelle que soit l'amplitude et le sens de l'écoulement de la puissance au niveau du stator de la MCC ;

b) Une commande découplée du débit de puissance active et réactive entre le réseau et le bus continu soit assuré avec un facteur de puissance désiré.

Dans cette section, nous allons établir le schéma de commande du CCR. Pour ce faire, un régulateur PI sera synthétisé pour commander la tension du bus continu (V_{dc}) à sa valeur de référence (V_{dref}). D'autre part, les puissances active et réactive circulant dans la ligne triphasée, reliant le CCR et le réseau sont exprimées par :

$$P_g = \frac{3}{2} (v_{dg}i_{dg} + v_{qg}i_{qg})$$

$$Q_g = \frac{3}{2} (v_{qg}i_{dg} - v_{dg}i_{qg}) \quad (III.23)$$

L'orientation de la tension de réseau sur l'axe (d) du repère de Park mènera à :

$$v_{dg} = u_s \quad (III.24)$$

$$v_{qg} = 0 \quad (III.25)$$

Par conséquent, les expressions donnant les puissances active et réactive (équation III.23) se simplifient et deviennent :

$$P_g = \frac{3}{2} u_s i_{dg}$$

$$Q_g = - \frac{3}{2} u_s i_{qg} \quad (III.26)$$

A partir de ces dernières équations, on peut conclure que :

a) La puissance active (P_g) peut être contrôlée, à sa valeur de référence (P_{gref}), en agissant sur la composante en quadrature (i_{qg}) du courant de la ligne et par conséquent la consigne de ce courant est exprimée par :

$$i_{dgref} = \frac{2}{3u_s} P_{gref} \quad (III.27)$$

b) la puissance réactive (Q_g) peut être régulée à sa valeur de référence (Q_{gref}) par la composante directe (i_{dg}) du courant de la ligne. D'où, on peut tirer le courant de référence par :

$$i_{qgref} = - \frac{2}{3u_s} Q_{gref} \quad (III.28)$$

D'autre part, la puissance moyenne à l'entrée de bus continu est égale à la puissance active échangée entre le CCR et le réseau aux pertes près. Par conséquent on peut écrire :

$$V_{dc} \dot{i}_{red} = \frac{3}{2} u_s \dot{i}_{dg} = V_{dc} \dot{i}_{ond} \tag{III.29}$$

Où : \dot{i}_{red} est la valeur moyenne du courant modulé du côté CCR ;

\dot{i}_{ond} est la valeur moyenne du courant modulé du côté CCM.

Par conséquent, la tension du bus continu (V_{dc}) peut être contrôlée en agissant sur la composante (i_{dg}).

Le schéma de commande de ce convertisseur est illustré sur la figure suivante :

