

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieure
et de la recherche scientifique



UNIVERSITE DE M'SILA
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE
MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
DE MASTER EN GENIE ELECTRIQUE
SPECIALITE : AUTOMATIQUE

THEME

ÉTUDE D'UNE ÉOLIENNE A BASE
D'UNE GÉNÉRATRICE GADA
INTÉGRÉE DANS UN RÉSEAU MOYEN
TENSION

Proposé et Dirigé par :
-Dr. MESSALTI Sabir

Présenté par :
-SALEM Karima

N° d'ordre : 021

Année Universitaire : 2011/2012

Remerciement

Avant tout, Je remercie le dieu de tout puissant qui ma donne la foi, du courage et de patience afin d'accomplir ce modeste travail.

Je tien à remercier mon encadreur Mr.

Messalti Sabir (MCB à université de M'sila) d'avoir accepté de mon encadrer et pour les efforts qu'il a déployé, pour mon encourager, aider, conseiller, avec une grande gentillesse durant toute cette période.

Je remercie les membres du jury qui ont accepté de juger mon travail et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce dernier.

Mes vifs remerciement vont également à :

- Monsieur Barkat Saïd

-Mme Benalia Leila

-Meme Belewnis wassila

- Monsieur Rouabehi Riadh

De l'intérêt qu'il manifeste pour ce travail

Je n'oublie pas de remercier tous les

Enseignants qui ont contribué durant notre formation.



Dédicace



Je dédie ce travail

A mes chers parents

A mes frères

A mes sœurs et ses époux

A mes neveux et nièces, Yousef, Maram,

Lina, Nada, Saad, Ayoub.

A tout mes amies et mes collègues

*A tout les employeurs de la faculté de
technologie*

A toute ma famille

Karima salem

SOMMAIRE

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE:.....	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I:Généralités sur les systèmes éoliens

I.1- INTRODUCTION :.....	3
I.2. DIFFERENTS TYPES D'ENERGIES RENEVLABLES:.....	3
I. 3. AVANTAGES ET INCONVINIANTS DE L'ENERGIE EOLIENNE:.....	4
I.4.LA PUISSANCE EOLIENNE DANS LE MONDE :	5
I.5.DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE:	7
I.6.LES DIFFERENT TYPES D'EOLIENNES :.....	7
I.6.1.Les éoliennes à axe vertical :	7
I.6.2.Les éoliennes à axe horizontal :	9
I.7. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE:.....	12
I.8.PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :.....	14
I.9.PRINCIPE DE CONVERSION DE L'ENERGIE CINETIQUE EN ENERGIE MECANIQUE: ...	14
I.10. LES DIFFERENTES ZONES DE FONCTIONNEMENT DE L'EOLIENNE A VITESSE VARIABLE :.....	19
I.11.SIMULATION NUMERIQUE DU MODELE :	21
I.12.CONCLUSION:.....	24

CHAPITRE II: modélisation et simulation de la MADA

II.1 INTRODUCTION:.....	26
II.2. ETAT DE L 'ART DE LA MADA :	26
II.3.REGIMES DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA :.....	26
II.4.ETUDE DE LA PUISSANCE POUR LA MADA :.....	27
I.5.LES DIFFERENTES STRUCTURES D'ALIMENTATION DE LA MADA :	30
II.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA :	33
II.7.MODELE DE LA MADA DANS LE PLAN abc:	34
II.8.HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES :.....	36
II.9. LES EQUATIONS DE LA MADA:	36

SOMMAIRE

II.10. MODELE DE LA MADA DANS LE PLAN DQ :	39
II.11. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT :	42
II.12. SIMULATION ET ANALYSE DU RESULTATS :	45
II.13. CONCLUSION :	53

CHAPITRE III: modélisation de l'association AC/DC/AC

III.1. INTRODUCTION :	54
III.2. PARAMETRE DE PERFORMANCE DE SIGNAL PERIODIQUE :	54
III.2.1 Facteur de la $n^{\text{ième}}$ harmonique H_{fn} :	54
III.2.2 Distorsion d'harmonique total THD :	54
III.3. MODELISATION DES CONVERTISSEURS AC/DC/AC :	55
III.3.1. Modélisation de convertisseur DC/AC (onduleur):	55
III.3.2. Modélisation du bus continu :	56
III.3.3. Modélisation de convertisseur AC/DC :	57
III.4. COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION (MLI) :	58
III.4.1. Modulation de largeur d'impulsion «MLI» :	58
III.4.2. stratégie de commande par MLI triangulo-sinusoidale :	58
III.4.3. Génération des impulsions de commande :	59
III.4.4. Simulation de la commande MLI sinus – triangle :	60
III.4.5. simulation de l'onduleur utilisant la commande décalé:	62
III.5. CONCLUSION :	63

CHAPITRE IV: L'intégration de l'éolien aux réseaux électriques

IV.1. INTRODUCTION.....	64
IV.2. SYSTEME D'ENERGIE ELECTRIQUE :	64
IV.2.1. Architecture du réseau électrique	64
IV.2.2. Description d'un parc éolien.....	65
IV.2.3. Raccordement des éoliennes au réseau électrique.....	66
IV.3. PARTICIPATION DES EOLIENNES AUX SERVICES-SYSTEME :	67
IV.4. LES PRINCIPAUX TYPES DE DEFAUTS DANS LES RESEAUX ELECTRIQUE :	72

SOMMAIRE

IV.4.1. Classification des creux de tension.....	73
IV.4.2.Types de réseaux.....	73
IV.5.PUISSANCE TRANSMISSIBLE DANS UNE LIGNE :.....	75
IV.6.CALCUL D'ECOULEMENT DE PUISSANCE DES RESEAUX ELECTRIQUES	75
IV.7.CLASSIFICATION DES JEUX DE BARES :.....	76
IV.8.EQUATIONS DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE EN UTILISANT LA MATRICE ADMITTANCE :	76
IV.9.RESOLUSTION DU PROBLEME D'ECOULEMENT DE PUISSANCE PAR LA METHODE DE GAUSS-SEIDEL :	77
IV .10.CONCLUSION:.....	78
CONCLUSION GENERALE.....	79

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURES

Liste de figures

- Fig I.1: Les différentes sources d'énergies renouvelables
- Fig.I.2 : Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde
- Fig.I.3 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie.
- Fig.I.4: Conversion de l'énergie cinétique du vent.
- Fig I.5 : éolienne à axe vertical.
- Fig I.6 : Structure de Darrieus
- Fig I.7 : Structure de Savonius
- figI.8 : Éolienne à axe horizontal.
- Fig. I.9 : Capteur à axe horizontal
- Fig I.10: Éoliennes offshores de Middelgrunden (Danemark).
- Fig I.11 : éléments constituant une éolienne.
- Fig I.12. représentation du tube de courant
- Fig.I.13 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.
- Fig.I.14: Schéma bloc du modèle de la turbine
- Fig.I.15 : Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance
- Fig.I.16. Schéma bloc de la maximisation de la puissance
- Fig.I.17: Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe)
- FigI.18: La vitesse de vent appliquée à la turbine
- FigI.19 : La vitesse mécanique de la turbine
- Fig. I.20 : La puissance aérodynamique
- Fig.I.21: La vitesse de vent
- Fig.I.22: La vitesse mécanique de la turbine
- Fig.I.23 : La puissance aérodynamique
- Fig.II.1 : Fonctionnement hypo synchrone « $g > 0$ »
- Fig.II.2 : Fonctionnement hyper synchrone « $g < 0$ »
- Fig.II.3 : Fonctionnement hypo synchrone « $g > 0$ »
- Fig.II.4 : Fonctionnement hyper synchrone « $g < 0$ »
- Fig.II.5 : Machine asynchrone à double bobinage statorique
- Fig.II.6 : Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor
- Fig.II.7 : MADA avec un contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique
- Fig.II.8: MADA alimentée par un pont à diodes et thyristor
- Fig.II.9 : MADA alimentée par un pont à diodes et un onduleur MLI

LISTE DES FIGURES

- Fig.II.10: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur
- Fig.II.11 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI
- Fig.II.12 : MADA avec des bagues collectrices
- Fig.II.13: Représentation de la Machine Asynchrone à double Alimentation
- Fig.II.14 : Passage du triphasé au biphasé
- Fig.II-15: Schéma bloc de la MADA
- Fig.II.16:La vitesse de rotation de la MADA à vide ($C_r=0$)
- Fig.II.17 : le couple électromagnétique de la MADA à vide ($C_r=0$)
- Fig.II.18 : Les flux rotoriques de la MADA à vide ($C_r=0$)
- Fig.II.19 : Les courants statoriques de la MADA à vide ($C_r=0$)
- Fig.II.20 : Les courants rotoriques de la MADA à vide ($C_r=0$)
- Fig .II.21 : Les flux statoriques de la MADA à vide ($C_r=0$)
- Fig.II.22 : Les flux statoriques de la MADA en charge
- Fig.II.23 : Les courants rotoriques de la MADA en charge
- Fig.II.24 Les courants statoriques de la MADA en charge
- Fig II.25 : Les flux rotoriques de la MADA en charge
- Fig.II.26: Le couple électromécanique et La vitesse de rotation
- Fig.II.27 : Vitesse de rotation et le couple électromagnétique de la MADA alimentée par deux sources de tension (rotorique et statorique).
- Fig.II-28: Schéma bloc de la GADA
- Fig.II.29: Les courants statoriques de la GADA
- Fig.II.30 : Les courants rotoriques de la GADA
- Fig.II.31 : la puissance active et réactive statorique de la GADA
- FigII.32 : la puissance active et réactive rotorique de la GADA
- FigIII.1 : Schéma de l'onduleur de tension
- Fig III.2 : Représentation d'un redresseur à MLI
- figIII.3.signal de la portuse avec la référence
- Fig III.4 : le modèle Simulink de la commande MLI sinus triangle
- Fig.III.5 : Tension redressé par un redresseur MLI
- Fig III.6 : le signal et le spectre de tension ondulée par MLI sinusoïdale pour différent (m)
- Fig III.7.Commande MLI d'un redresseur (m=21) avec un onduleur (m=36) Avec le spectre de tension.
- Fig III.8: La commande de trois bras.
- Fig III.9: Commande MLI d'un redresseur +commande décalé d'un onduleur

LISTE DES FIGURES

Fig.IV.1: Architecture des réseaux électriques.

Fig.IV.2: Schéma de principe du raccordement des éoliennes au réseau.

Fig.IV .3 : Réglage primaire de tension

Fig IV.4 : Réglage de tension par l'onduleur coté réseau

Fig IV.5: Réglage hiérarchique de fréquence

Fig IV.6 : principe de contrôle de la puissance mécanique

Fig.IV.7 : Intégration d'un statisme dans une boucle de régulation de vitesse

Fig.IV.8 : Caractérisation du creux de tension

Fig.IV.9 : Classification des creux de tension (avant défaut en pointillé)

Fig.IV.10 : Exemple d'un réseau maillée

Fig.IV.11 : Exemple d'un réseau radial

LISTE DE TABLEAUX

Liste des tableaux :

Tableau (IV.1) : Caractéristiques du transformateur.

Tableau (IV.2) : Caractéristiques des câbles utilisés dans les parcs de Maia

NOTATION :

P_{vent}	: Puissance du vent ;
ρ	: Masse volumique du vent ;
V_{vent}	: Vitesse du vent ;
C_p	: Coefficient de puissance
β	: Angle de calage
C_g	: couple issu du multiplicateur ;
$P_{\text{aéro}}$: Puissance de la turbine
S_t	: Surface balayée par la turbine
λ	: La vitesse spécifique de la turbine.
Ω_{trbine}	: Vitesse de la turbine
Ω_r	: Vitesse du rotor de la génératrice
G	: Multiplicateur mécanique
C_{vis}	: Couple des frottements visqueux
$C_{\text{aéro}}$: Couple de la turbine
R_t	: Rayon de la turbine
J_t	: l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice ;
M.P.P.T	: Maximum Power Point tracking
PI	: le régulateur de vitesse .
Ω_{ref}	: la vitesse mécanique de référence.
MADA	: Moteur Asynchrone à Double Alimentation
GADA	: génératrice Asynchrone à Double Alimentation
s, r	: Indice du stator, du rotor
d, q	: Indice des composantes orthogonales directs et en quadrant
R_s, R_r	: Résistance statorique, rotorique
L_s, L_r	: Inductance propre statorique, rotorique
M_{sr}	: Inductance mutuelle stator- rotor
M_s	: Inductance mutuelle entre les enroulements du stator
M_r	: Inductance mutuelle entre les enroulements du rotor
Φ_s, Φ_r	: Respectivement flux statorique et rotorique
$\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, \Phi_{dr}, \Phi_{qr}$: Respectivement flux statorique et flux rotorique
v_s, v_r	: Tension simple respectivement statorique et rotorique
θ_s, θ_r	: Angle électrique statorique, rotorique

ω_s, ω_r	: Pulsation statorique , rotorique
Ω_m	: Pulsation mécanique
a_s, b_s, c_s	: phase du stator.
A_r, B_r, C_r	: phase du rotor.
$[V_{as}, V_{bs}, V_{cs}]^T$: vecteur des tensions statoriques
$[I_{as}, I_{bs}, I_{cs}]^T$: vecteur des courants qui traversent les enroulements statoriques ;
$[\phi_{as}, \phi_{bs}, \phi_{cs}]^T$: vecteur des flux statoriques ;
p	: Nombre de paire de pole
N_s, N_r	: Nombre de spire statorique, rotorique
g	: Glissement
P_e	: Puissance d'entrée
P	: Operateur de LAPLACE
C_{em}	: Couple électromagnétique
C_r	: Couple résistant
f	: Coefficient de frottement visqueux
J	: Inertie de la machine
P_s	: Puissance active statorique
Q_s	: Puissance réactive statorique
P_r	: Puissance active rotorique
Q_r	: Puissance réactive rotorique
P_m	: Puissance mecanique
DC/AC	: Continu/Alternatif
IGBT	: Insulated Gate Bipolar Transistor
MLI	: Modulation de largeur d'impulsions
C	: Capacité totale du condensateur
V_{effn}	: Valeur efficace de la n^{ieme} harmonique.
V_{eff1}	: Valeur efficace de la fondamentale
THD	: distorsion harmonique totale
i_{red}	: courant redressé.
i_{ch}	: courant de charge
i_{ond}	: courant ondulé
V_{dc}	: la valeur de la tension continue
V_{pm}	: Amplitude de la porteuse

H_{fn}	: Facteur de la $n^{\text{ième}}$ harmonique
δ	: Angle de la charge
PDT	: poste de transformation
PDL	: poste de livraison
BT	: base tension
HT	: haute tension
MT	: moyenne tension

A decorative rectangular border surrounds the text. It features a double-line black frame. At each of the four corners, there is a stylized pen nib pointing towards the center, with intricate, swirling floral and vine-like patterns extending from the nibs into the corners.

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE:

L'électricité est une des formes d'énergie les plus versatiles et qui s'adapte au mieux à chaque nécessité. Son utilisation est étendue, Des milliers d'appareils sont destinés pour fonctionner grâce à l'énergie électrique, soit sous forme de courant continu de faible tension, soit à partir d'un courant alternatif de tension plus élevée. Il est très intéressant de produire de l'électricité avec une source d'énergie sûre et pas mauvaise, comme l'énergie éolienne.

L'énergie éolienne a été exploitée depuis l'antiquité dans les pays du Moyen-Orient. Rapportés en Europe par les croisades, les moulins à vent ont constitué jusqu' au XIX^e(19) siècle une source d'énergie pour la mouture des blés et le pompage de l'eau (Hollande), dans les pays industrialisés, l'usage des éoliennes s'est réduite à la fourniture d'électricité (aérogénérateurs) et au pompage de l'eau en site isolé; dans les pays en développement, ces machines continuent à être utilisées pour tous les autres usages. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.[1]

L'objectif de ce mémoire est la modélisation et la simulation dynamique de chaîne de production éolienne intégrée dans un réseau électrique moyen tension à base d'une machine asynchrone à double alimentation. Ce mémoire est constitué de quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur l'énergie éolienne, suivie par modélisation de turbine avec la maximisation de la puissance extraite.

Dans le deuxième chapitre, on présente la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation. Sa mise en équation permettra de simuler son modèle, en l'alimentant par deux sources triphasées sinusoïdales parfaites ; l'une au niveau de stator et l'autre au niveau de rotor, on termine ce chapitre par les résultats de simulation dans les deux modes (moteur et générateur) avec ses interprétations.

INTRODUCTION GENERALE

Le troisième chapitre montre la modélisation et la simulation des convertisseurs AC/DC/AC, suivi par une étude comparative entre la stratégie de commande par largeur d'impulsion (MLI) et la commande décalé.

Le quatrième chapitre, présente l'intégration des l'éoliennes dans les réseaux électriques.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale dont nous donnerons quelques commentaires et quelques perspectives de recherche envisagées.



CHAPITRE I :

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1- INTRODUCTION :

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [1].

Dans ce chapitre nous avons fait un aperçu sur le système éolien suivi par la modélisation et la simulation de la turbine on appliquant un couple.

I.2. DIFFERENTS TYPES D'ENERGIES RENEVLABLES:

Il existe plusieurs sources d'énergies renouvelables, dont on peut en distinguer trois grandes familles [2] :

1. L'énergie d'origine mécanique (éolienne, hydraulique);
2. L'énergie solaire (panneaux photovoltaïques);
3. L'énergie sous forme de chaleur (géothermique, solaire et thermique,....);

La technologie utilisée dans l'exploitation les différentes sources renouvelables pour la production d'énergie électrique est basée sur le même principe que dans les différentes centrales classiques (hydraulique, thermique et nucléaire).

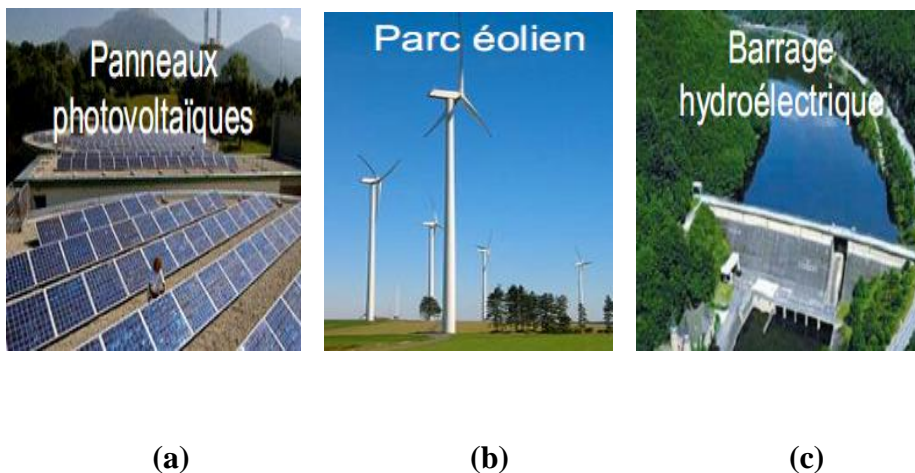


Fig I.1: Les différentes sources d'énergies renouvelables

I. 3. AVANTAGES ET INCONVINIANTS DE L'ENERGIE EOLIENNE:

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier.

I.3.1.Avantage:

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable;
- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement [2], [3] ;
- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂ ;
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs ;
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plus part des centrales thermiques et des centrales nucléaires ;
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace ;
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi, les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres ;
- C'est l'énergie la moins chère parmi les énergies renouvelables;
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement ;
- 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 à énergies plus traditionnelles;
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique. [2].

I.3.2.Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages [2] :

- 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 ;
- L'impact visuel ;

- 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 ;
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire.

I.4.LA PUISSANCE EOLIENNE DANS LE MONDE :

Comme il est montré sur la figure (I.2), la production de l'énergie éolienne connaît depuis quelques années le taux de croissance le plus important de l'industrie de la production d'électricité [5]. Avec une croissance de 30% en 2003, la capacité de production d'énergie éolienne dans le monde a atteint 39,4 GW durant la même année.

L'électricité éolienne est utilisée principalement en Europe (74% de la puissance mondiale installée en 2003), dont plus de 98% dans les pays de l'union européenne. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergie plus traditionnelle, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90[5].

En 2007, l'Allemagne disposait de 22,3 GW de puissance éolienne installée, les États-Unis 16,8 GW, l'Espagne 15,1 GW, l'Inde 8 GW, la Chine 6,1 GW et la France 2,4 GW (uniquement à terre)[4]. En 2008, les États-Unis étaient devenus le premier pays pour la capacité d'énergie éolienne avec 25 170 MW installés devant l'Allemagne (23 902 MW).

En 2010 la Chine détrône les États-Unis avec 42 GW (soit plus que 60 % de la puissance du parc nucléaire français) de puissance installée contre 40 GW pour les Américains.

Les perspectives sont toutes spectaculaires. L'EWEA (**E**ngin **W**ind **E**uropéen **A**ssociated), l'association européenne pour l'énergie du vent estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% pour 2040.



Fig.I.2 : Evolution de la puissance éolienne installée dans le monde

Potentiel éolien en 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 (5.5 m/s dans la région de Tindouf), et jusqu'à 7m /s dans la région d'Adrar.

Les travaux effectués par les chercheurs du C.D.E.R D'Alger montrent à l'évidence que le pompage éolien peut être pratiqué à travers la steppe et le désert Algérien.

La faisabilité économique de l'utilisation de l'énergie éolienne dans notre pays est à présent réelle et effective et est confirmée par l'expérience.

La figure (I.3) présente la carte des vents en Algérie établie par le centre de développement des énergies renouvelable CDER.