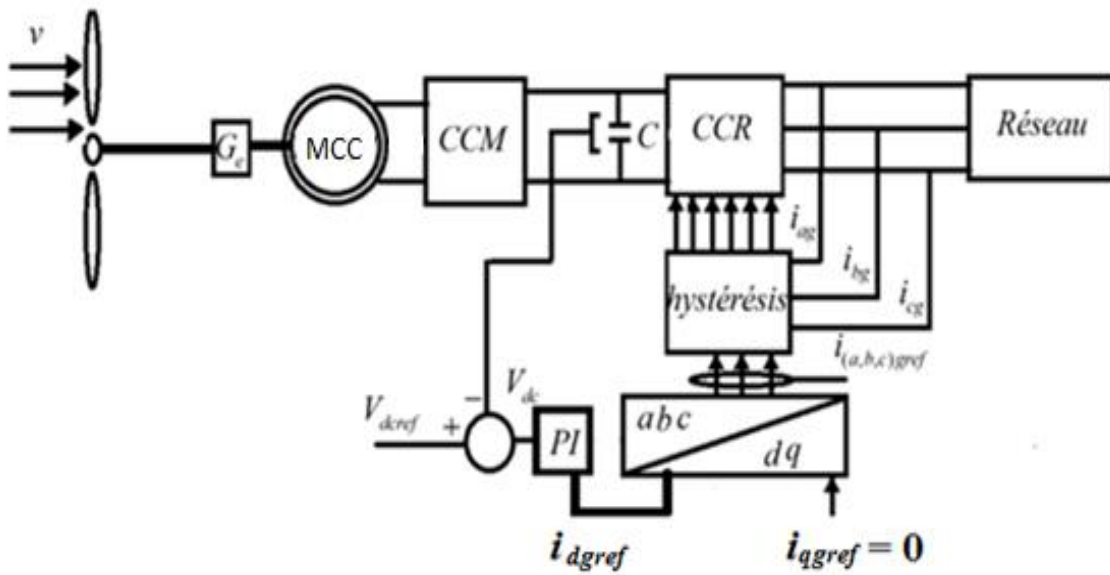


Figure III-14 : Structure de la commande à hystérésis de courant du CCR.

Le schéma fonctionnel de l'asservissement de la tension du bus continu en utilisant un régulateur PI est illustré par la figure suivante :

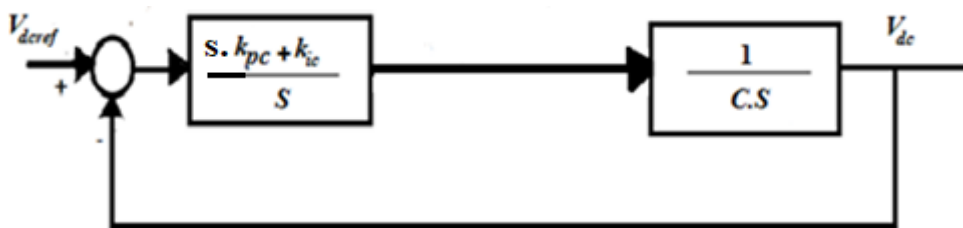


Figure III-15 : Schéma fonctionnel de l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}).

La fonction de transfert standard d'un régulateur PI est la suivante :

$$V_{dcRég} = \frac{S.k_{pc} + k_{ic}}{S} \tag{III.30}$$

D'après la Figure (III.15), la fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$G_{oc}(s) = \left(\frac{S k_{pc} + k_{ic}}{S} \right) \left(\frac{1}{C \cdot S} \right) \quad (\text{III.31})$$

Et par conséquent la fonction de transfert en boucle fermée est :

$$G_{fc}(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dcref}} = \frac{S k_{pc} + k_{ic}}{S^2 C + S k_{pc} + k_{ic}} \quad (\text{III.32})$$

On remarque que la fonction de transfert en boucle fermée est de deuxième ordre. Son polynôme caractéristique est de la forme suivante :

$$p_1 = \frac{1}{w_0^2} S^2 + \frac{2\xi}{w_0} S + 1 \quad (\text{III.33})$$

Par comparaison de l'équation (III.33) et le dénominateur de l'équation (III.32), on trouve facilement les deux gains du régulateur PI comme suit :

$$k_{pc} = 2\xi w_0 \text{ et } k_{ic} = C w_0 \quad (\text{III.34})$$

Les résultats de simulation obtenus sont présentés sur les figures (III. (16-18)) :

On remarque que la tension du bus continu (V_{dc}) est régulée à sa référence ($V_{dcref} = 1000$ V) grâce à la commande du CCR (Voir figure III.16). Le zoom de la tension de la phase (V_a) et son courant correspondant (i_a) montre que le système éolien injecte uniquement de la puissance active au réseau avec un facteur de puissance unitaire (Voir figure III.18)).