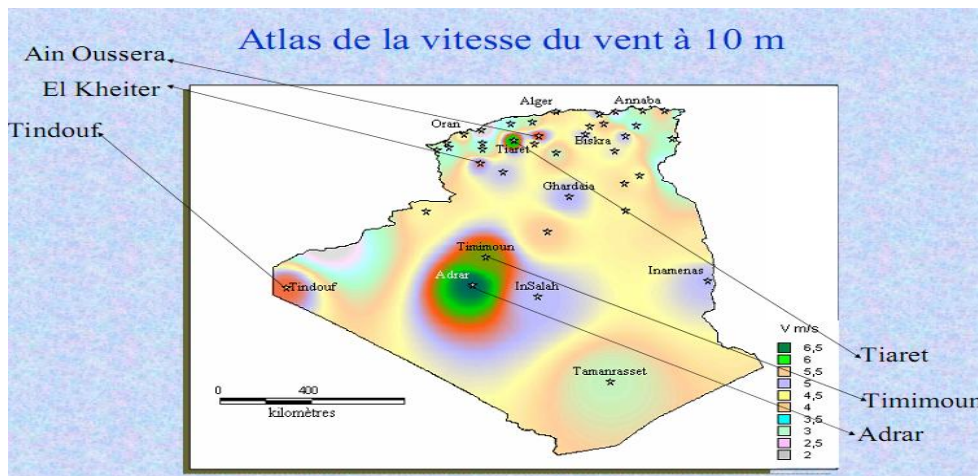


Fig.I.3 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s) en Algérie.

I.5.DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE:

Un **aérogénérateur**, plus communément appelé **éolienne**, est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique (Fig.I.4).

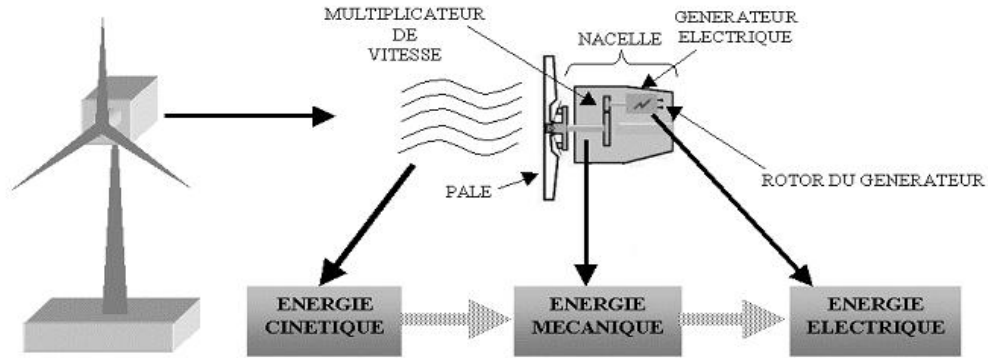


Fig. I. 4: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, de plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [7][8].

I.6.LES DIFFERENT TYPES D'EOLIENNES :

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice, les éoliennes sont classées en deux types :

I.6.1.Les éoliennes à axe vertical :

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance [7]. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances)[7],[8].



(a)



(b)

Fig I.5 : éolienne à axe vertical.

Rotor de Darrieus: Ou éoliennes à variation cyclique d'incidence. Basées sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil. La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

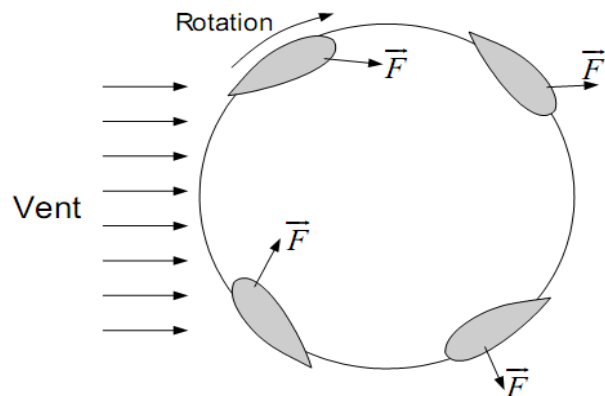
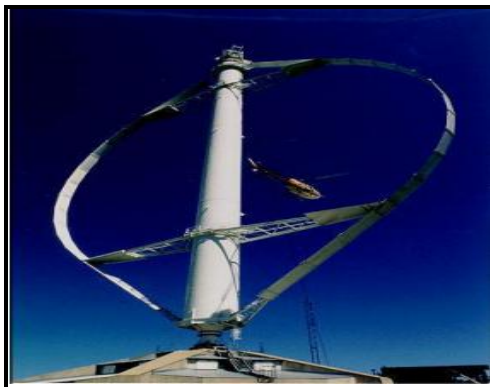


Fig I.6 : Structure de Darrieus

Rotor de Savonius: Basé sur le principe de traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure.

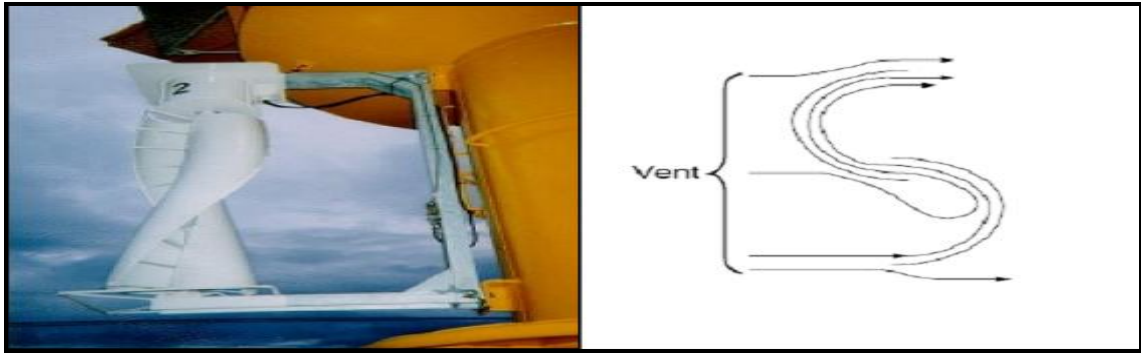


Fig I.7 : Structure de Savonius

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants:

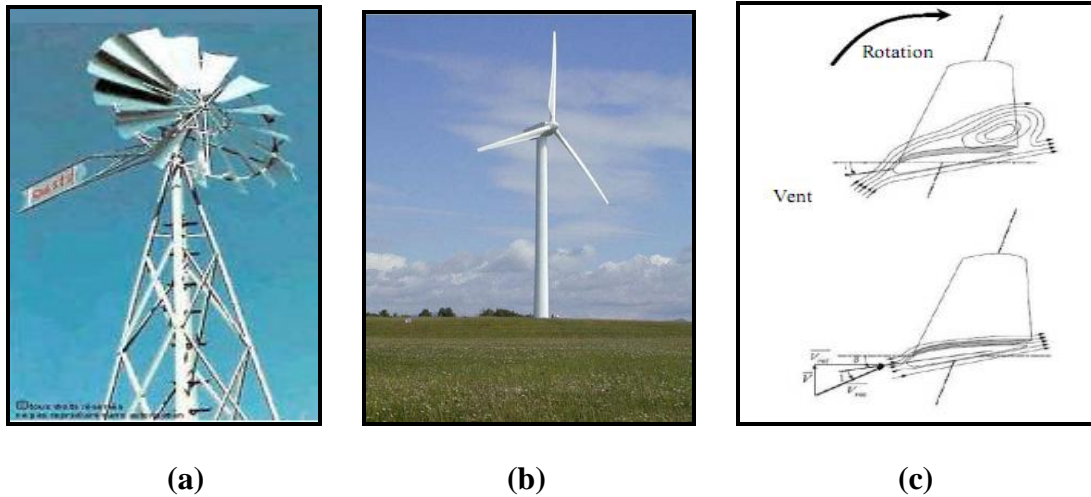
- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

I.6.2. Les éoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées, elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance et le coût et la vitesse de rotation du capteur éolienne.[7].



figI.8 : Éolienne à a x e horizontal.

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. Dans la plupart des cas, le bruit du vent est supérieur à celui engendré par l'éolienne. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

- Eoliennes de petite puissance: inférieure à 40 kW
- Eoliennes de moyenne puissance: de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance: supérieure à 1 MW.

On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent « hélice au vent » (Fig I.9.a), et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « hélice sous le vent » (Fig 1.9.b).

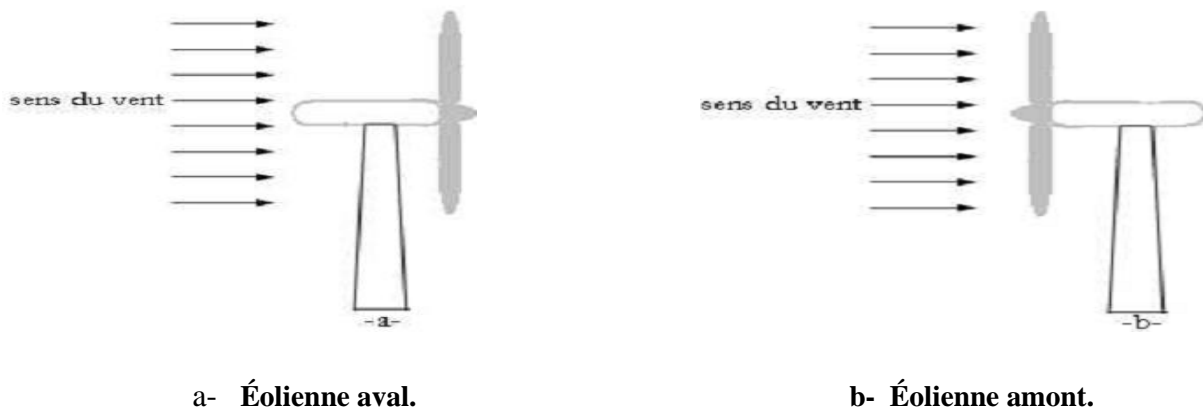


Fig. I.9 : Capteur à axe horizontal

En 1990, une nouvelle génération moderne des éoliennes à axe horizontal placées en mer, et furent appelées les éoliennes Offshores (Fig I.10) est née.



Fig I.10: Éoliennes offshores de Middelgrunden (Danemark).

A-Avantages des éoliennes à axe horizontal :

- Une très faible empreinte 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.

B-Inconvénient des éoliennes à axe horizontal:

- 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 destinées 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).

I.7. PRINCIPAUX COMPOSANTS D'UNE EOLIENNE:

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou mât, la nacelle et l'ensemble rotor-pales[7],[8].

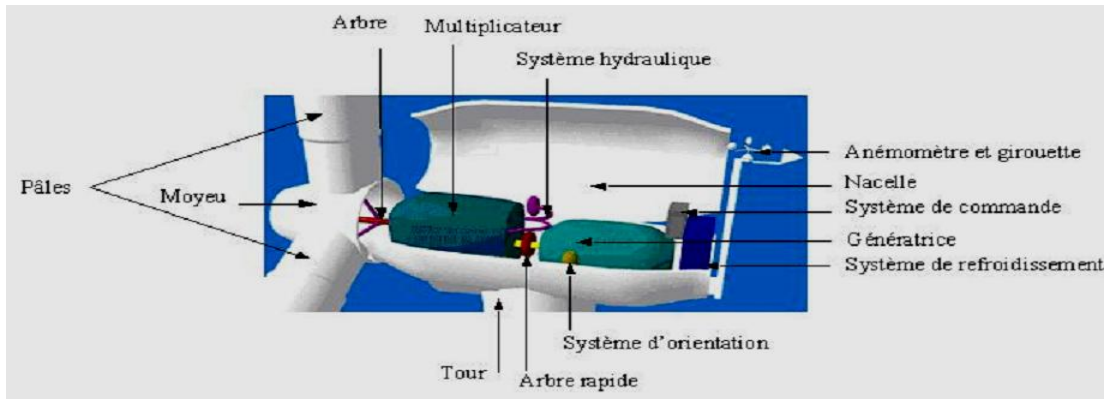


Fig I.11 : éléments constituant une éolienne.

I.7.1. La tour ou mât :

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, La tour à une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle.

I.7.2.La nacelle :

Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande :

I.7.2.1.Arbre lent :

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

I.7.2.2.Un multiplicateur :

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500tr/min).

I.7.2.3. le système de refroidissement :

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. [8].

I.7.2.4 la génératrice :

La fonction première de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique.

I.7.2.5. Anémomètre :

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de control-commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s pour assurer la protection de l'éolienne.[8]

I.7.2.6. le système de control-commande :

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne et le signal est envoyée l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique. [8]

I.7.3. Le rotor et les pales :

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59%(limite de Betz d'une éolienne à axe horizontal). Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne .Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisque elles tournent plus vite. [8]

La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée avec

un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.

I.7.4.Le moyeu :

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

I.8.PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT :

A la hauteur de la nacelle souffle un vent de vitesse V_{vent} . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt. A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolienne et commence à tourner. Une puissance P_{vent} est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine. On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques [7].

I.9.PRINCIPE DE CONVERSION DE L'ENERGIE CINETIQUE EN ENERGIE MECANIQUE:

I.9.1.Loix de bétz :

Considérons le cas d'une éolienne à axe horizontal placée dans un tube d'air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et d'une section S_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 et d'une section S_2 . On désigne par S la surface balayée par l'hélice et V la vitesse du vent au niveau des pales. Selon le principe d'incompressibilité de l'air et la continuité d'écoulement, on peut écrire que:

$$S_1V_1 = SV = S_2V_2 \quad (\text{I. 1})$$

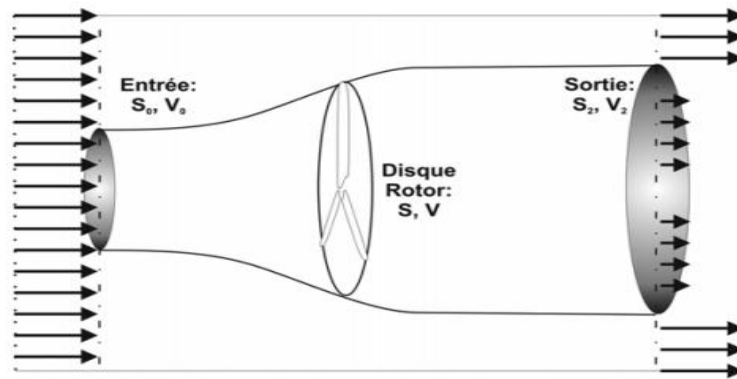


Fig I.12.représentation du tube de courant

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par l'expression:[9]

$$F = \rho S V (V_1 - V_2) \quad (\text{I. 2})$$

En remplace (I.2) dans l'équation de la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{\text{aéro}} = F \cdot V = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{I. 3})$$

Pour la variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air :

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

Donne : $v = \frac{V_1 + V_2}{2}$ et l'expression de P correspondante.

$$P_{\text{aéro}} = \Delta E_C = \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) \quad (\text{I. 5})$$

L'étude de la variation de la puissance en fonction de la vitesse à l'aval, $\frac{dP_{\text{aéro}}}{dv_2}$, fournit une seule racine ayant un sens physique: $v_2 = \frac{V_1}{3}$ correspondant au maximum de puissance [9].

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 .

La puissance cinétique du vent est donnée par la relation suivante [2] :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{\text{vent}}^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V_{\text{vent}}^3 \quad (\text{I. 6})$$

- ρ : masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25 Kg/m en atmosphère normale) .
- S : c'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale.
- V_{vent} : est la vitesse du vent (en m/s).

Nous remarquons que la puissance est directement proportionnelle à la surface balayée par le rotor, mais surtout au cube de la vitesse du vent.

Et on définit le ratio entre la puissance extraite du vent et celle disponible $\frac{P_{aéro}}{P_{vent}}$, appelé aussi coefficient de puissance C_p .

Ce coefficient présente un maximum de 16/27 soit 0,59 [8] [2]. 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 .

$$C_p = \frac{P_{aéro}}{\frac{1}{2} \rho S V^3} \quad (\text{I. 7})$$

- C_p : coefficient de puissance défini comme suit:
- β : angle d'orientation des pales .
- λ : est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales $\Omega_{turbine} \cdot R$, et la vitesse du vent V .

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V} \quad (\text{I. 8})$$

- $\Omega_{turbine}$: Vitesse de la turbine.

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est déterminé directement par :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{I. 9})$$

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différents types d'éoliennes sont illustrées sur la figure (I.13).

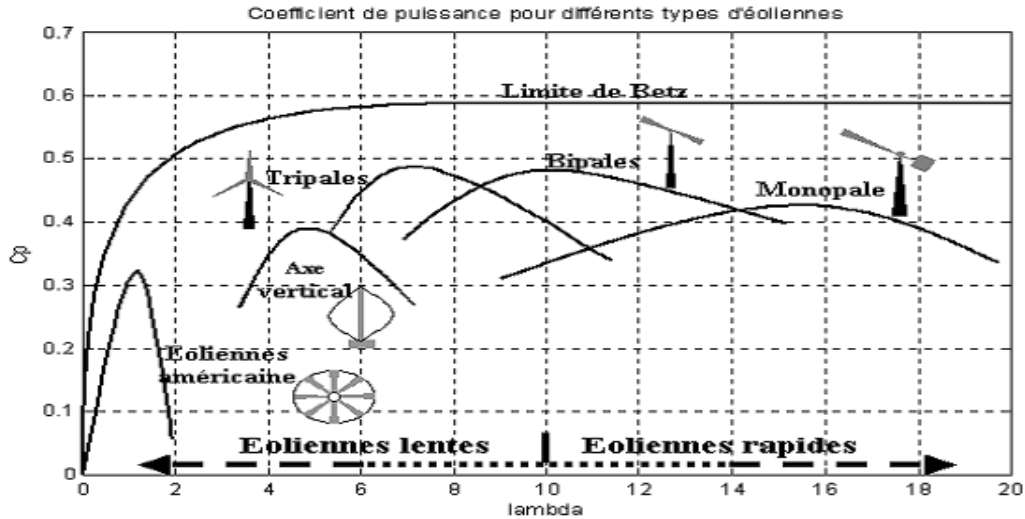


Fig.I.13 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes lentes sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance figure (I.13) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur, de plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [9].

I.9.2 Modèle du Multiplicateur :

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice, il est modélisé mathématiquement par l'équation suivante :

$$C_g = \frac{C_{aéro}}{G} \quad (I.10)$$

- C_g = couple issu du multiplicateur ;

- C_{aero} = couple aérodynamique ;
- G = Gain du multiplicateur.

Pour la vitesse, on aura :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (I.11)$$

I.9.3 Equation dynamique de l'arbre :

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit [8] :

$$J_t \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \sum \text{des couples} = C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (I.12)$$

- J_t : c'est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice ;
- C_{mec} : c'est le couple mécanique ;
- C_{em} : Le couple électromagnétique produit par la génératrice ;
- C_{vis} ; Le couple de frottement visqueux ;
- C_g : Et le couple issu du multiplicateur.

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux f :

$$C_{vis} = f\Omega_{mec} \quad (I.13)$$

I.9.4.Schéma bloc du modèle de la turbine :

Le schéma bloc modélisent la turbine est présente par la figure suivante :

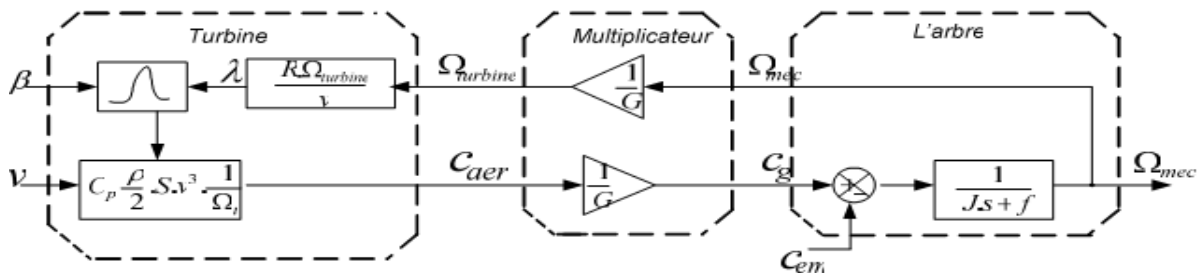


Fig.I.14:Schéma bloc du modèle de la turbine

Les entrées de la turbine sont : La vitesse du vent ; L'angle d'orientation des pales ; La vitesse de rotation de la turbine.

I.10. LES DIFFERENTES ZONES DE FONCTIONNEMENT DE L'ÉOLIENNE A VITESSE VARIABLE :

Il y a quatre zones de fonctionnement pour une éolienne [7],[8] :

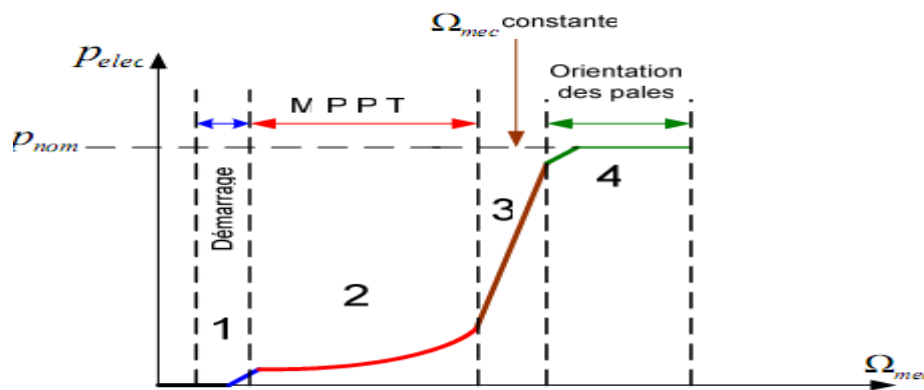


Fig.I.15 : Caractéristique puissance vitesse d'une éolienne de grande puissance .

Zone1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse dé. (C'est la vitesse mécanique de la génératrice pour la quelle éolienne a démarré)

Zone2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Pour extraire le maximum de puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale afin d'obtenir un C_p maximal. Dans cette zone, la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la vitesse nominale, la puissance électrique augmente rapidement.

Zone3 : Dans cette zone l'éolienne fonctionne à vitesse constante, et la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .

Zone4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales. Par sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à 90° .

C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

En pratique le passage de la zone 2 à la zone 4 est un peu particulier. En effet la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique C_{em} en zone 2 et, en zone 4 c'est la puissance qui doit être contrôlée par le dispositif d'orientation des pales.

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique générer.

I.10.1. Maximisation de la puissance extraite :

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Ces fluctuations constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance [7],[8].

Pour cette étude, nous considérons que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égale à sa valeur de référence.[7].[8]

$$C_{em} = C_{em-réf} \quad (\text{I.14})$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Comme à été expliqué auparavant, la vitesse est influencée par l'application de trois couples : Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{j} (C_g - C_{em}) \quad (\text{I.15})$$

La structure de commande consiste à régler le couple apparaît sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence le couple électromagnétique de référence C_{em}

permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} obtenu par la relation suivant :

$$C_{em-ref} = PI .(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (I.16)$$

- PI : est le régulateur de vitesse .
- Ω_{ref} : est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer ($\Omega_{turbine-ref}$) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G.(\Omega_{turbine-ref}) \quad (I.17)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{cpmax} (à β constant) permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p .

I.10.2.Schéma bloc du modèle de la maximisation de la puissance:

la figure (I.16) représente le schéma bloc de cette maximisation. [7].[8]

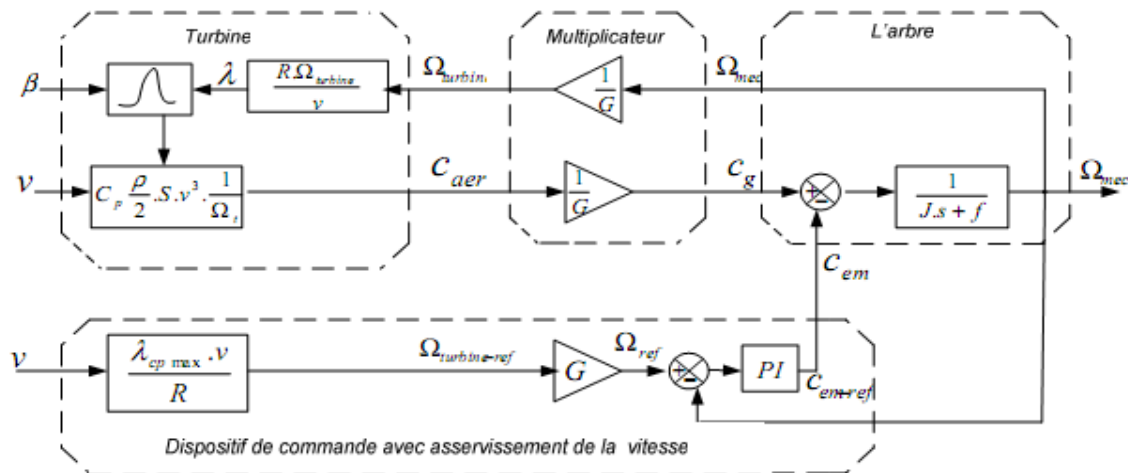


Fig.I.16.Schéma bloc de la maximisation de la puissance

I.11.SIMULATION NUMERIQUE DU MODELE :

Dans cette partie, nous présentons les trois simulations suivantes: la simulation du coefficient de puissance c_p , la simulation de la turbine à vitesse constante et à vitesse variable.

Les paramètres de la turbine de **150 KW** sont donnés comme suit :

rayon de la turbine **Rt=14** ; inertie de l'arbre **Jt=50** ; Gain du multiplicateur de vitesse **G=28** ;
 Coefficient de frottement de la machine **fv=7e-3** ; masse volumique **ρ=1.125**

I.11.1.Résultat de simulation :

Le coefficient de puissance est intrinsèque à la constitution de l'éolienne et dépend des profils des pales. On peut modéliser le coefficient de puissance avec une seule équation qui dépend du ratio de vitesse λ et l'angle d'orientation des pales β (pour une éolienne de 150 kW) :

$$C_p = (0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2)) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2)$$

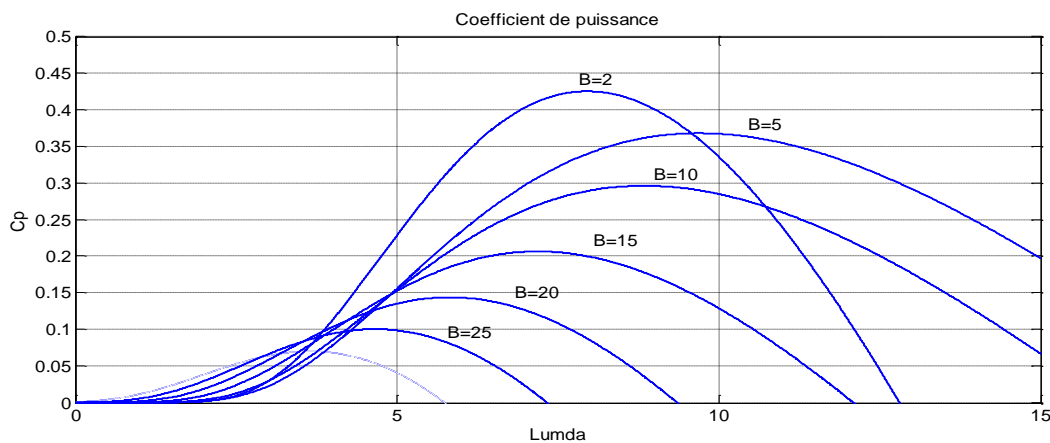
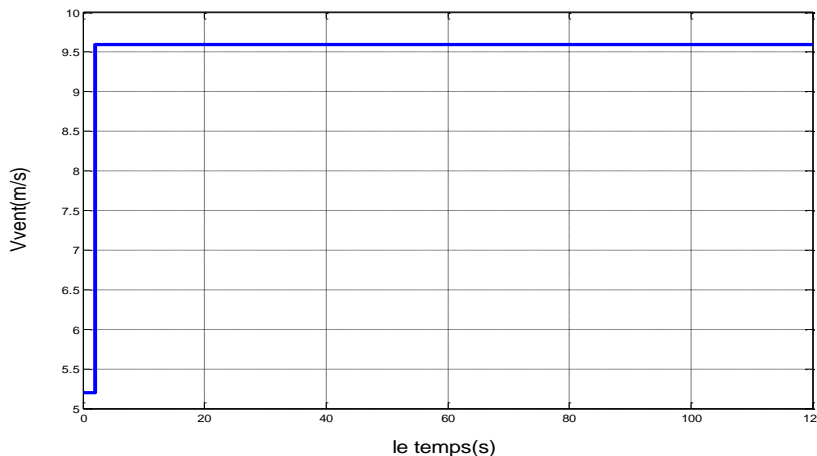
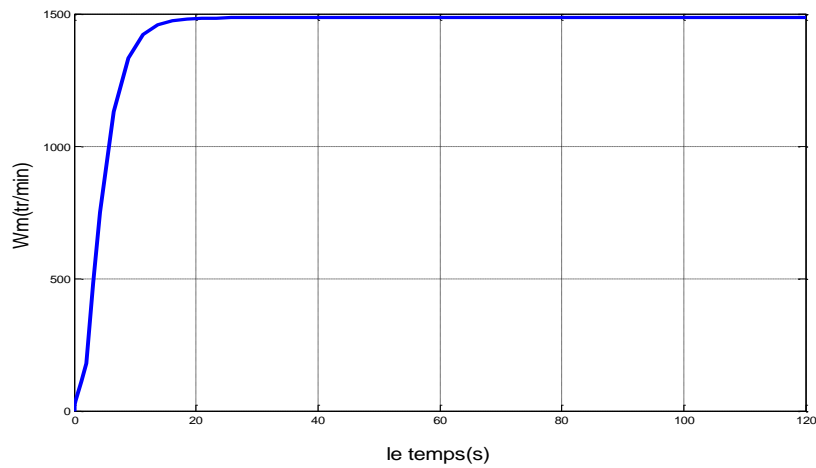


Fig.I.17: Evolution du coefficient de puissance de l'éolienne (angle de calage fixe)

***Cas de la vitesse de vent est fixe ($V_{vent}=9.5$ m/s) :**



Fig(I.18) : La vitesse de vent appliquée à la turbine



Fig(I.19) : La vitesse mécanique de la turbine

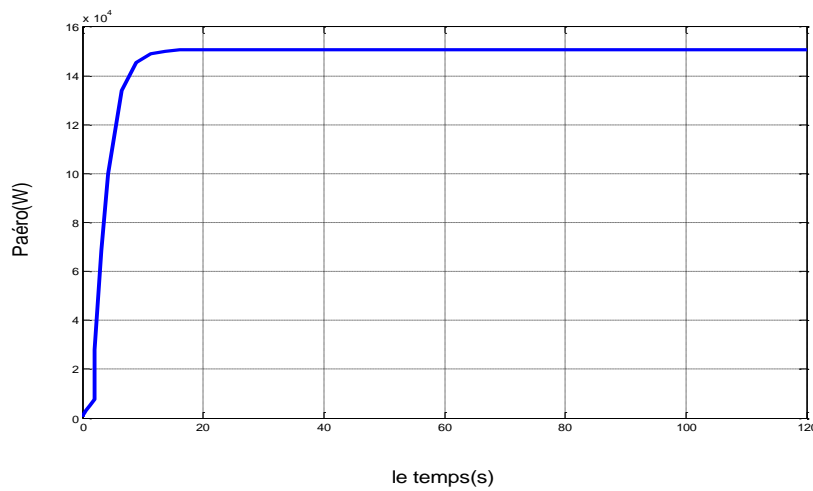
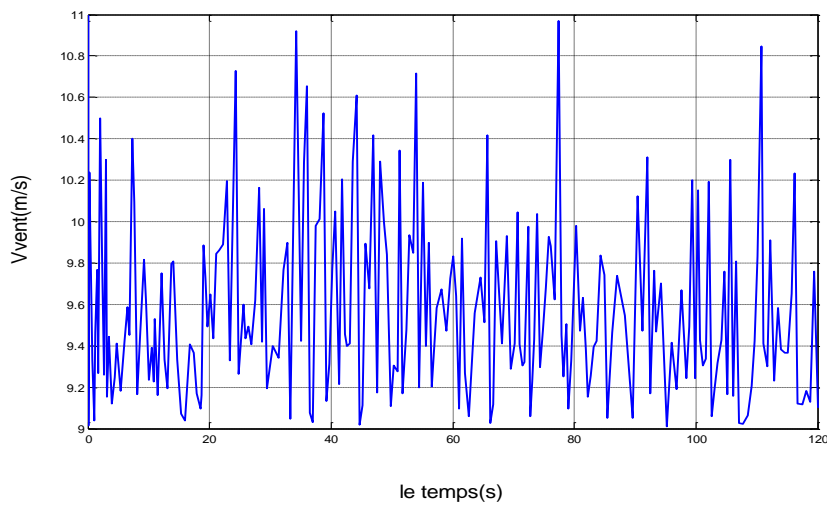
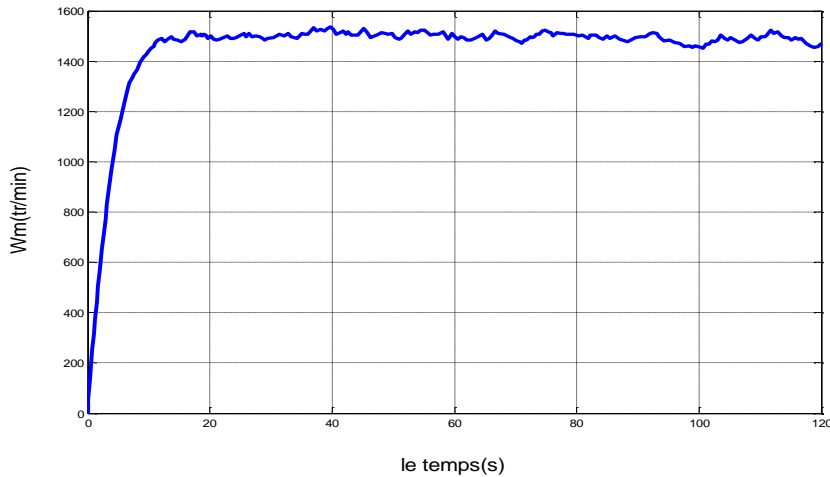


Fig. (I.20) : La puissance aérodynamique

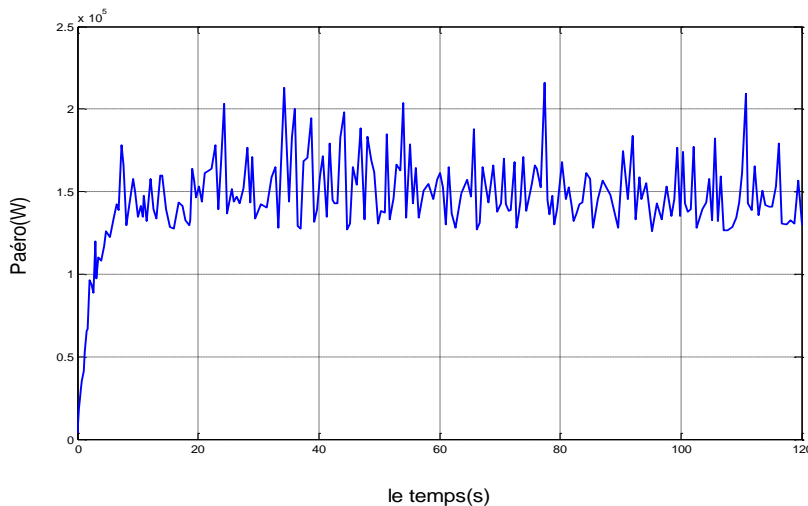
*Cas de la vitesse variable :



Fig(I.21) :La vitesse de vent



Fig(I.22) : La vitesse mécanique de la turbine



Fig(I.23) : La puissance aérodynamique

I.11.2.interprétation de résultats:

Les résultats de simulation présentent l'évolution de la vitesse du vent, la puissance éolienne et la vitesse de rotation de la turbine, La puissance du générateur éolien est limitée lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, à ce moment la puissance de l'éolienne est limitée.

I.12.CONCLUSION:

Dans ce chapitre nous avons écrit en premier lieu les différents types d éléments constituant d'une chaîne de production éolienne utilisant une MADA, ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons modélisé et simulé la turbine pour un profil de vent (vent fixe, vent

variable), Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement d'une éolienne, nous avons détaillé la zone particulière, ou la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée. Cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.

Dans le suivant chapitre nous allons étudier la génératrice la plus utilisée dans la production de l'énergie éolienne, c'est la génératrice asynchrone à double alimentation.



CHAPITRE II :

*Modélisation et
simulation de la
machine asynchrone à
double alimentation*

II.1 INTRODUCTION:

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [10].

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation et à la simulation de la machine asynchrone à double alimentation [11].

II.2. ETAT DE L 'ART DE LA MADA :

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [12].

II.3.REGIMES DE FONCTIONNEMENT DE LA MADA :

Les différents régimes de fonctionnement de la MADA peuvent être divisés en fonction de glissement comme suit :

- **Stationnaire ($g=1$)**

Le stator est alimenté directement par le réseau avec une fréquence f_s ; par conséquent, le rotor est le siège d'une F_{em} induite avec une fréquence f_r identique avec f_s . Dans cette condition, la MADA se comporte simplement comme un transformateur.

- **hypo synchrone ($0 < g < 1$)**

En tournant le rotor dans la direction du flux du stator, la fréquence f_r du rotor commence à décroître. Plus la vitesse du rotor approche de celle du synchronisme, plus f_r tend vers 0, plus la tension induite dans le rotor décroît linéairement et prend une valeur très faible qui correspond à la vitesse du synchronisme.

• **synchrone (g=0)**

Au point, où la vitesse mécanique du rotor atteint la vitesse de synchronisme, la fréquence f_r du rotor s'annule. Dans ce cas les enroulements du rotor tournent avec la même vitesse que celle du flux statorique ; donc le rotor ne voit aucun mouvement relatif par rapport à ce dernier, par conséquent il n'y a aucune tension induite dans les enroulements du rotor. On constate que la puissance du stator est égale à celle du réseau, alors que celle du rotor est nulle (l'écoulement de puissance entre le réseau et le rotor s'arrête) [7].

• **hyper synchrone (g<0)**

Par davantage d'accélération, le flux rotorique rattrape le flux statorique et la fréquence du rotor devient négative. L'augmentation de la vitesse des enroulements du rotor par rapport à celle du flux statorique mène à une augmentation de la tension induite du rotor [7].

II.4.ETUDE DE LA PUISSANCE POUR LA MADA :

Les puissances (en ignorant les pertes) de la MADA peuvent être écrites par les expressions suivantes :

$$P_r = -gP_s$$

$$P_m = -(1-g) P_s$$

	Moteur $P_m < 0$	générateur $P_m > 0$
hypo synchrone $P_s = -(P_m + P_r)$	$P_s > 0$ $P_r < 0$	$P_s < 0$ $P_r > 0$
hyper synchrone $P_m = -(P_s + P_r)$	$P_s > 0$ $P_r > 0$	$P_s < 0$ $P_r < 0$

II.4.1 Fonctionnement en génératrice :

II.4.1.1 Génératrice en hypo synchronisme :

L'énergie mécanique est transmise à l'arbre de la machine, celui-ci la fournit au stator, lequel la transmet au réseau. Afin de permettre un fonctionnement hyposynchrone, l'énergie de

glissement, provenant du réseau, se doit d'être transmise au rotor. Ainsi pour le fonctionnement générateur hyposynchrone, une alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de la vitesse de rotation.

Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor [1].

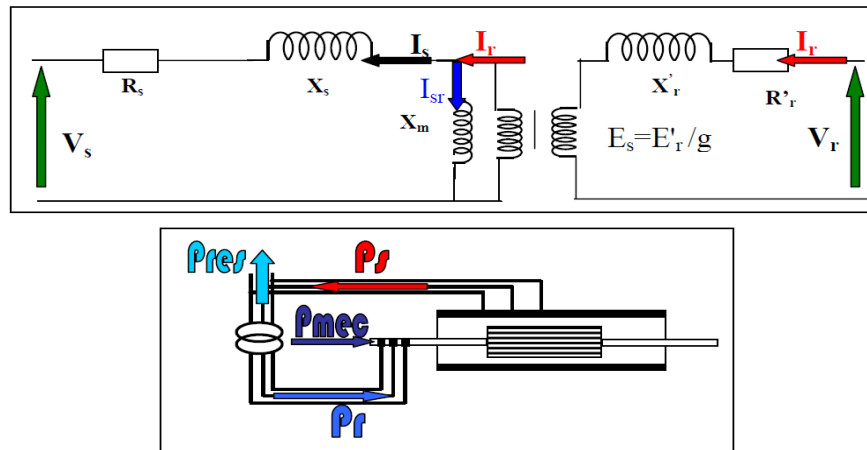


Fig.(II.1) : Fonctionnement hyposynchrone « $g > 0$ »

II.4.1.2. Génératrice en hyper synchronisme :

La totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g \cdot P_{mec}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

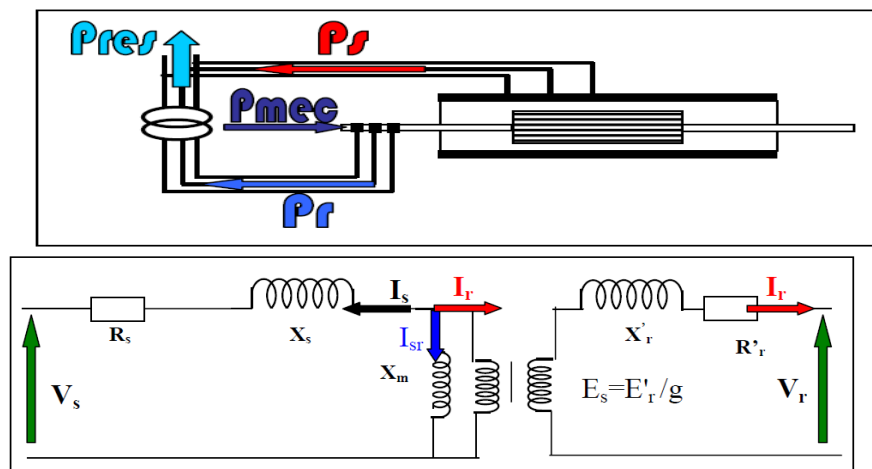


Fig.(II.2) : Fonctionnement hypersynchrone « $g < 0$ »

II.4.2 Fonctionnement pour application moteur :

II.4.2.1 Moteur en hypo synchronisme :

L'énergie absorbée du réseau est transformée partiellement en énergie mécanique. L'autre partie est injectée au réseau à travers les contacts glissants du rotor. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

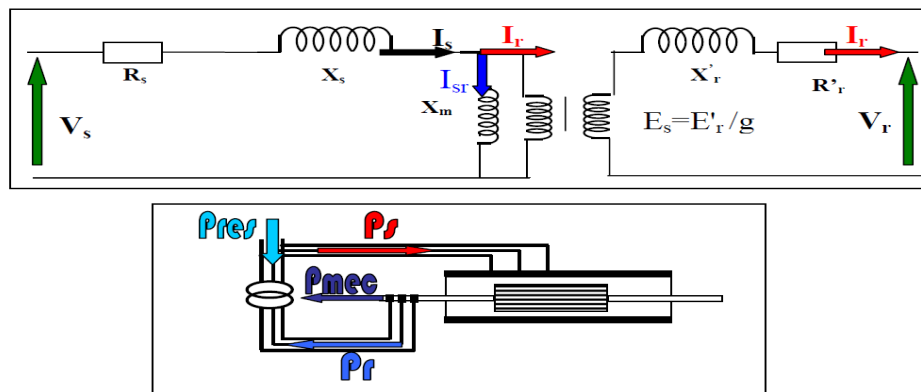


Fig.(II.3) : Fonctionnement hypo synchrone « $g > 0$ »

II.4.2.2. Moteur en hyper synchronisme :

La puissance statorique est fournie par le réseau ainsi que la puissance de glissement. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique [1].