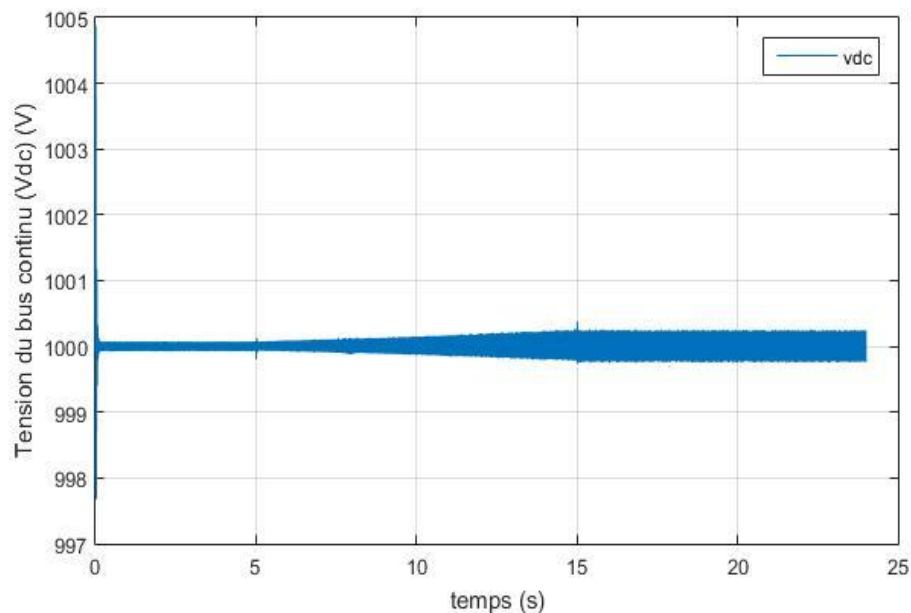


Figure III-16 : Allure de la tension du bus continu (Vdc) (V).

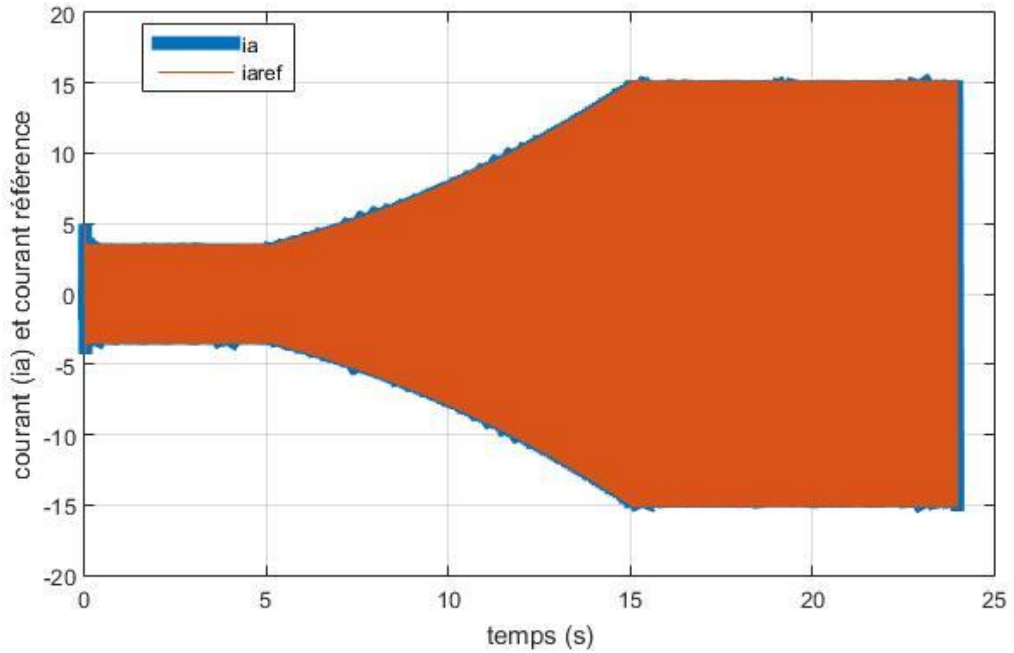


Figure III-17 : courant de la phase A (i_{ag}) et le courant référence (i_{agref}).