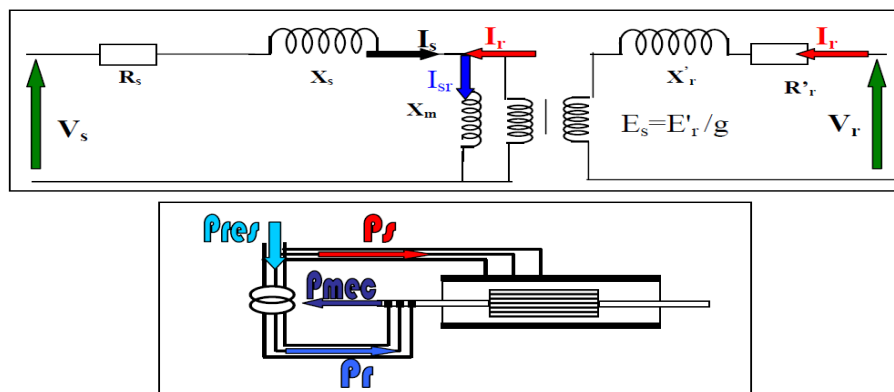


Fig.(II.4) : Fonctionnement hyper synchrone « $g < 0$ »

I.5.LES DIFFERENTES STRUCTURES D'ALIMENTATION DE LA MADA :

A- Machine asynchrone à double alimentation « type brushless »

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques figure (II.5). Un des bobinages est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. On peut contrôler la vitesse de la génératrice autour d'un point de fonctionnement en agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique qui sera appelé enroulement d'excitation.

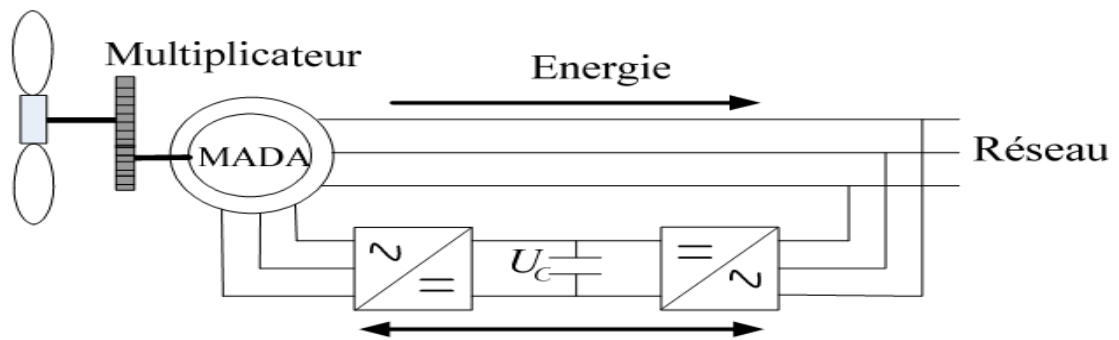


Fig.II.5 : Machine asynchrone à double bobinage statorique

B- Machine asynchrone à double alimentation « type rotor bobinée »

Malgré la présence des contacts glissants, la majorité des projets éoliens reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor [13], [7]. L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau, mais également pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau.

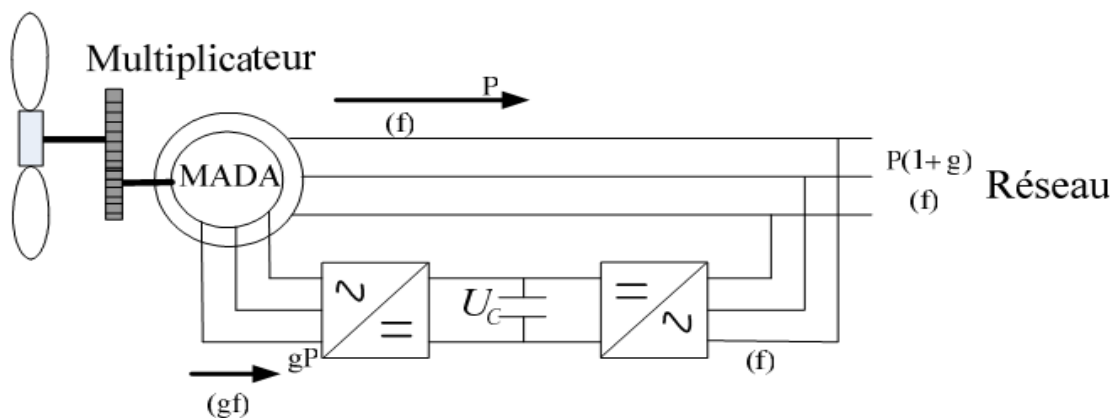


Fig.II.6 : Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

C- Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée :

Cette configuration à vitesse variable est représentée sur la figure (II.7), le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO [7].

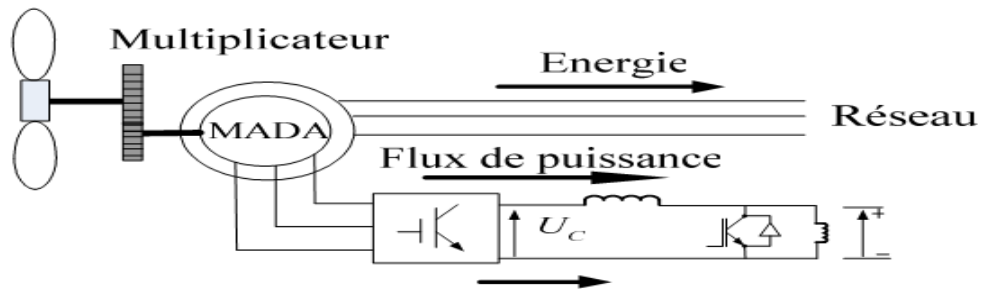


Fig.II.7 : MADA avec un control du glissement par dissipation de la puissance rotorique

D- Machine asynchrone à double alimentation pont à diodes et pont à thyristor :

« Structure de Kramer »

Une première structure pour l'alimentation électrique consiste à utiliser un pont à diodes et un pont à thyristors, cette structure est appelée « montage de Kramer ».

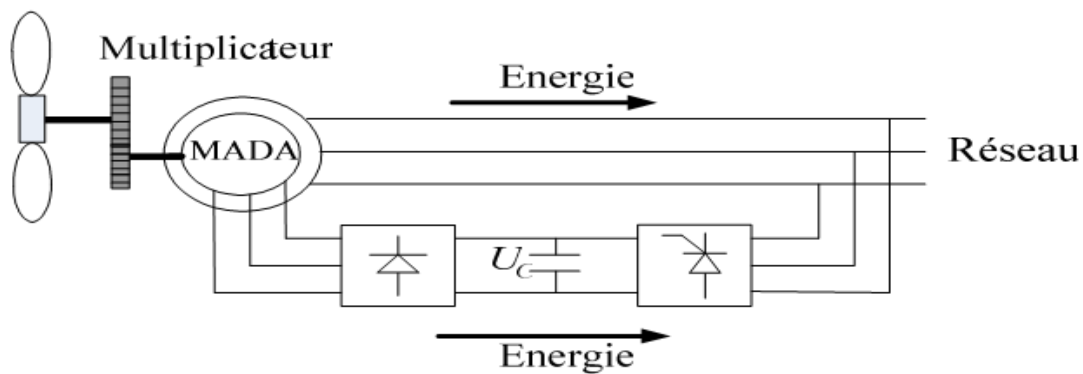


Fig.II.8: MADA alimentée par un pont à diodes et thyristor

E- Machine asynchrone à double alimentation pont à diodes et pont à transistor :

« structure de Kramer »

Les onduleurs à commutation naturelle constitués des thyristors de la structure précédente sont remplacés par des onduleurs à commutation forcée et à modulation de largeurs d'impulsions (MLI) constitués par des transistors de puissance.

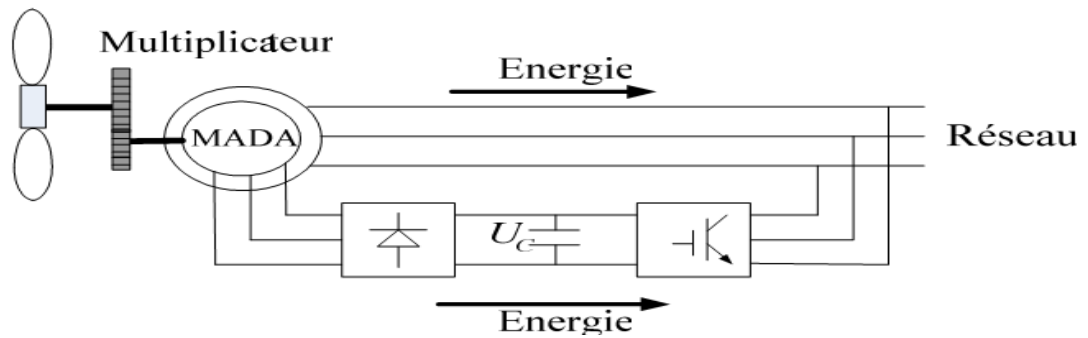


Fig.II.9 : MADA alimentée par un pont à diodes et un onduleur MLI

F- Machine Asynchrone à Double Alimentation : Structure de Scherbius avec Cycloconvertisseur :

L'association redresseur- onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur figure(II.10), cette configuration possède les même caractéristiques que la précédente, sauf que l'énergie de glissement peut être transférée dans les deux sens.

Une telle structure a été utilisée pour une éolienne de 750KW dont la vitesse de la turbine varie entre 20et 25 tr/min, avec un convertisseur dimensionné pour 200 KW [7].

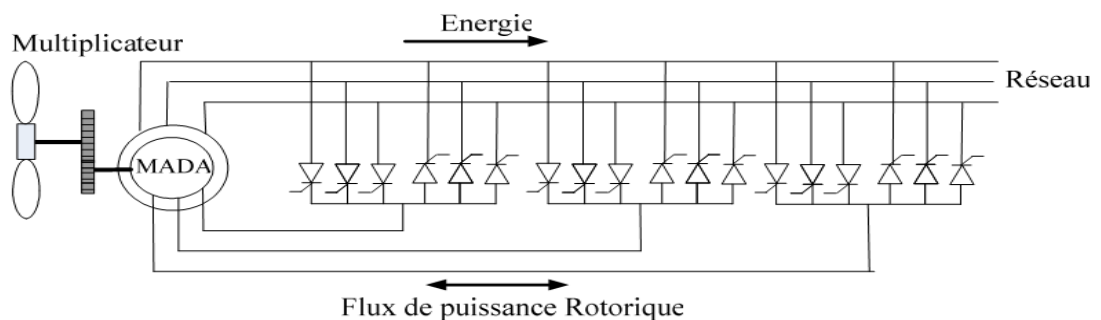


Fig.II.10: Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

G- Machine asynchrone à double alimentation : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI :

L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions, dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal (rejet des premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées).

Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances actives et réactives transitée du côté réseau [7].

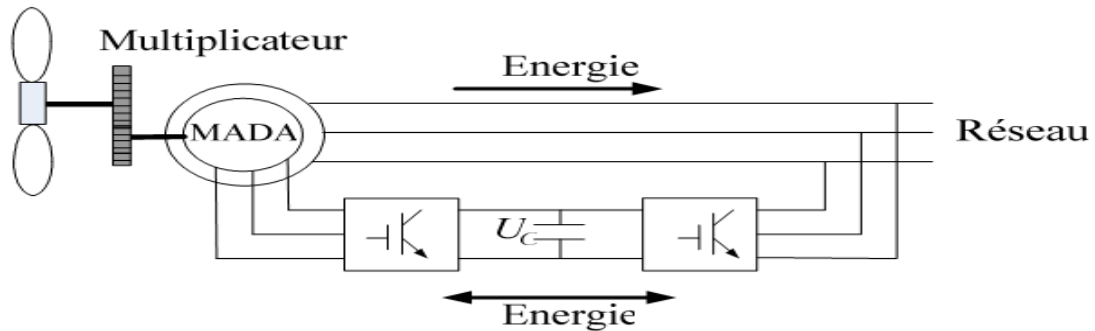


Fig.II.11 : structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

II.6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA MADA :

II.6.1 Avantages de la MADA :

Parmi ses nombreux avantages, nous citons :

- La partage des fréquences entre le stator et le rotor : en effet, dans le cas d'une double alimentation, il est possible et recommandé de partager la fréquence de rotation du rotor entre les deux convertisseurs alimentant la machine, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmenter son rendement [14].
- La solution avec deux convertisseurs alimentant la machine nous permet d'assurer un partage du courant magnétisant entre les deux armatures ainsi que la puissance mécanique fournie à la charge [13].
- L'alimentation de la machine par deux onduleurs permet de travailler autour de l'arrêt à des fréquences relativement élevées évitant ainsi un déclassement des convertisseurs tout en maintenant un couple à l'arrêt. Cette même propriété nous assure un contrôle quasi insensible aux variations résistives de la machine.
- La MADA présente une puissance massique légèrement plus élevée que les autres machines à grandes puissances.

Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.

- La mesure des courants au stator et au rotor, contrairement à la machine à cage, donnent ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [13].
- La large gamme de vitesse accessible à couple et à flux constant [14].
- Cette machine peut assurer tous les fonctionnements des autres machines. On peut donc y voir un avantage majeur, elle pourrait permettre de passer d'un fonctionnement à un autre tout à fait acceptable. Par exemple dans une application ferroviaire, nous pouvons revenir à mode de fonctionnement de type machine asynchrone à rotor court-circuité en cas de l'apparition d'un défaut sur l'un des bras des onduleurs. La gestion des modes dégradés est plus facile. [14].

II.6.2. Inconvénients de la MADA :

Afin d'être objectif, il ne faut pas oublier les inconvénients apportés par cette machine nous pouvant citer: [14].

- La machine à bague, dans un milieu corrosif, les bagues peuvent s'oxyder et cela nécessite un entretien particulier. Cependant pour un même fonctionnement, les moteurs à bagues demandent un entretien moindre que les moteurs à courant continu.
- La machine à double alimentation requiert un collecteur à trois bagues au rotor. Donc pour une même puissance, ce moteur est un peu plus long et à peine plus lourd que le moteur asynchrone à cage équivalent.
- L'aspect multi-convertisseur, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix.

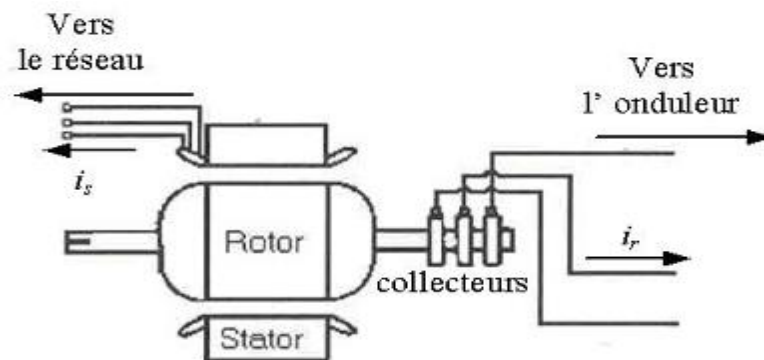
II.7. MODELE DE LA MADA DANS LE PLAN abc:

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine à courant alternatif dont la vitesse varie en fonction de la charge. Elle se compose comme une machine asynchrone d'un primaire dit stator qui est fixe, et d'un secondaire qui est le rotor de forme cylindrique qui est mobile. Le stator à trois enroulements couplés en étoile ou en triangle qui sont alimentés par un système triphasé de tension. Il en résulte la création d'un champ magnétique glissant dans

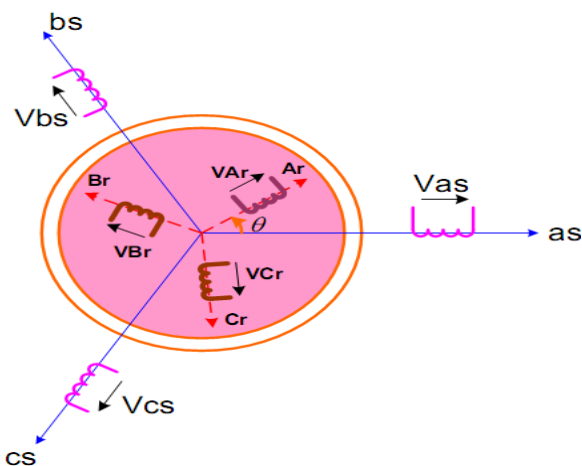
l'entrefer de la machine, où sa vitesse est $\Omega_s = \frac{\omega_s}{p}$, où ω_s désigne la pulsation du réseau d'alimentation triphasé, et p est le nombre de paire de pôles du champ magnétique qui apparaît au niveau du stator.

Le rotor qui est exécuté comme le stator, porte un bobinage triphasé avec un même nombre de pôle, couplé en étoile. Le rotor tourne à la vitesse Ω_r par rapport au stator, avec θ est l'angle entre le repère statorique et le repère rotorique.

La représentation schématique de la machine asynchrone à double alimentation est montrée sur la figure (II.12)



Fig(II.12) : MADA avec des bagues collectrices



Fig(II.13) : Représentation de la Machine Asynchrone à double Alimentation

a_s, b_s, c_s : phase du stator.

A_r, B_r, C_r : phase du rotor.

II.8. HYPOTHESES SIMPLIFICATRICES :

Pour notre étude, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants ; mutuelles entre deux enroulements varient sinusoidalement en fonction de l'angle entre leurs axes magnétiques;
- Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau négligé.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements.

- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées ;
- Les forces magnétomotrices créées par chacune des phases des deux armatures sont à répartition sinusoidales d'où résulte du fait que l'entrefer est constant, et que les inductances mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [3].

II.9. LES EQUATIONS DE LA MADA:

Avec les hypothèses citées ci dessus, les équations des tensions des phases statoriques et rotoriques décrivant le fonctionnement de la machine et Le comportement de la MAS est entièrement défini par trois types d'équations à savoir :

➤ Les équations électriques; Les équations magnétiques ; L'équation mécanique.

II.9.1 Les équations électriques :

Les équations de tensions caractérisées les phases statoriques les phases rotoriques sont respectivement:

$$\begin{cases} V_{as} = R_s I_{as} + \frac{d\phi_{as}}{dt} \\ V_{bs} = R_s I_{bs} + \frac{d\phi_{bs}}{dt} \\ V_{cs} = R_s I_{cs} + \frac{d\phi_{cs}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$$\begin{cases} V_{Ar} = R_r I_{Ar} + \frac{d\phi_{Ar}}{dt} \\ V_{Br} = R_r I_{Br} + \frac{d\phi_{Br}}{dt} \\ V_{Cr} = R_r I_{Cr} + \frac{d\phi_{Cr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Avec : $[V_r] \neq 0$

Les équations (II.1) et (II.2) se présentent sous forme matricielle :

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

Ou :

$$[V_{abcs}] = [R_s][I_{abcs}] + \frac{d}{dt}[\phi_{abcs}] \quad (\text{II.4})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{Ar} \\ V_{Br} \\ V_{Cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Ar} \\ I_{Br} \\ I_{Cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{Ar} \\ \phi_{Br} \\ \phi_{Cr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Ou :

$$[V_{ABCr}] = [R_r][I_{ABCr}] + \frac{d}{dt}[\phi_{ABCr}] \quad (\text{II.6})$$

En propose que :

$[V_{as}, V_{bs}, V_{cs}]^T$: vecteur des tensions statoriques ;

$[I_{as}, I_{bs}, I_{cs}]^T$: vecteur des courants qui traversent les enroulements statoriques ;

$[\phi_{as}, \phi_{bs}, \phi_{cs}]^T$: vecteur des flux statoriques ;

On définit de même, par changement (stator par rotor), les vecteurs rotoriques ;

R_s : résistance d'une phase statorique.

R_r : résistance d'une phase rotorique.

II.9.2 Les équations magnétiques :

$$[\phi_{abcs}] = [L_{ss}] \cdot [I_{abcs}] + [M_{sr}] \cdot [I_{ABCr}] \quad (\text{II.7})$$

$$[\phi_{ABCr}] = [L_{rr}] \cdot [I_{ABCr}] + [M_{rs}] \cdot [I_{abcs}] \quad (\text{II.8})$$

On définit les matrices $[L_{ss}]$, $[L_{rr}]$, $[M_{sr}]$, $[M_{rs}]$ par :

$[L_{ss}]$: La matrice des inductances statoriques :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

$[L_{rr}]$: La matrice des inductances rotoriques :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$[M_{sr}]$: matrice des inductances mutuelles stator rotor d'écrit sous la forme :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$[M_{rs}]$: Matrice des inductances mutuelles rotor stator, tel que : $[M_{rs}] = [M_{sr}]^T$,

Où :

l_s : L'inductance propre d'une phase statorique ;

l_r : L'inductance propre d'une phase rotorique ;

m_s : L'inductance mutuelle entre phases statoriques ;

m_r : L'inductance mutuelle entre phases rotoriques ;

M_{sr} : Est la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

II.9.3. Equation mécanique de la machine :

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p [I_s]^t \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (\text{II.12})$$

Donc, l'équation mécanique de la machine asynchrone à double alimentation :

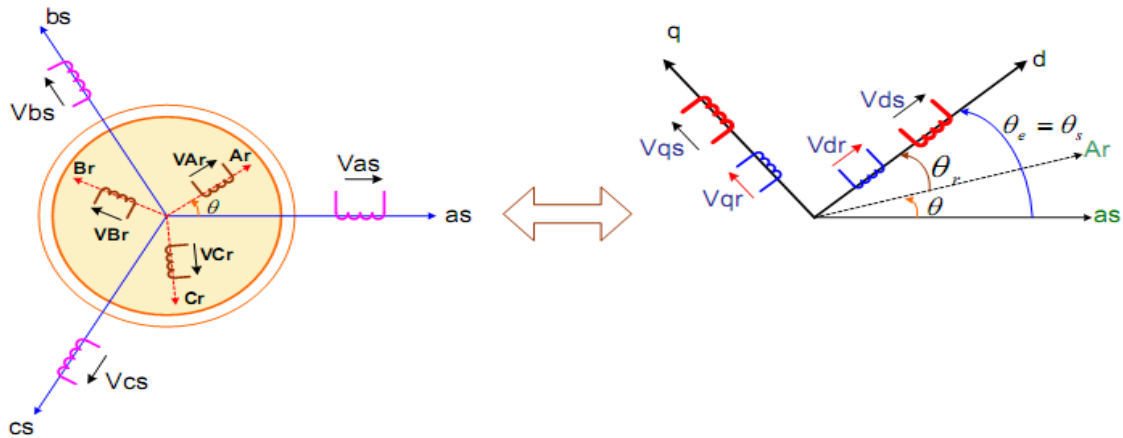
$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (\text{II.13})$$

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de θ (angle de rotation de la machine).

II.10. MODELE DE LA MADA DANS LE PLAN DQ :

II.10.1. La transformation de Park :

La transformation de Park consiste à transformer les enroulements statoriques et rotoriques en enroulements orthogonaux équivalents, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système [7].



Fig(II.14) : Passage du triphasé au biphasé

La matrice de transformation est définie par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

La transformation inverse s'exprime en évaluant l'inverse de $[P(\theta)]^{-1}$ donnée par :

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

L'angle θ est au choix de l'utilisateur et peut dépendre du temps. Le fait que $[P(\theta)]$ soit orthonormée implique que son inverse est égale à sa transposée.

$$[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^T$$

Le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ est lié au changement de base et la puissance est conservée lors de cette transformation.

II.10.2. modélisation de la MADA dans le repère de PARK :

Les tensions, courants et les flux se transforment de la manière suivante :

$$\begin{cases} [V_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{s,abc}] \\ [V_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [V_{r,ABC}] \end{cases} \quad \begin{cases} [I_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [I_{s,abc}] \\ [I_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [I_{r,ABC}] \end{cases} \quad (\text{II.16})$$

$$\begin{cases} [\phi_{s,dq}] = [P(\theta_s)] \cdot [\phi_{s,abc}] \\ [\phi_{r,dq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [\phi_{r,ABC}] \end{cases} \quad (\text{II.17})$$

Les relations entre les flux et les courants sont données par :

$$\begin{cases} [\phi_{ds}] = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ [\phi_{qs}] = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad \begin{cases} [\phi_{dr}] = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ [\phi_{qr}] = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{1}{\sigma L_s} \left(\frac{V_{qs}}{\omega_s} - \frac{M}{L_r} \phi_{dr} \right) \\ I_{qs} = -\frac{M}{\sigma L_s L_r} \phi_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Telque :

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique ;

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique statorique ;

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$: Mutuelle cyclique entre rotor-stator.

Les équations électriques sont :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_e \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_e \phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_e - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} - (\omega_e - \omega) \phi_{dr} \end{array} \right. \quad (\text{II.20})$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} \omega_e = \frac{d\theta_e}{dt} \\ \omega = \frac{d\theta}{dt} \end{array} \right. \quad \text{avec } \theta_e = \theta_s = \theta + \theta_r$$

II.10.3. choix du référentiel :

II.10.3.1. Référentiel lié au stator :

$$\frac{d\theta_e}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega \quad (\text{II.21})$$

Ce référentiel est mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées.

II.10.3.2. Référentiel lié au rotor :

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega_s$. Il est intéressant dans l'étude des régimes transitoires où la vitesse est supposée constante.

Il se traduit par la condition :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \rightarrow \frac{d\theta_e}{dt} = \omega \quad (\text{II.22})$$

II.10.3.3. référentiel lié au champ tournant :

Ce référentiel est caractérisé par $\omega_e = \omega_s$. Dans ce cas les grandeurs statoriques et rotoriques sont connues en régime permanent. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines. [3] Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de PARK lié au champ tournant comme suit :

$$\begin{cases} [\phi_{dr}] = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ [\phi_{qr}] = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \phi_{dr} - (\omega_e - \omega) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} - (\omega_e - \omega) \phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Avec :

$$\begin{cases} C_{em} = p (\Phi_{dr} I_{qs} - \Phi_{qr} I_{ds}) \\ \frac{j}{p} \frac{d\omega_m}{dt} = c_{em} - c_r - c_f \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

II.11. MISE SOUS FORME D'EQUATIONS D'ETAT :

Vu la nécessité de représenter le modèle non linéaire de la machine asynchrone à double alimentation sous forme d'équation d'état. Nous allons choisir dans tout ce qui suivra, le vecteur $[\phi_{ds} \ \phi_{qs} \ I_{dr} \ I_{qr}]$ comme vecteur d'état et les grandeurs $V_{ds}, V_{qs}, V_{dr}, V_{qr}$, comme variable de commande.

Le modèle est donné sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} X = \dot{X} = AX + BU \quad (\text{II.26})$$

Avec : $[X] = [\phi_{ds} \ \phi_{qs} \ I_{dr} \ I_{qr}]^T$

$$U = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.27})$$

Tel que :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & w_s & \frac{M}{T_s} & 0 \\ -w_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & -\beta(w_s - w_r) & -\delta & w_r \\ \beta(w_s - w_r) & \alpha & -w_r & -\delta \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} & 0 \\ 0 & \frac{-M}{\sigma L_r L_s} & 0 & \frac{1}{\sigma L_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

Avec:

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

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

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

$$\alpha = \frac{M}{\sigma T_s L_s L_r} ; \beta = \frac{M}{\sigma L_s L_r} ; \delta = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{T_s L_r L_s} \right).$$

Pour facilité la simulation, nous avons écrits la matrice [A] comme suit :

$$[A] = [A_1] + w_s [A_2] + (w_s - w_r) [A_3] + w_r [A_4] \quad (\text{II.30})$$

Telle que :

$$w_s = w_r + w_m \quad (\text{II.31})$$

$$\omega = P\Omega \quad (\text{II.32})$$

$$[A_1] = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} & 0 \\ 0 & \frac{-1}{T_s} & 0 & \frac{M}{T_s} \\ \alpha & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & \alpha & 0 & -\delta \end{bmatrix} ; \quad [A_2] = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -w_s & \frac{-1}{T_s} & 0 & 0 \\ \alpha & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} ; \quad [A_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\beta & 0 & 0 \\ \beta & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[A_4] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta & 0 & 1 \\ -\beta & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bullet \text{Pour le stator : } \begin{cases} P_s = (V_{qs} I_{qs} + V_{ds} I_{ds}) \\ Q_s = (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \end{cases} \quad (1.35)$$

$$\bullet \text{Pour le rotor : } \begin{cases} P_r = (V_{qr} I_{qr} + V_{dr} I_{dr}) \\ Q_r = (V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr}) \end{cases} \quad (1.36)$$

II.12.SIMULATION ET ANALYSE DU RESULTATS :

Une fois la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné et modélisée, nous pouvons aborder l'aspect lié à la simulation de celle-ci. Un modèle conçu en Matlab-Simulink permet de visualiser les différentes grandeurs de la machine (couple, vitesse, courants...).

II.12.1.Résultat de simulation de la MADA à rotor court-circuité pour fonctionnement moteur:

Lors de la simulation du modèle, nous imposons un couple de 0Nm. Les figures ci dessous montrent respectivement la vitesse de la machine et le couple électromagnétique fournis par la MADA. les flux rotoriques et Les courants statoriques et les courants rotoriques ; les flux statoriques.

à vide :

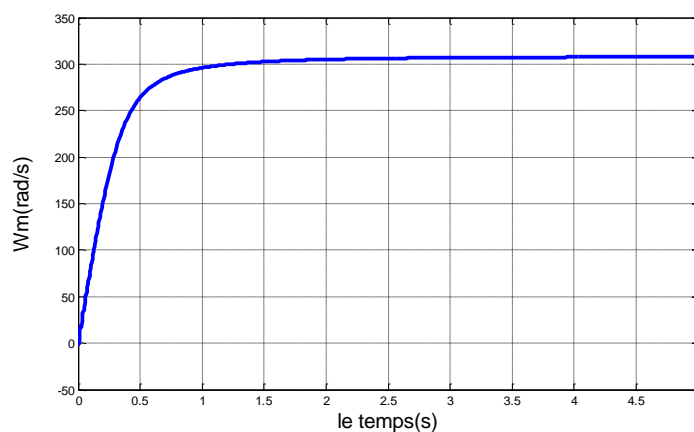


Fig (II.16) :La vitesse de rotation de la MADA à vide (Cr=0)

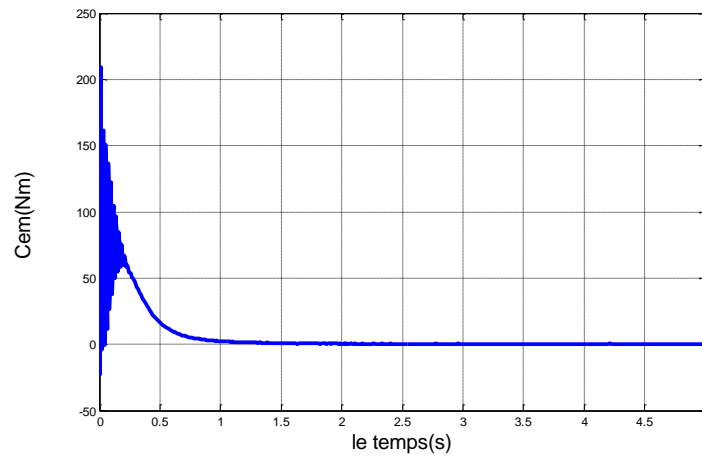


Fig (II.17) : le couple électromagnétique de la MADA à vide ($C_r=0$)

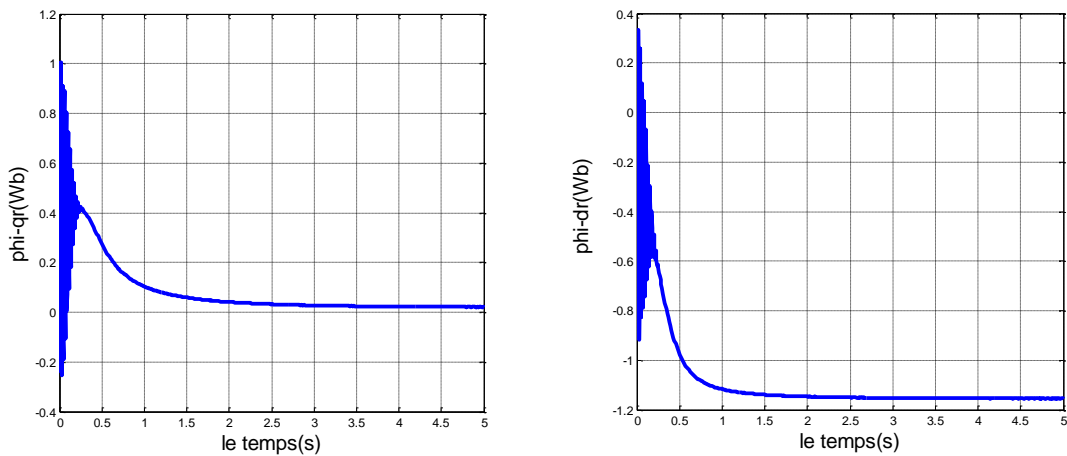


Fig (II.18) : Les flux rotoriques de la MADA à vide ($C_r=0$)

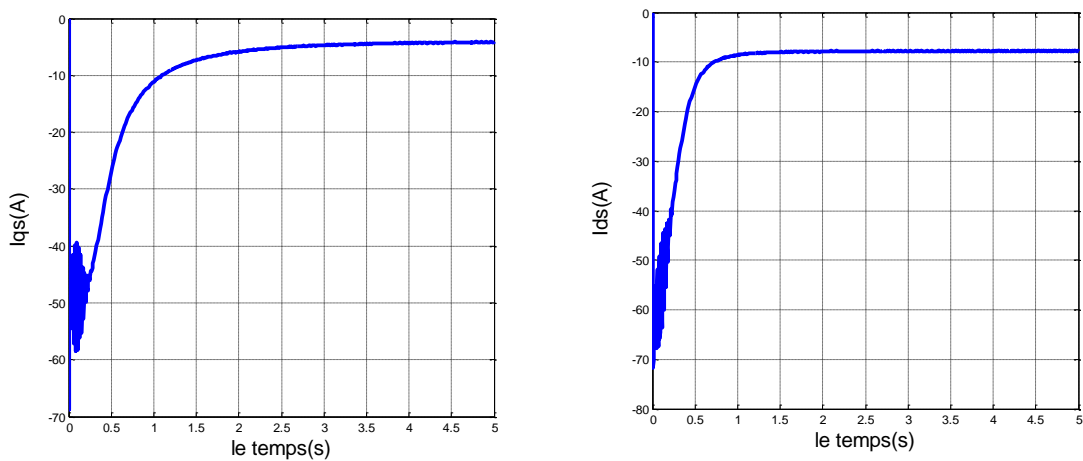


Fig (II.19) : Les courants statoriques de la MADA à vide ($C_r=0$)

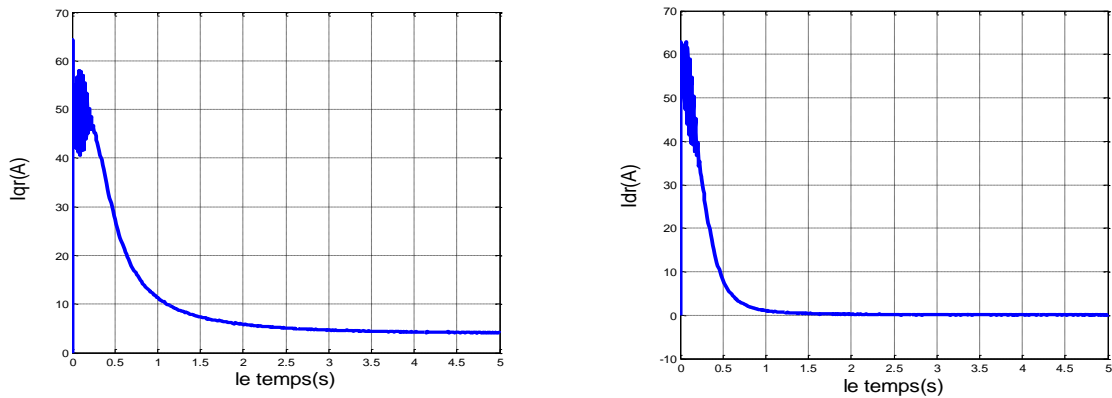


Fig (II.20) : Les courants rotoriques de la MADA à vide ($C_r=0$)

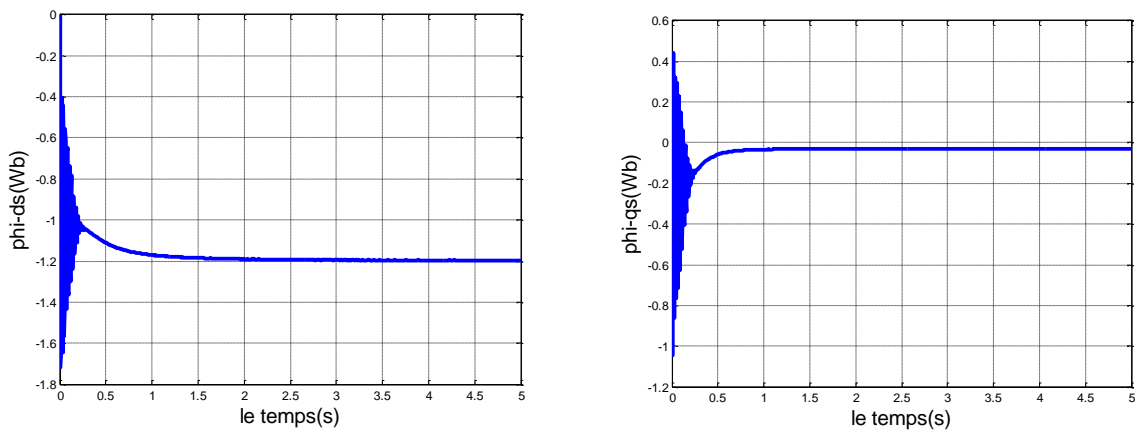


Fig (II.21) : Les flux statoriques de la MADA à vide ($C_r=0$)

en charge :

➤ Si on applique à l'instant $t=3s$ un couple résistant ($C_r = 3Nm$) on obtient les figures suivantes :