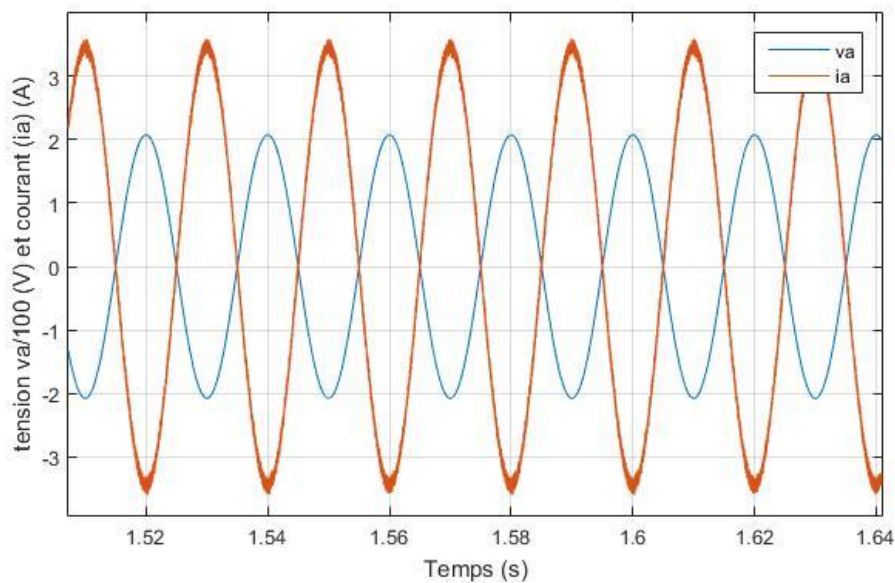


Figure III-18 : Allure de la tension de la phase (a) (V_a) et son courant correspondant (i_a).

La Figure (III.19) représente l'allure de la puissance active (P_g) et la puissance réactive (Q_g). On remarque que la puissance active (P_g) augmente en valeur absolue avec l'accroissement de la vitesse de vent confirmant ainsi le fonctionnement en mode MPPT du système éolien. La puissance réactive est gardée pratiquement nulle ce qui prouve le fonctionnement avec facteur de puissance unitaire du côté réseau. Donc toute la puissance éolienne est injectée au réseau avec des pertes près.

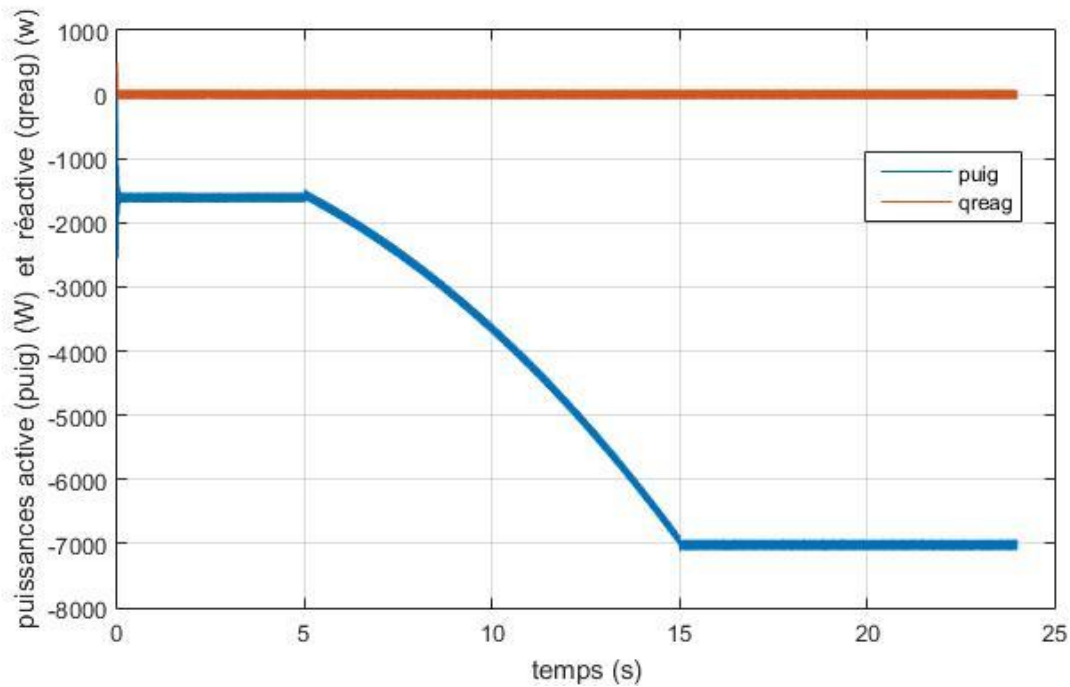


Figure III-19 : Allures des puissances actives (p_{uig}) (W) et réactives (q_{reag}) (W).