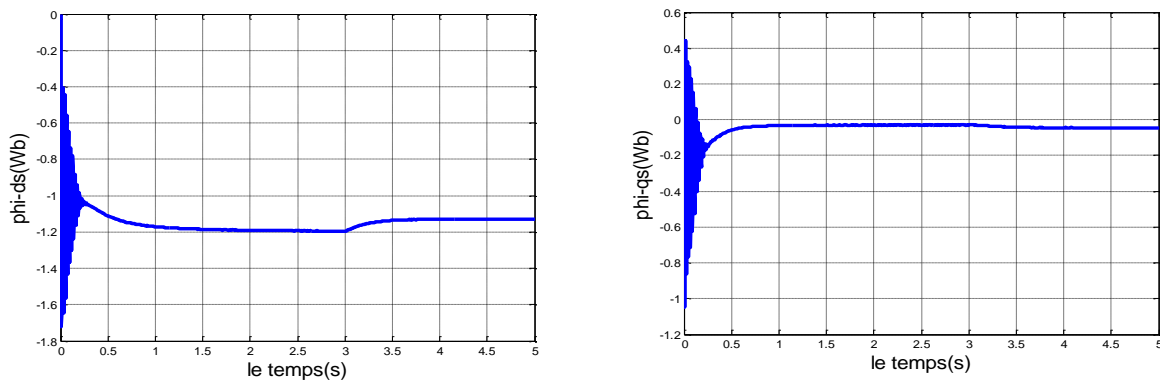


Fig (II.22) : Les flux statoriques de la MADA en charge

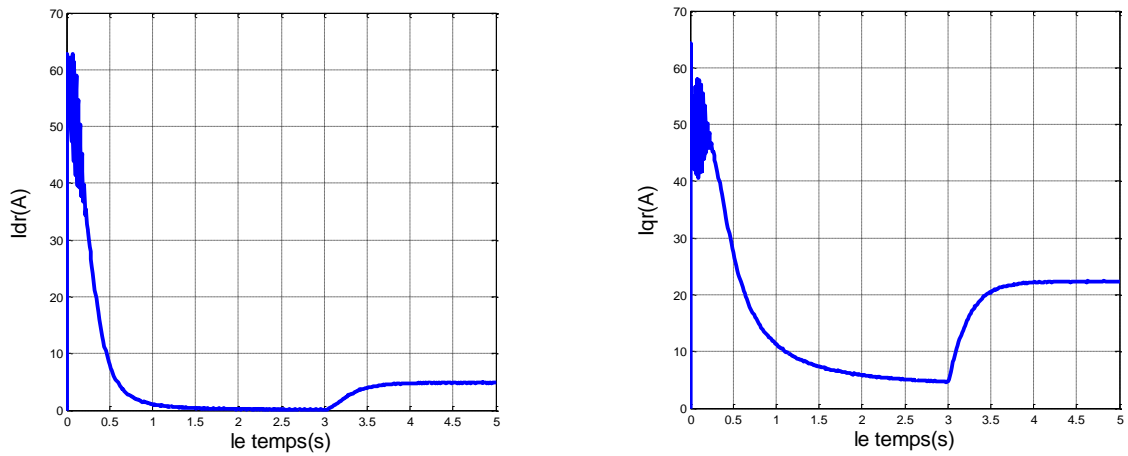


Fig (II.23) : Les courants rotoriques de la MADA en charge

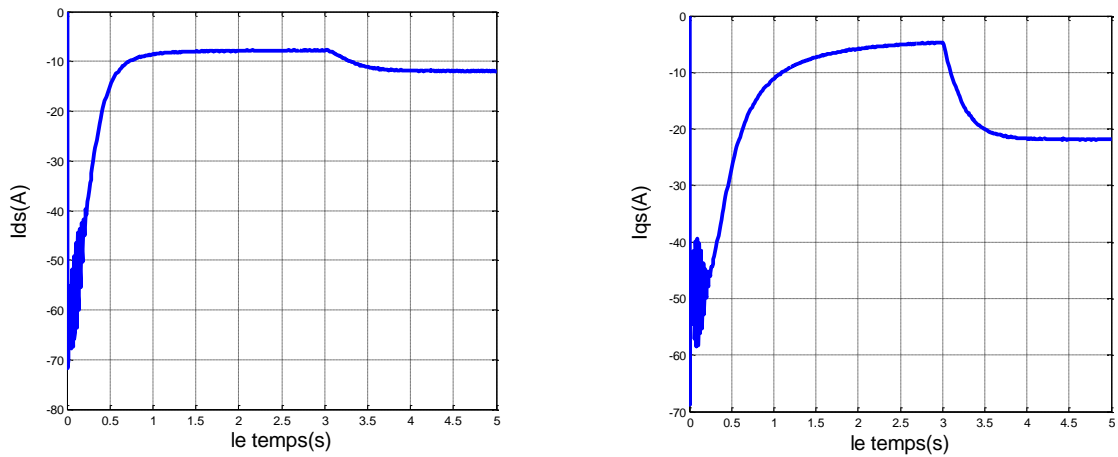


Fig (II.24) Les courants statoriques de la MADA en charge

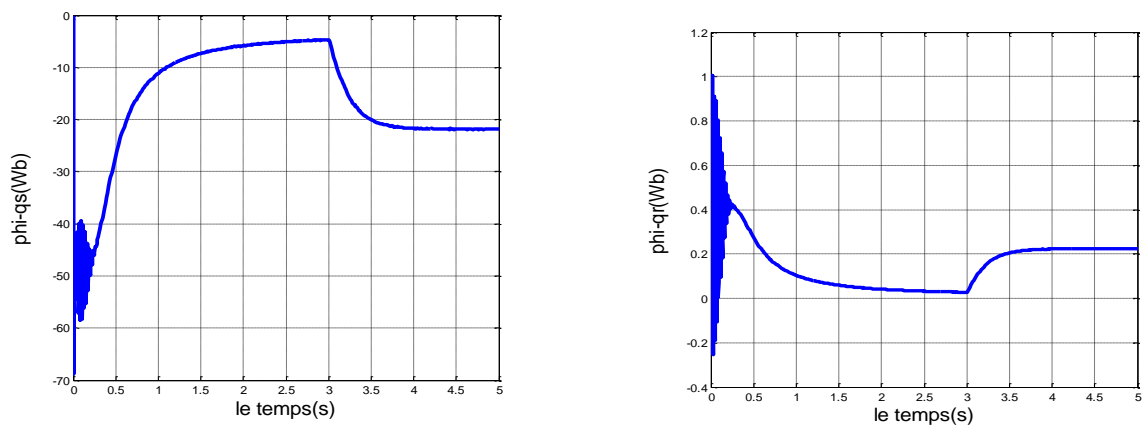


Fig (II.25) : Les flux rotoriques de la MADA en charge

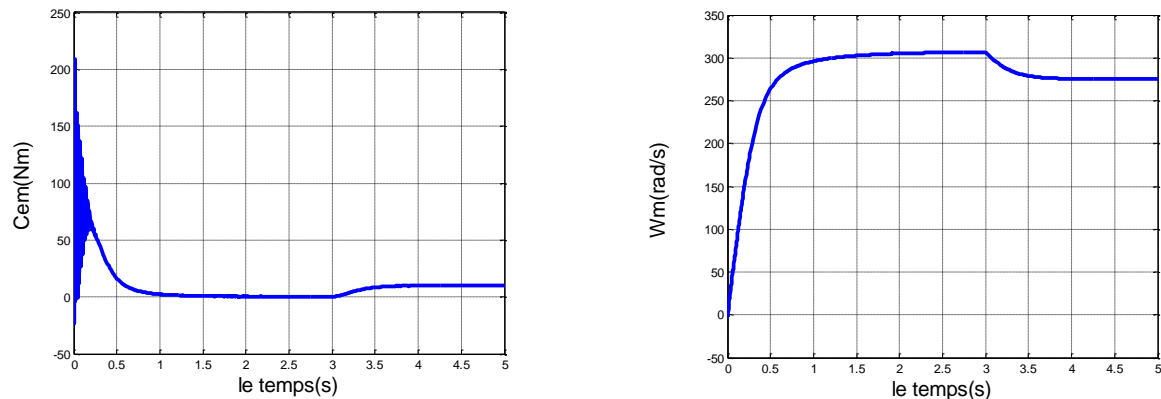


Fig (II.26) : Le couple électromécanique et La vitesse de rotation

II.12.2. Interprétations des résultats :

On remarque que toutes les grandeurs de la machine passent par un régime transitoire oscillant puis ils atteignent le régime permanent. A vide la vitesse du rotor est proche de la vitesse de synchronisme (faible glissement). L'application d'un couple résistant, après l'établissement du régime permanent, provoque une diminution de la vitesse traduite par un glissement supplémentaire. Le couple électromagnétique répond au couple résistant ainsi que les courants de phase.

Il est bien clair que ces relevés correspondent bien à un fonctionnement normal d'une machine asynchrone classique, ce qui confirme la validité du modèle mathématique.

II.12.3. Résultat de simulation de la MADA (moteur) alimenté par deux sources de tension :

Les résultats montrés sur les figures ci-dessous sont ceux obtenus pour le modèle précédent de la MADA avec l'exception de l'alimentation du rotor par des tensions triphasées avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à 10Hz.

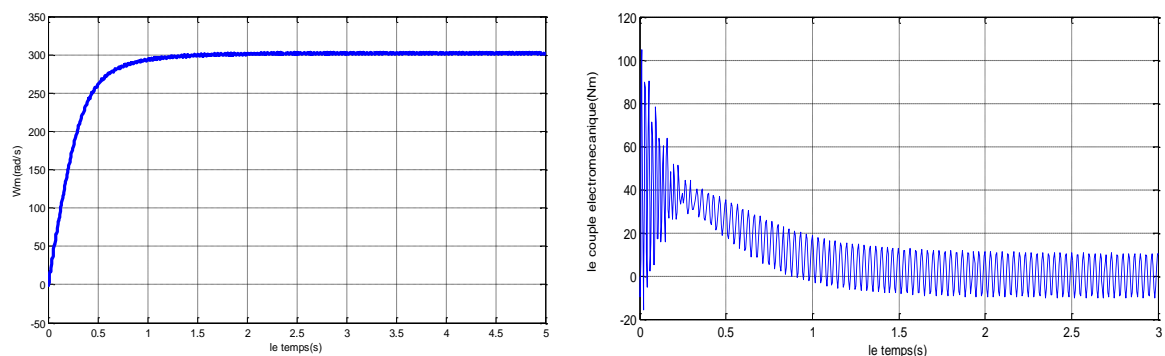


Fig (II.27) : Vitesse de rotation et le couple électromécanique de la MADA alimentée par deux sources de tension (rotorique et statorique).

Nous remarquons que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est oscillatoire, oscille autour d'une valeur qui correspond à la valeur du couple résistant de la machine. Nous constatons aussi l'importance des courants statoriques et rotoriques pendant le démarrage, puis ils se stabilisent et prennent leurs formes sinusoïdales après l'établissement du régime permanent.

II.12.4. Résultat de simulation de la GADA (génératrice) alimenté par deux sources de tension :

Le modèle de la MADA sous SIMULINK est représenté comme suit :

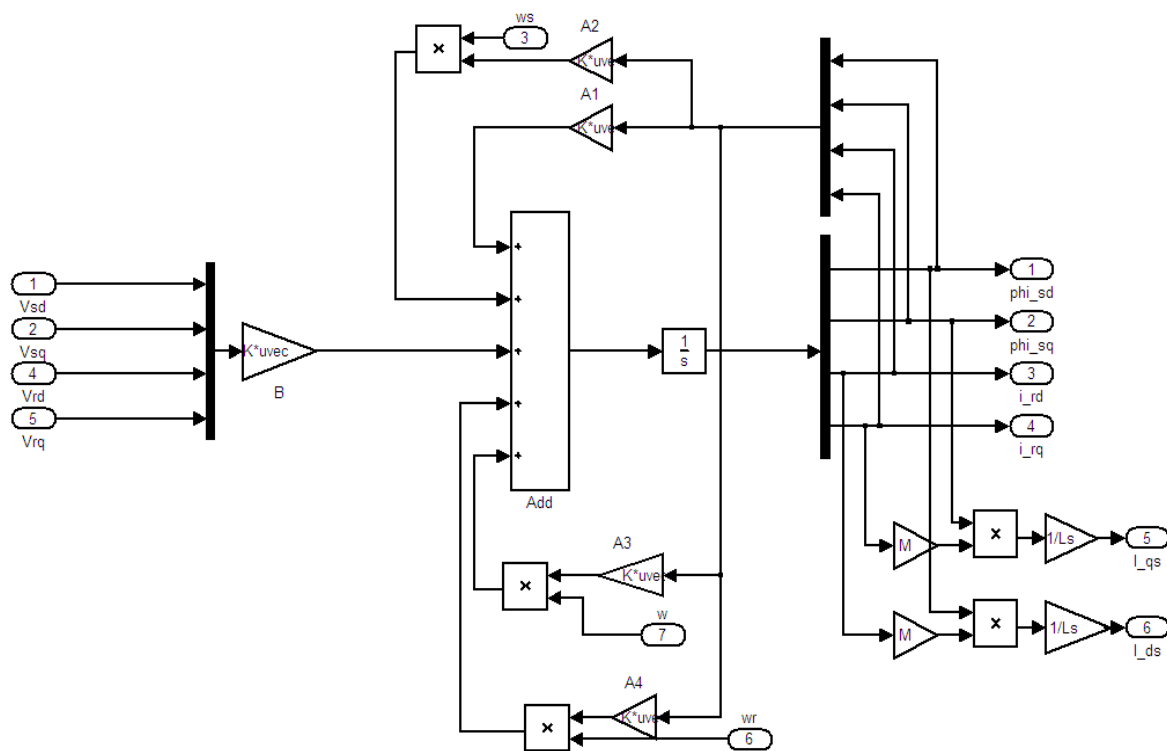
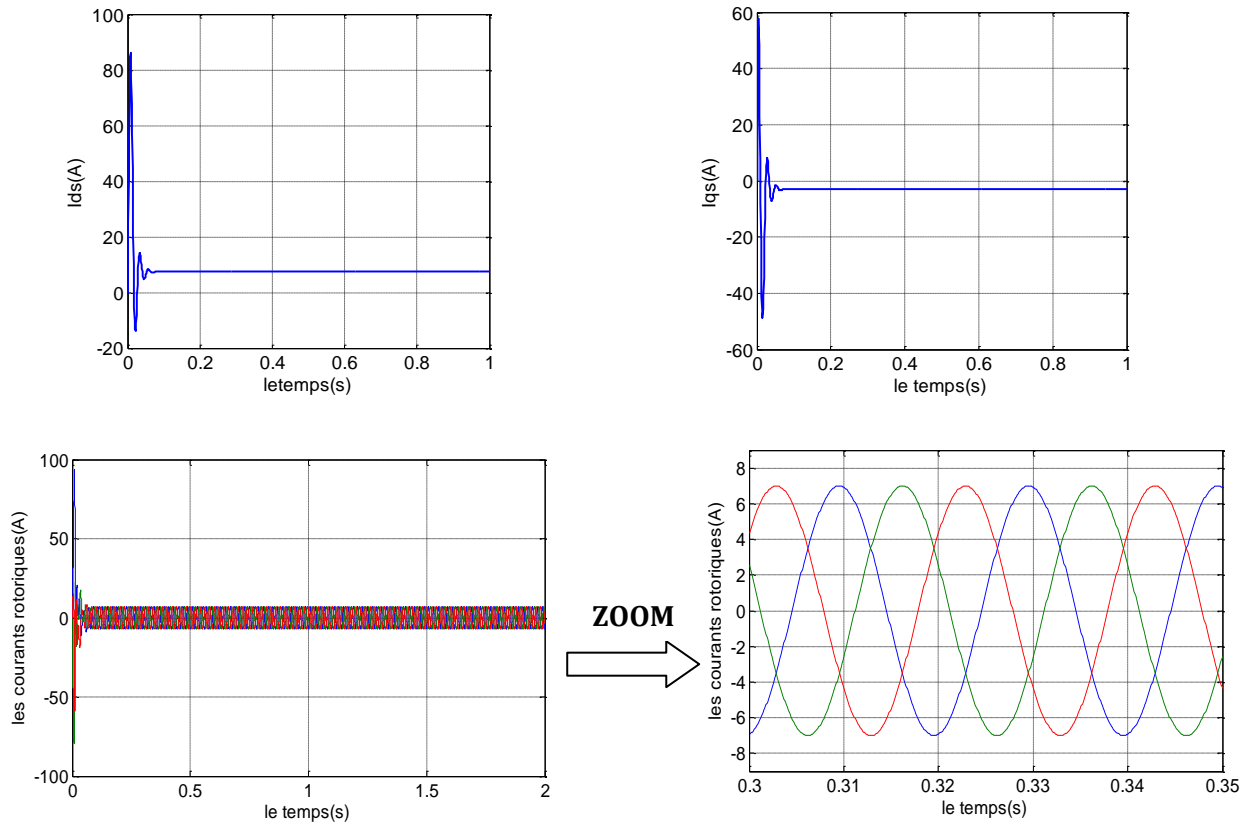
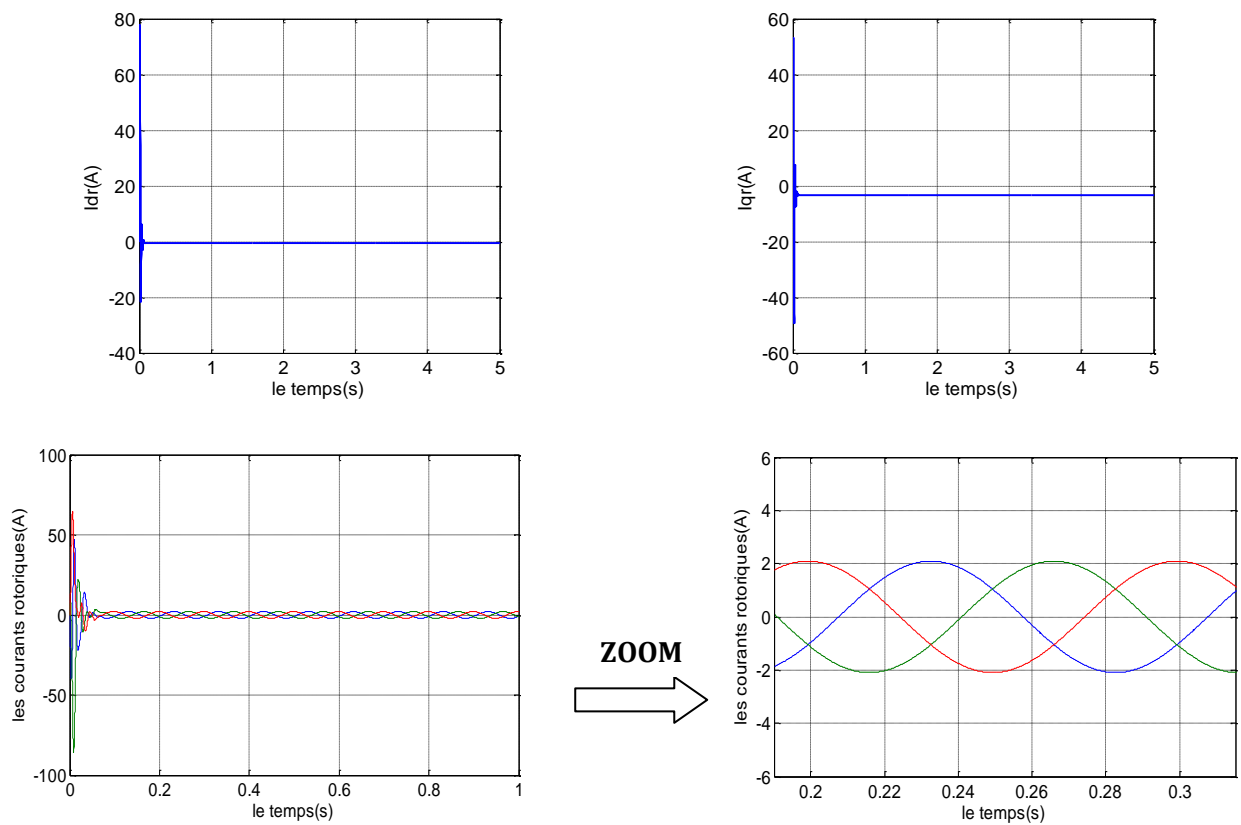


Fig.II.28 : Schéma bloc de la GADA

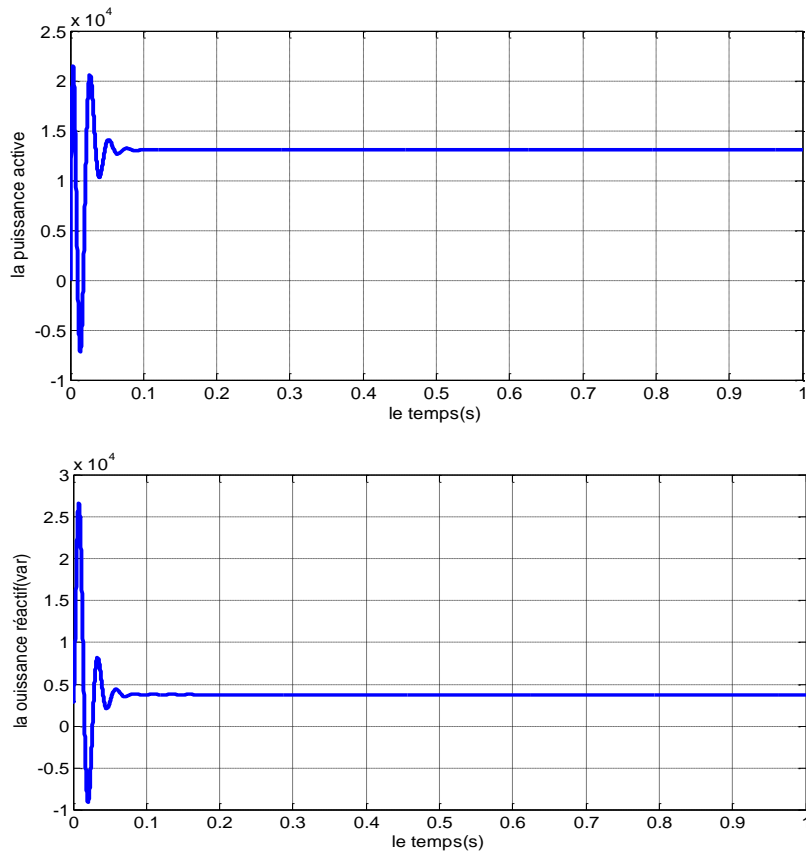
Les figures ci dessous sont ceux obtenus pour le modèle de GADA (génératrice), entraînée à une vitesse fixe égale à 1425 tr/min, alimentée directement par deux sources de tension triphasée parfait. L'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est 50Hz et d'amplitude de 220V, et l'autre au niveau du rotor avec une amplitude de 12V et une fréquence égale à la fréquence rotorique $f_r=10\text{Hz}$.



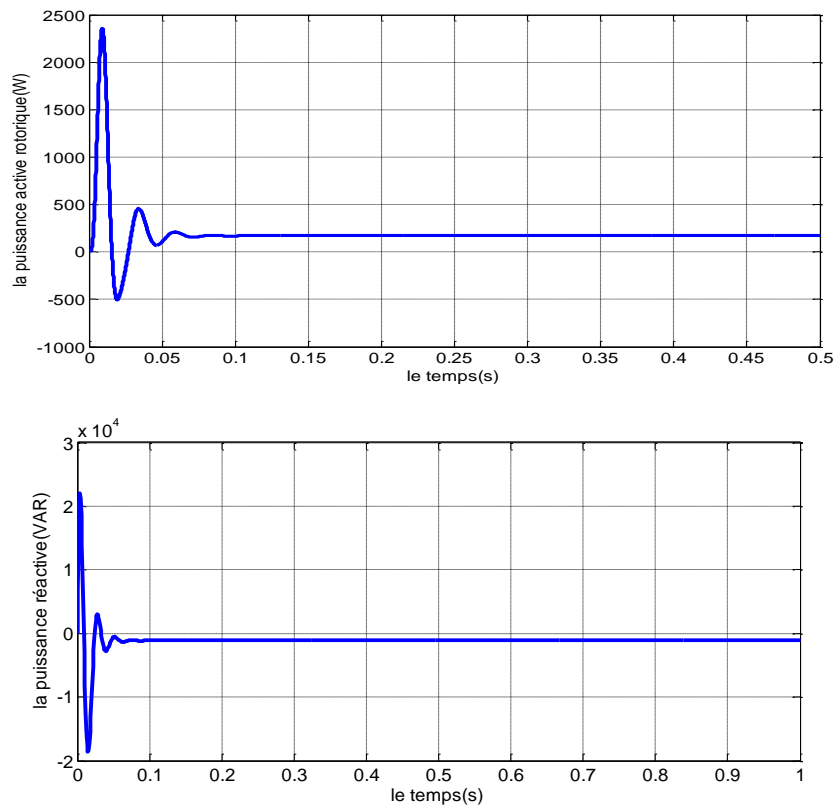
Fig(II.29) : Les courants statoriques de la GADA



Fig(II.30) : Les courants rotoriques de la GADA



Fig(II.31) : la puissance active et réactive statorique de la GADA



Fig(II.32) : la puissance active et réactive rotorique de la GADA

II.13.CONCLISION :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes structures de la machine asynchrone à double alimentation. Afin de mieux comprendre les avantages que peut procurer cette machine par rapport aux structures classiques, nous avons étudié les possibilités en fonctionnement moteur et génératrice.

Après avoir illustré les avantages et les inconvénients de la MADA, nous avons cité les domaines d'application, où cette machine représente la solution la plus convenable, pour les deux modes de fonctionnement (moteur et génératrice).

En suite nous avons présenté la modélisation et la simulation de la MADA pour les deux modes de fonctionnement: moteur et génératrice qui fait l'objet de notre travail.



CHAPITRE III :

Modélisation de l'association AC/DC/AC

III.1.INTRODUCTION :

Dans ce chapitre, nous étudions l'association des convertisseurs AC/DC/AC triphasé. Cette association constitue une alimentation réelle de notre machine, pour cela Nous utilisons un redresseur avec onduleur MLI qui fait l'objet de ce chapitre [15] :

III.2. PARAMETRE DE PERFORMANCE DE SIGNAL PERIODIQUE :

Les sorties d'un onduleur (tension, courant) contiennent certaines harmoniques, et la qualité de l'énergie fournit par un onduleur est évaluée suivant les paramètres de performance suivant [16]:

III.2.1 Facteur de la n^{ième} harmonique H_{fn} :

C'est la mesure de la contribution individuelle des harmoniques définit comme suit :

$$H_{fn} = \frac{V_{effn}}{V_{eff1}} \quad (\text{III.1})$$

- V_{effn} : Valeur efficace de la n^{ième} harmonique.
- V_{eff1} : Valeur efficace de la fondamentale.