III.5 CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré principalement à la commande des convertisseurs (CCM et CCR) du système éolien pour satisfaire des performances désirées. En effet, le CCM a été commandé par un régulateur PI simple pour assurer le fonctionnement en mode MPPT. Des résultats de simulation satisfaisants ont été obtenus. Effectivement, la vitesse de la génératrice a suivi sa valeur optimale pour achever le mode de fonctionnement en MPPT.

De même pour le convertisseur du côté réseau (CCR) qui a été contrôlé par un autre régulateur PI pour assurer l'asservissement de la tension du bus continu (V_{dc}). D'après le graphe illustrant (V_{dc}), cette dernière a été réglée convenablement à sa valeur de référence ($V_{dcref} = 1000$ V). Le contrôle de la tension du bus continu et la puissance réactive ont permis l'injection de la totalité de la puissance éolienne au réseau électrique avec un facteur de puissance unitaire.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était l'étude et la commande d'un système éolien à base d'une MCC. En effet, Nous avons considéré, dans notre étude, une chaîne de conversion Eolienne constituée d'une turbine associée à une génératrice à courant continu dont le stator est relié au réseau électrique à travers un dispositif d'électronique de puissance. Ce dernier est composé de deux convertisseurs (CCM et CCR). Le premier objectif de la commande est de capter et transmettre le maximum de l'énergie produite par le vent vers le réseau à travers la chaîne de conversion éolienne. Cet objectif a été pratiquement atteint par la commande du (CCM) dont sa commande est basée sur la technique de MLI hystérésis de courant. D'après les résultats de simulation obtenus, il a été remarqué que pour des différentes allures de vitesse de vent, la vitesse de la MCC suit sa valeur optimale pour réaliser MPPT. Notons que la vitesse de la machine a été régulée à travers un régulateur PI classique qui a permis à la vitesse de suivre pratiquement sa référence optimale.

L'autre convertisseur (CCR) a été commandé aussi par un régulateur PI simple pour réguler la tension du bus continu et permettre au système éolien d'injecter la puissance active au réseau électrique avec un facteur de puissance unitaire. Pour pouvoir donner une suite fructueuse de ce travail dans le futur, on peut avancer quelques perspectives :

- Remplacer le régulateur PI par d'autres types de correcteurs (Logique floue, mode glissant,..)
- Commander le système éolien pour participer à l'amélioration de la qualité d'énergie produite

Références

- [1] **N. Kasbadji Merzouk.** "Wind Energy Potential of Algeria". Inter. J. Renewable Energy. Vol. 21/3-4. pp. 553-562. (2000).
- [2] **Boudia, S. M., & Adjiri, S.** "Analyse technico-économique des systèmes de conversion d'énergie éolienne-région de Sétif". Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa. pp 115 – 120. (2014)
- [3] **CHERFIA NAÏM.** "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens", mémoire magister en électrotechnique Université Mentouri Constantine Algérie. pp 9-10. (2010)
- [4] **Tarak GHENNAM.** "Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation" Thèse DOCTEUR. Ecole Militaire Polytechnique d'Alger Ecole Centrale de Lille. pp 19, (2011)
- [5] **A. BOYETTE.** "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne". Thèse de Doctorat en génie électrique. Université Henri Poincaré. Nancy I. (2006).
- [6] **T. BOUMEDIENE.** "Commande par mode Flou Glissant de la Machine Asynchrone Double Alimentée utilisée en Aérogénérateur". Mémoire de Magister en Génie Electrique. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. (2015).
- [7] **Nachida KASBADJI MERZOUK.** "Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie ". Thèse de doctorat. L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. (2006).
- [8] **Khaled FERKOUS.** "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne". Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine, (2009).
- [9] **BOUAMEUR Meriem.** "Modélisation et dispositif de commande d'un système éolien à base de machine asynchrone à double aimantation". Mémoire de master UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR-ANNABA Algérie. (2018)
- [10] **MENY IVAN.** "Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance". Mémoire de Magister. Laboratoire d'électronique de Montpellier (LEM). (2004).
- [11] **M. BERRACHED Sid Ahmed.** "Analyse Technico-économique des Systèmes de Conversion d'Energie Eolienne Appliquée sur la Région de Tlemcen". Mémoire de Master. Université de Tlemcen Aboubekar Belkaid. (2015).
- [13] **METATLA SAMIR.** "Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA " mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger. (2009).
- [14] **N. Laverdure.** "Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires». Thèse de doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, (2005)

[15] **LATRECHE Mohammed.**"Tahar Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien". Mémoire de Magister Université Ferhat Abbas de Setif.(2012).

[16] **H. L. Naqra, B. Dubé.**"Slip power recovery induction generators for large vertical axis wind turbine", IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 3, No. 4, pp.733-737.December(1988).

[17] **B. Beltran.** "Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur". Thèse de Doctorat de l'université de Bretagne occidentale (2010).

[18] **TOUNSI Oussama, LASKRI Zakaria.**"Etude et commande d'une turbine éolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation" mémoire de master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR -ANNABA Algérie. (2017)

[19] **R. BAÏLE.** "Analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne". Mémoire de Magister Université de Corse le (2010).

[20] **K.GHEDAMSI.**"Contribution à la modélisation et la commande d'un convertisseur direct de fréquence. Application à la conduite de la machine asynchrone", Thèse de Doctorat, ENP Alger -Algérie, (2008).

[21] **KhelfatLotfi, Maataoui Lakhdar.** "Etude et Simulation d'une éolienne à base d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée",memoir de master .UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA, Algérie. (2017).

[22] **HASSAD Mohamed Amine.** "Influence de la commande d'une GADA des systèmes éoliens sur la stabilité des réseaux électriques". Mémoire de Magister UNIVERSITE SETIF 1-ALGERIE. (2012).

[23] **A.Mirecki.** "Etude Comparative de chaînes de Conversion d'Energie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance". Thèse de doctorat. Institut Nationale Polytechnique de Toulouse.(2005).

[24] **S. Heier,** "GridIntegration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley& Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.

[25] **L. H. Hansen.** "Conceptualsurvey of generator and power electronique for wind turbine", Riso national laboratory, Denmark, (2001).

[26] **AKEL Fethi.** "ETUDE ET REALISATION D'UN EMULATEUR DE TURBINE EOLIENNE". memoire de magister, école militaire polytechnique .Algerie. (2009).

[27] www.elec.jbd.free.fr, « Machine électromagnétique », Chapitre 13.

[28] **Mr SADEG Mohammed Amine.Mr YAHIA TENE Fayçal.** "Etude et réalisation de la commande par retour d'état adaptative d'un moteur à courant continu".memoire de master. UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES. (2016).

- [29] **Papio BAYALA**, "formation continue Ingénieur électrotechniciens", cour publier, Edition (2010).
- [30] **Mr Pernot**. " Etude et modélisation des chaines de conversion électromécanique". CPGE – PT Cycle 5 Chapitre 1 : Rappels sur le moteur à courant continu et le hacheur.(2005)
- [31] **M.Ajohnson& Mohammed H.Moradi**. " PI control new identification and desingmethode". (2005).
- [32] **K.J.ASTROM &T.Hagglund**. "Advanced PI control ".ISA, New York (2005).
- [33] **Soltani Ali**. "Etude et réalisation d'un hacheur Buck destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP".memoir de master UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI. (2016).
- [34] **BougandouraAbdelwahab**. "Etude sur la Commande du Hacheur Quatre Quadrants". Memoir de master. Université Larbi Ben M'hidi, Oum El-Bouaghi. (2013).
- [35] **OKBA Salah et BEDDIAR Walid**. "Etude et réalisation d'un onduleur de tension triphasé à MLI".memoire de master. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA. (2019).
- [36] **G. Segulier and F. Labrique**, "Les Convertisseurs de l'Electronique de Puissance", Tome 4 : La Conversion Continu-Alternatif, Edition Lavoisier, Technologie et Documentation, (1989).