III.2.2 Distorsion d'harmonique total THD :

Le taux de distorsion, encore appelé distorsion harmonique totale est défini par le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale. Le THD représente sensiblement l'augmentation de l'effet Joule dans les lignes et les dispositifs, Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension [16].

$$THD = \frac{\sqrt{H_2^2 + H_3^2 + \dots}}{F_1} \quad (\text{III.2})$$

F_1 : la valeur efficace de la composante fondamentale.

III.3.MODELISATION DES CONVERTISSEURS AC/DC/AC :

III.3.1.Modélisation de convertisseur DC/AC (onduleur):

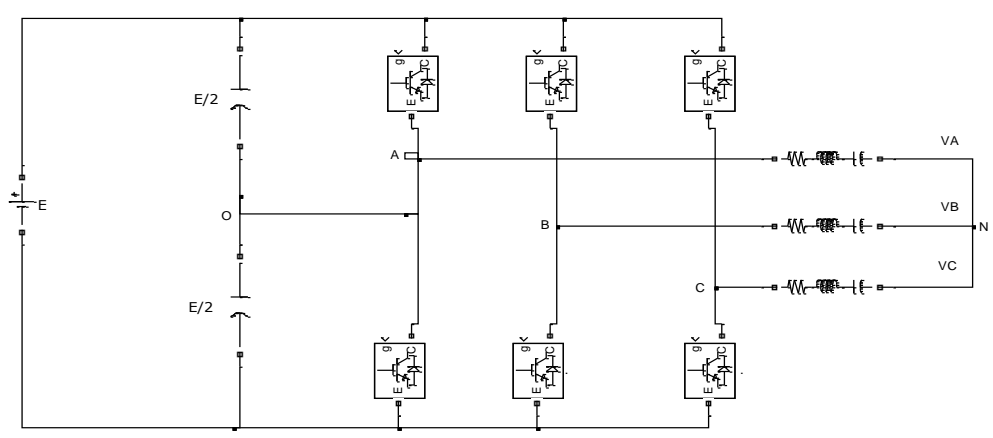
Onduleur triphasé:

L'onduleur est un convertisseur statique permettant la transformation d'une tension continue en une ou des tensions alternatives, il est tributaire des caractéristiques de la source continue et de la charge entre lesquelles il est inséré.

Les six interrupteurs électroniques représentés, et que nous supposons parfaits, peuvent être des transistors (Bipolaires, MOSFET, IGBT) associés à des diodes en tête bêche, ou encore des thyristors équipés de circuit d'extinction en plus du dispositif d'amorçage.[15]

Afin d'éviter le court circuit de la source de tension continue, les commandes des interrupteurs d'un même bras doivent être complémentaire. Pour simplifier l'étude nous supposons que le couplage est du type étoile sans neutre (bien que le branchement d'une charge en triangle soit envisageable). Ainsi les harmoniques de rang trois et multiples de trois sont éliminées, et le système triphasé obtenu à la sortie de l'onduleur est un système triphasé équilibré en tension ne contenant que les harmoniques impairs différents de trois.

Le schéma de l'onduleur de tension présenté par la figure suivante :



FigIII.1 : Schéma de l'onduleur de tension

L'onduleur alimenté par une source de tension parfaite impose à sa sortie, grâce au jeu d'ouverture et de fermeture des interrupteurs, une tension alternative formée d'une succession de créneaux rectangulaires, la période de fonctionnement étant fixée par la commande des interrupteurs.[15]

Les équations de tension simples appliquées aux trois phases sont :

• **Au niveau de rotor :**

$$\left\{ \begin{array}{l} V_A = V_{AO} + V_{ON} \\ V_B = V_{BO} + V_{ON} \\ V_C = V_{CO} + V_{ON} \end{array} \right. \quad \text{(III.3)}$$

Par addition on a : $V_A + V_B + V_C = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON}$ (III.4)

sachant que le système des tensions triphasées est symétrique.

donc : $V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0$ (III.5)

D'où : $V_{ON} = \frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO})$ (III.6)

On remplace (III.4) dans (III.1), on aura le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_A = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_B = \frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_C = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{array} \right. \quad \text{(III.7)}$$

On peut écrire le système (III.7) sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad \text{(III.8)}$$

III.3.2. Modélisation du bus continu :

On obtient la tension du bus continu à partir de l'intégration du courant capacitif [15].

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} i_c \quad (\text{III.9})$$

Le courant du condensateur est :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

- i_{red} : courant redressé.
- $i_{ch} = i_{ond}$: courant de charge.

La tension de bus continu est modéliser par :

$$V_{dc} = \int \frac{dV_{dc}}{dt} + V_{dc}(t_0) \quad (\text{III.11})$$

Où :

$V_{dc}(t_0)$: est la valeur de la tension continue à l'instant initial.

III. 3.3.Modélisation de convertisseur AC/DC :

Redresseur triphasé:

Les redresseurs sont les convertisseurs de l'électronique de puissance qui assurent la conversion alternative-continu. Alimentés par une source de tension alternative, ils permettent d'alimenter en courant continu le récepteur branché à leur sortie. [14]

La structure de l'onduleur est réversible par sa conception. Ceci lui permet de fonctionner aussi en redresseur. On adoptera la convention génératrice pour la source de courant et la convention réceptrice pour la source de tension. [14]

La figure (III.2) représente la structure générale du redresseur de courant triphasé à M.L.I. Son rôle est de générer la tension de sortie continue aux bornes des capacités à partir d'une source alternative triphasée.

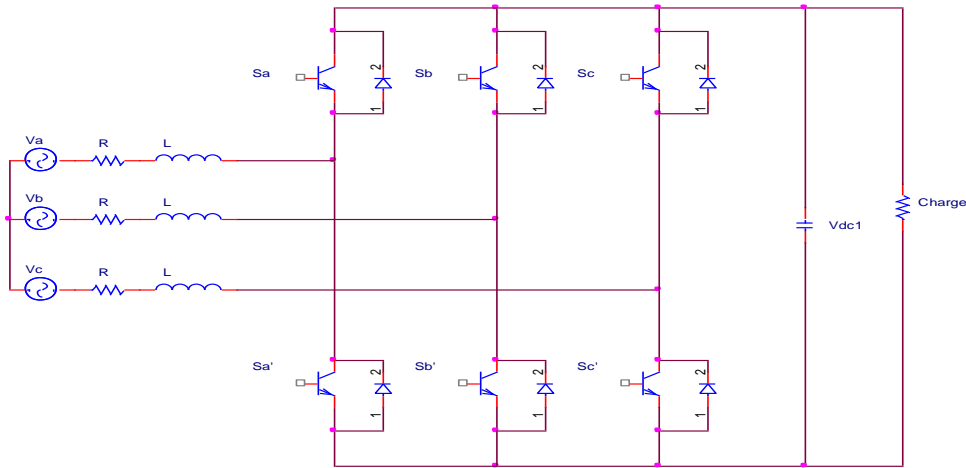


Fig III.2 : Représentation d'un redresseur à MLI

III. 4.COMMANDE PAR MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION (MLI) :

III.4.1.Modulation de largeur d'impulsion «MLI » :

La modulation de largeur d'impulsion est une technique de découplage de tension ou de courant permettant de générer des formes d'ondes quasi sinusoïdales. L'objectif principal de cette technique est de régler l'amplitude et la fréquence du terme fondamental et de rejeter les harmoniques indésirables générées, leurs amplitudes devenant alors négligeables. Chaque bras de pont (FigIII.2) est chargé de générer par modulation de largeur d'impulsion un signal dont le fondamental est le signal de référence.

Les onduleurs de tension sont le plus souvent commandés par la technique MLI, c'est-à-dire, qu'au lieu de former chaque alternance des tensions de sortie d'un seul créneau rectangulaire, ont la forme d'une succession de créneau de largeurs convenables [15]. Cela permet d'obtenir des tensions ne contenant pas d'harmoniques à basses fréquences.

III.4.2.stratégie de commande par MLI triangulo-sinusoidale :

Pour déterminer les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs on fait appel à la technique M.L.I qui consiste à calculer les intersections d'une tension de référence sinusoïdale avec une tension de modulation triangulaire [14].

Les six signaux de références sont donnés par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{aref} = V_m \sin 2\pi f .t \\ V_{bref} = V_m \sin(2\pi f .t - 2\pi / 3) \\ V_{cref} = V_m \sin(2\pi f .t + 2\pi / 3) \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

L'équation de la porteuse est donnée par:

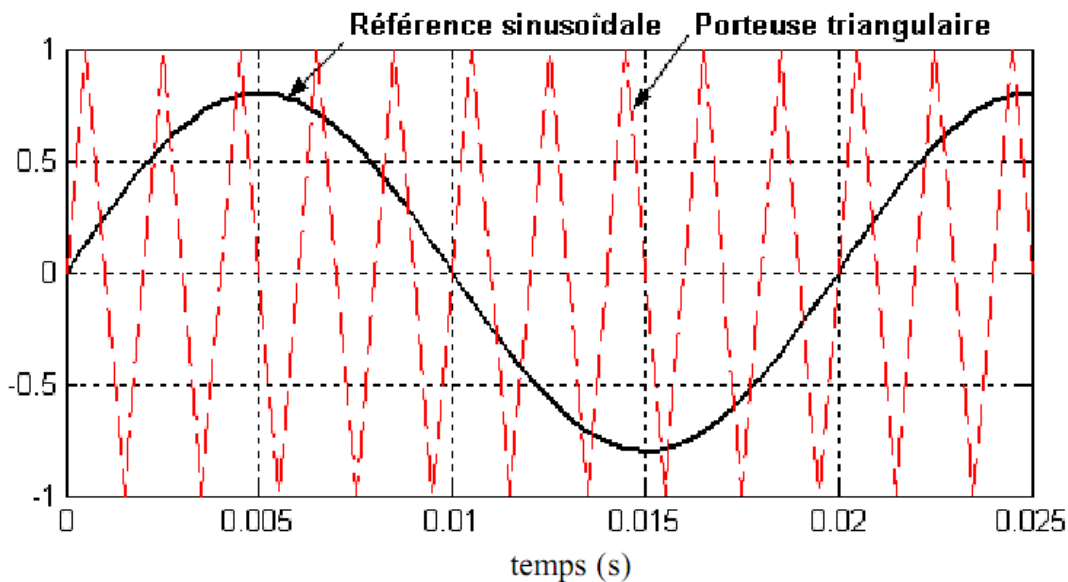
$$V_p = -2 * V_{pm} * \text{asin}(\cos(2 * \pi * f_p * t)) / \pi \quad (\text{III-13})$$

III.4.3.Génération des impulsions de commande :

$$\begin{cases} \text{si } V_{aref} > v_p, S_{a1} = 1; & \text{si non } S_{a1} = 0; \\ \text{si } V_{bref} > v_p, S_{b1} = 1; & \text{si non } S_{b1} = 0; \\ \text{si } V_{cref} > v_p, S_{c1} = 1; & \text{si non } S_{c1} = 0. \end{cases}$$

La commande MLI est caractérisée par les deux paramètres suivants :

- L'indice de modulation "m" égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence ($m = \frac{f_p}{f}$)
- Le coefficient de réglage en tension "r" égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à la valeur crête de l'onde de modulation ($r = \frac{V_m}{V_{pm}}$)



figIII.3.signal de la portuse avec la référence

III.4.4.Simulation de la commande MLI sinus – triangle :

La figure (III.4) représente le modèle Simulink de la commande MLI sinus triangle et la figure (III.5) montre la simulation de la tension de sortie V_{an} pour $r = 0.8$ et $m = 5$ et 21 quand les tensions d'entrées sont triphasées sinusoïdales de fréquence 50Hz et d'amplitude 100V. La simulation montre que l'augmentation de l'indice de modulation rejette les harmoniques de la tension de sortie de l'onduleur vers des fréquences de rangs supérieurs. Ceci diminue d'une part l'effet de ces harmoniques sur les performances de la machine asynchrone et facilite d'autre part leur filtrage. Le choix de l'indice de modulation utilisé dans la commande MLI sinus – triangle dépend aussi du type d'interrupteurs utilisés dans la conception de l'onduleur.

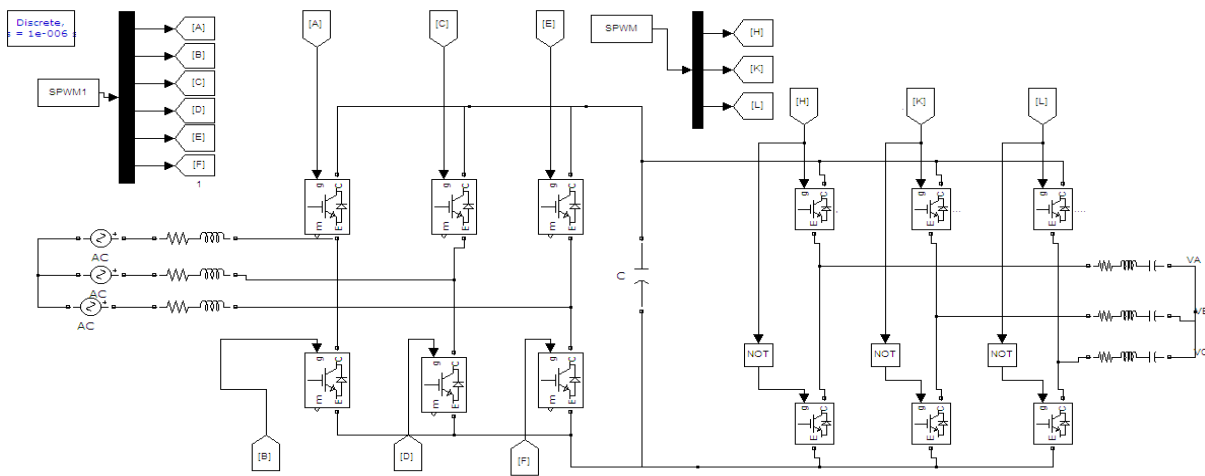
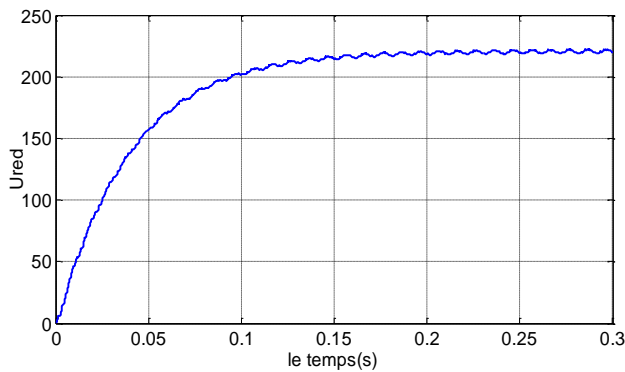
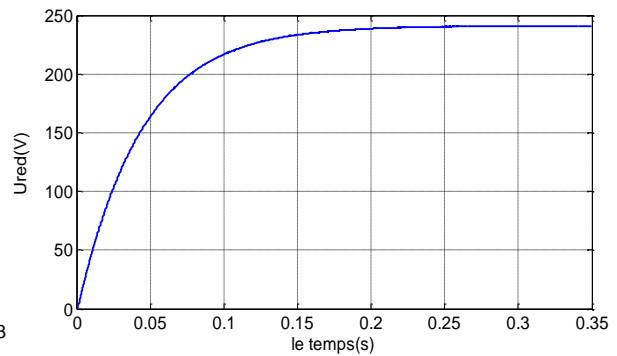


Fig III.4 : le modèle Simulink de la commande MLI sinus triangle

La tension redressée :

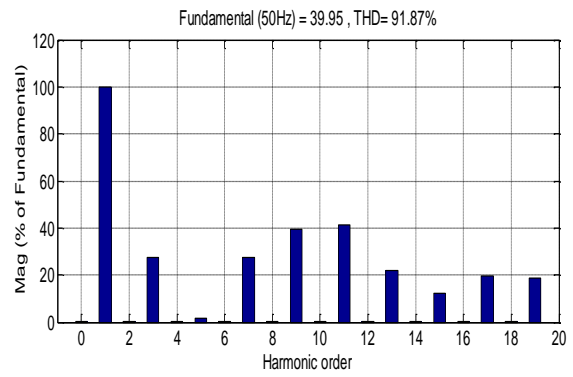
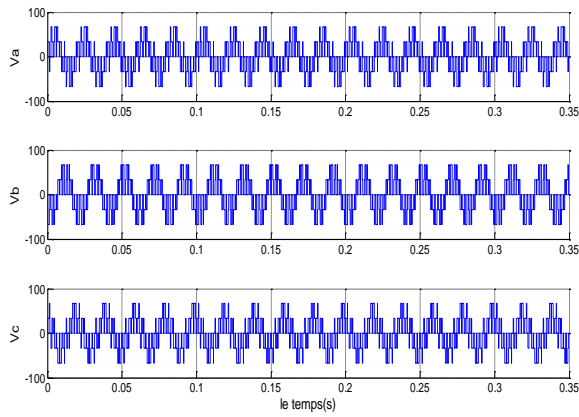


(b) :m=5

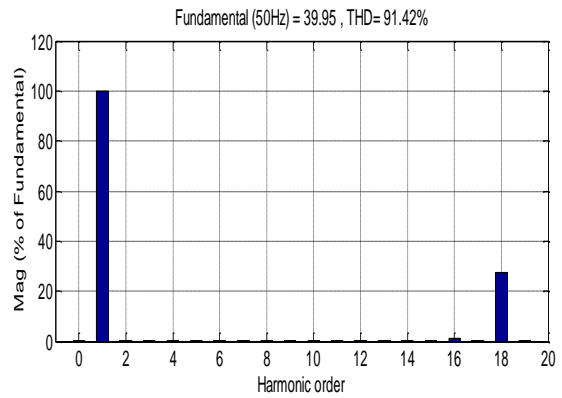
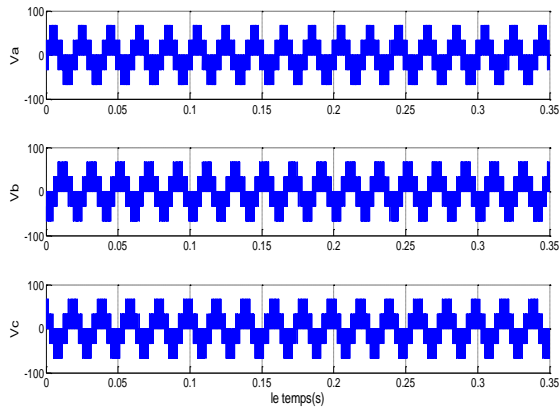


(a) :m=21

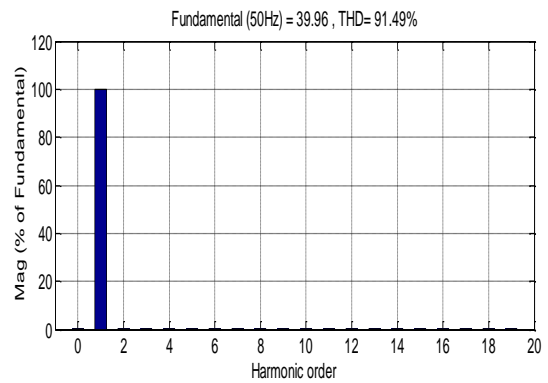
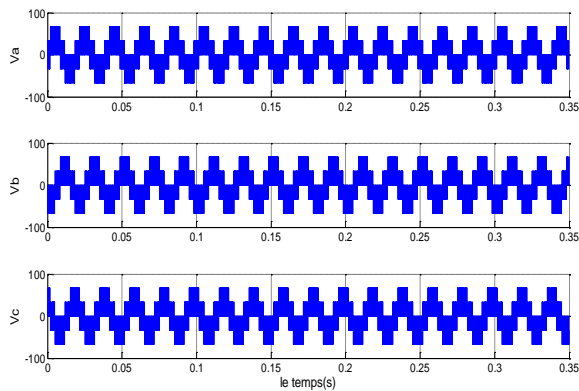
Fig.III.5 : Tension redressée par un redresseur MLI



(a): $m = 5$



(b): $m = 20$



(c): $m = 36$

Fig III.6 : la tension et le spectre d'harmonique pour différent indice de modulation

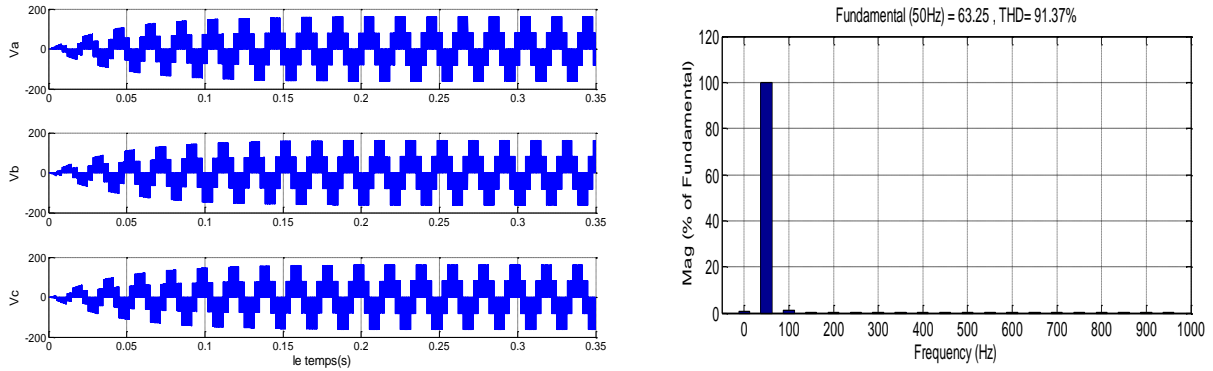


Fig III.7. Commande MLI d'un redresseur ($m=21$) avec un onduleur ($m=36$)
Avec le spectre de tension et $C=20\mu F$

III.4.5. simulation de l'onduleur utilisant la commande décalé:

- Cette commande est une commande élémentaire pour l'onduleur triphasé. Pendant une période de fonctionnement de l'onduleur triphasé, cette commande (décalé) commander les interrupteurs du convertisseur à décalage de 120 ou 180 degré.

La commande de 3 bras :

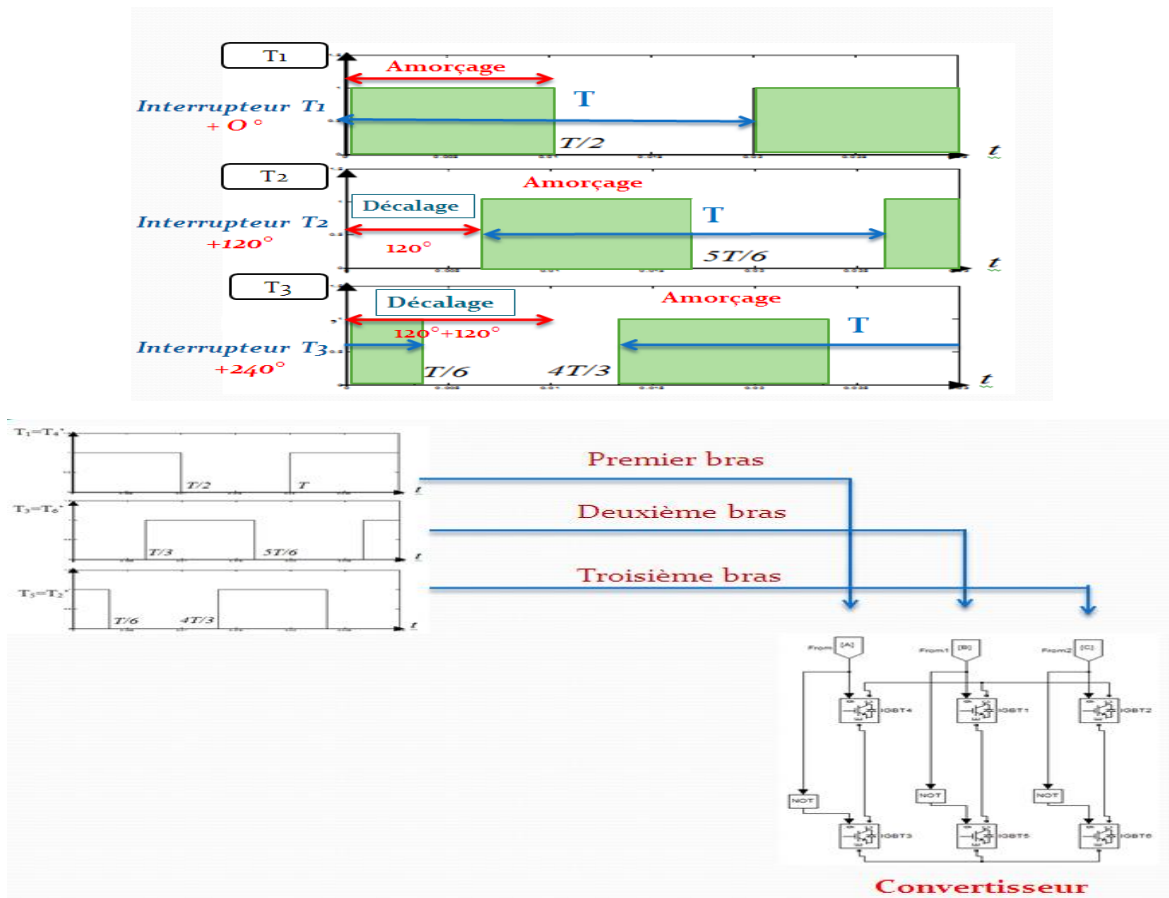
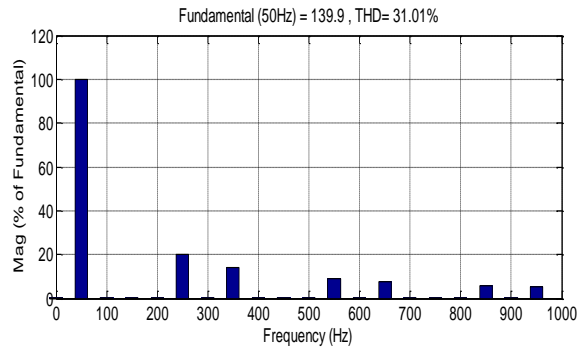
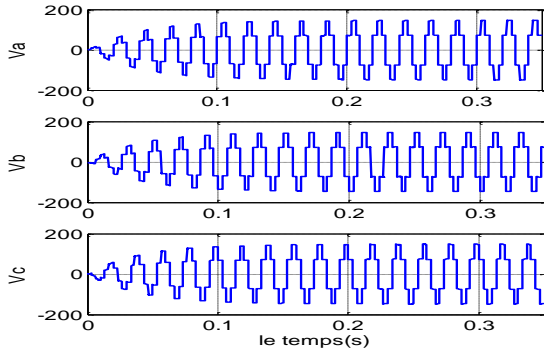
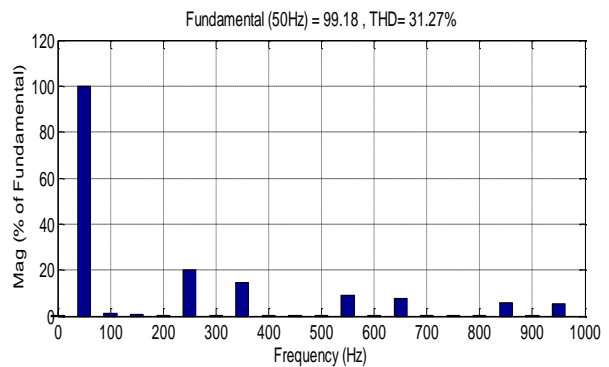
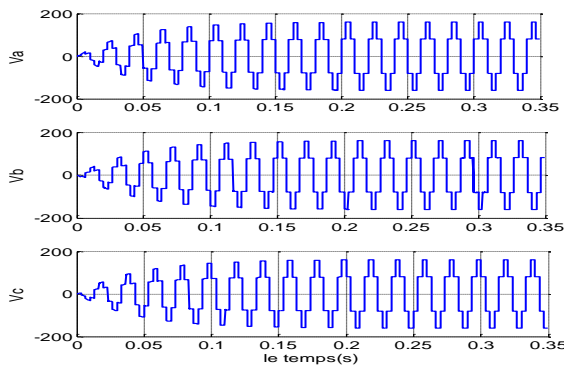


Fig.III.8 : la commande de trois bras

Résultat de simulations :



(a) : $m=5$



(b) : $m=21$

Fig III.9: Commande MLI d'un redresseur +commande décalé d'un onduleur

Interprétation des résultats :

nous remarquons que le signal de la tension de sortie plus proche d'une sinusoïdale, donc moins de THD, ce dernier dépend de l'indice de modulation m . Nous avons appliqué les deux commandes MLI et décalé pour le but de se rapprocher du signal désiré.

Et en fin nous avons vue le THD de la commande décalé est inférieur à celle dans la commande MLI.

III.5.CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons présenté la modélisation et la simulation de l'association AC/DC/AC. Les résultats présentés montrent l'effet de la technique MLI pour l'amélioration de qualité de tension et de l'énergie



CHAPITRE IV :

*L'intégration de l'éolien
aux réseaux
Electriques*

IV.1. INTRODUCTION

Le but de ce chapitre est d'étudier l'impact de l'éolienne à base de MADA associée à la turbine éolienne sur un réseau de distribution. L'architecture d'un réseau électrique sera tout d'abord présentée ainsi que les contraintes en terme de qualité de production que doivent satisfaire toute production connectée sur un réseau de moyenne tension.

IV.2. SYSTEME D'ENERGIE ELECTRIQUE :

Un réseau électrique est un système dynamique complexe qui met en œuvre de nombreux acteurs et possède bien entendu ses propres limites physiques. Il a pour objectif de satisfaire l'alimentation des consommateurs tout en garantissant une qualité de l'énergie électrique, et la sécurité des biens et des personnes. Pour cela il doit être correctement dimensionné et contrôlé[17].

IV.2.1. Architecture du réseau électrique

La plupart des réseaux électriques, qu'ils soient continentaux ou insulaires, ont été conçus pour des raisons techniques et économiques sur une hiérarchie descendante (Fig IV.1) [17]. La description qui suit présente le cas du réseau d'énergie électrique Algérien.

Au sommet de cette hiérarchie se trouvent les systèmes de production dits classiques. Ces systèmes de forte puissance sont principalement des centrales, thermiques et hydroélectriques. Ces producteurs sont centralisés de par leur connexion au réseau de transport maillé à très haute et haute tension : HT (de 400 kV à 63 kV). Ce réseau a une envergure nationale et est dimensionné pour transporter de grande quantité d'énergie électrique sur de grande distance avec un minimum de pertes. Il est connecté aux autres réseaux nationaux. L'exploitation de ce réseau sous forme maillé accroît la sûreté de fonctionnement puisqu'elle permet d'assurer la continuité de service en cas d'incident sur une ligne ou sur une unité de production. Les liens entre les différents niveaux de tension sont assurés par l'intermédiaire de transformateurs.

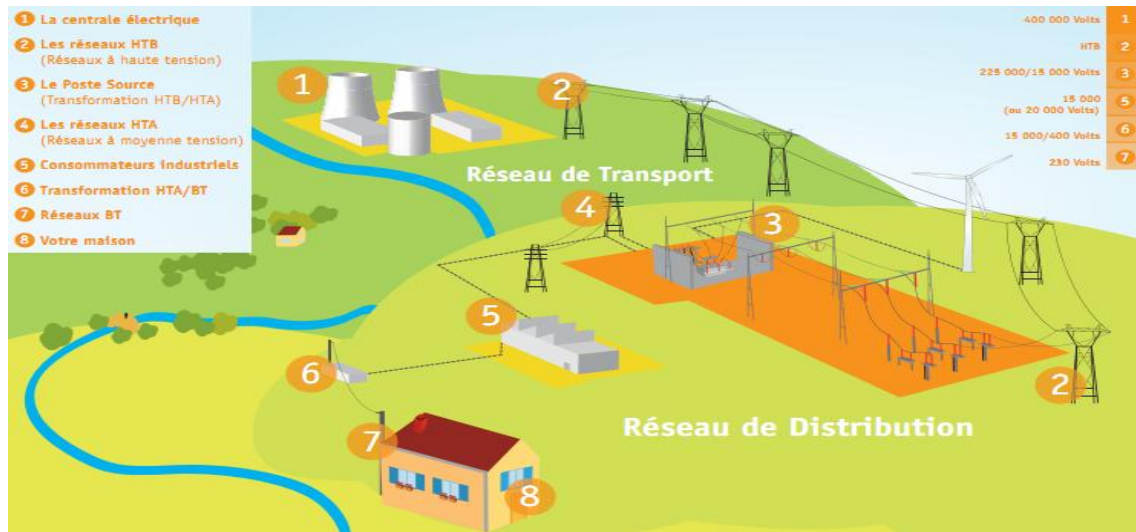


Fig.IV.1: Architecture des réseaux électriques.

L'énergie électrique est ensuite acheminée vers les consommateurs raccordés en basse tension (BT) (380 / 230 V) à travers les réseaux de distribution qui fonctionnent généralement sous une tension de 30 kV (MT). Ces réseaux sont raccordés au réseau de transport via des postes sources et sont principalement exploités sous forme radiale en milieu rural (arborescence) et en coupure d'artère en milieu urbain (boucle ouverte).

IV.2.2. Description d'un parc éolien

Actuellement, les parcs éoliens sont connectés au réseau de distribution à travers un poste source 63/30 kV. La structure d'un parc éolien est donnée dans la Fig.IV.2. Le nombre maximal d'éoliennes constituant un parc est limité par la législation en vigueur qui limite la puissance installée à 12 MW pour un raccordement du parc en 20/15 kV. Le parc éolien est constitué ainsi de 4 à 6 éoliennes de 2 MW chacune. Chaque éolienne produit son électricité en 690 V et dispose d'un Poste De Transformation (PDT) de 0.69/20 kV. Le point commun du parc avec le réseau électrique de distribution est constitué par un Poste De Livraison (PDL).



Fig.IV.2: Schéma de principe du raccordement des éoliennes au réseau.

CHAPITRE IV : l'intégration de l'éolien aux réseaux électriques

Les postes de transformation, dans lequel il y a les transformateurs élévateurs 0.69/30kV, sont situés au pied des éoliennes. Les caractéristiques d'un tel transformateur sont montrées dans le Tableau (IV.1)

Puissance apparente	2.3 MVA
Connexion	Dyn11
Tension primaire	20 kV
Tension secondaire	069 kV
$I_{n_{20kV}}$	66.4 A
P_{cc}	17854 W
U_{cc}	7.85 %

Tableau (IV.1) : Caractéristiques du transformateur.

Les éoliennes sont reliées au PDT, et les PDT entre eux par des câbles triphasés en cuivre de section 3x240 mm². Un câble en aluminium de section 3x240 mm² fait la liaison entre le poste de livraison et le poste source.

Connexion	Niveau de tension	Section	R (Ω/km)	L (mH/km)	C (µf/km)
MM82-PDT	BT (Cu)	240	0.16	0.33	0.36
PDT-PDL	HT (Cu)	240	0.16	0.33	0.36
PDL-PS	HT (Al)	240	0.088	0.316	0.365

Tableau (IV.2) : Caractéristiques des câbles utilisés dans les parcs de Maia Eolis.

La liaison du parc avec le réseau électrique de distribution est constituée par un PDL dans lequel on trouve les appareillages de protection ainsi que le comptage d'énergie. L'objectif principal envisagé pour ce type de raccordement au niveau des services système est de fournir un service de réactif au poste source tout en maintenant la tension à l'intérieur du parc dans les marges admissibles.

IV.2.3. Raccordement des éoliennes au réseau électrique

Une fois l'énergie électrique produite par l'éolienne, elle est transportée aux consommateurs par des réseaux électriques, pour les machines d'une puissance supérieure

à 100 kW, la tension produite à la sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de volts. Il est donc souvent nécessaire de disposer sur le site de production d'un transformateur de puissance élévateur de tension. Celui ci permet de se raccorder aux réseaux de moyennes tensions pour les fermes éoliennes de petites puissances, ou aux réseaux d'interconnexion pour les fermes éoliennes de fortes puissances (fermes éoliennes offshore), où la présence du vent est plus régulière [2].

Avant l'intégration d'un parc éolien dans un réseau électrique, il faut vérifier les conditions de couplage suivantes :

- L'égalité de valeurs maximales de tension, donc de leurs valeurs efficaces ;
- L'égalité de fréquences ;
- Un déphasage nul entre elles ;
- En triphasé, même succession des phases [2].;

IV.3. PARTICIPATION DES EOLIENNES AUX SERVICES-SYSTEME :

Chaque raccordement au réseau, chaque modification dans la structure opérationnelle d'une unité de production provoque un changement plus ou moins important de l'état dynamique du réseau. La planification des réseaux examine et quantifie l'impact de ces changements selon différents critères techniques [18] .

Une production classique raccordée est tenue de participer à deux niveaux :

- Au support de tension, évalué en fonction de la capacité d'injection ou d'absorption de puissance réactive (réglage de tension).
- A l'équilibre production-consommation, évalué en fonction de la capacité d'injection ou d'absorption de puissance active (réglage de fréquence).

La pénétration toujours croissante d'énergie d'origine éolienne va pousser ces générateurs à contribuer à ces services-système, en participant au support de tension et à l'équilibre production-consommation.

Ces nouvelles dispositions remettent en cause le principe de base des générateurs éoliens, à savoir extraire le maximum de puissance : une réserve de puissance active passe par une dégradation du rendement du système.

Cette étude s'intéresse désormais aux possibilités offertes par les trois structures éoliennes en termes de participation au réglage de tension et au réglage de fréquence.

IV.3.1 Participation au réglage de tension

Réglage de tension :

Le réglage de tension est organisé hiérarchiquement en trois niveaux de réglage :

- Réglage primaire de tension (réglage de tension aux nœuds de raccordement des producteurs).
- Réglage secondaire de tension (réglage de tension en diverses zones du réseau en modifiant certaines puissances réactives de consignes de groupes)[18].
- Réglage tertiaire de tension (réglage optimisant le dispatching des puissances réactives suivant des critères économiques).

Le réglage primaire de tension est en général un service-système obligatoire pour toutes les unités de production, par ajustement de niveau de puissance réactive absorbée ou fournie. L'action consiste à régler l'excitation des productions classiques (Fig.IV .3) :

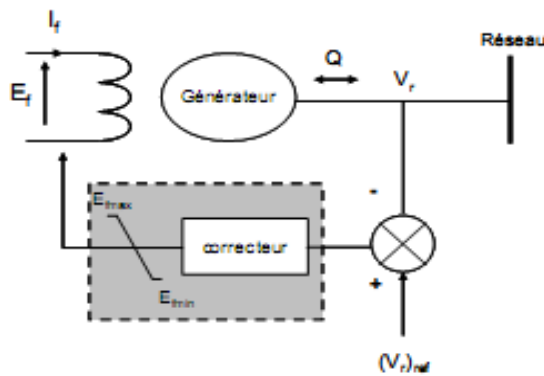


Fig.IV .3 : Réglage primaire de tension

IV.3.2. Participation des éoliennes au réglage de la tension

La stratégie d'action consiste à utiliser les possibilités offertes par l'interface d'électronique de puissance pour les structures à vitesse variable et par le contrôle associé. On s'intéresse ici seulement au réglage primaire de tension pour les éoliennes, par contrôle de l'énergie réactive échangée avec le réseau. La structure MAS est d'ors et déjà écartée puisque aucun moyen de réglage de puissance réactive n'est présent dans ce cas-là.

La présence d'un onduleur de tension connecté au réseau pour les structures MADA et MS permet de contrôler l'énergie réactive échangée en jouant sur la composante réactive du courant (Fig.IV.4). En effet, avec le choix du référentiel, la puissance réactive est directement proportionnelle à la composante réactive I_{ondq} du courant dans le référentiel de la commande de l'onduleur.

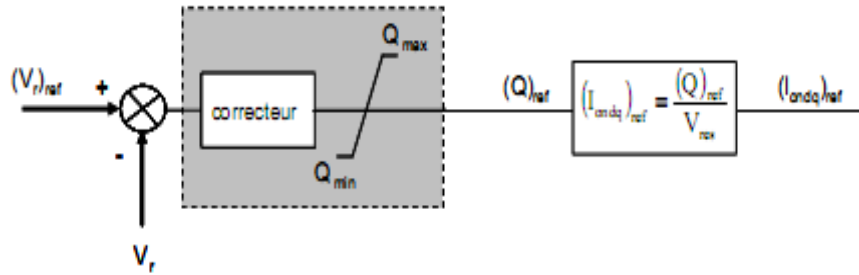


Fig IV.4 : Réglage de tension par l'onduleur coté réseau

IV.3.3. Participation au réglage de fréquence

IV.3.3.1. Contrôle de la fréquence

L'un des objectifs majeurs du contrôle des systèmes de puissance est de maintenir l'équilibre entre la puissance électrique produite par les unités de production et la puissance consommée par les charges, et ce à tout instant. En fonctionnement normal, la fréquence est homogène sur l'ensemble du réseau. En cas d'évolutions (des charges ou des générateurs), pour ajuster la production à la demande, il convient de régler la fréquence. Celle-ci est organisée hiérarchiquement en trois niveaux de réglage, échelonnés dans le temps : le réglage primaire, le réglage secondaire, le réglage tertiaire (Fig IV.5).

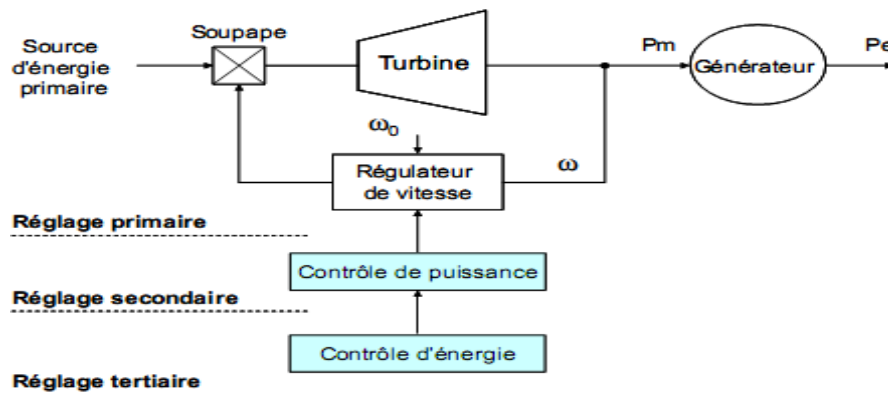


Fig IV.5: Réglage hiérarchique de fréquence

Le réglage primaire (quelques secondes) est un réglage automatique. Il permet d'arriver rapidement à un nouvel équilibre production/consommation. Chaque groupe ajuste sa production en fonction de ses capacités. Le nouveau point de fonctionnement n'est plus nécessairement à la fréquence $f_0 = 50$ Hz. Ce réglage est obligatoire pour tous les groupes de production classiques

Le réglage secondaire (quelques minutes) est un réglage automatique ou manuel. Il permet de rétablir la fréquence à la valeur de 50 Hz, et de maintenir les échanges de puissance entre les réseaux interconnectés, en conformité avec les programmes convenus. Le nombre de producteurs participant à ce réglage est plus faible que ceux prenant part au réglage primaire, même si un même générateur peut participer aux deux réglages.

Le réglage tertiaire (quelques dizaines de minutes) est un réglage manuel. Il permet d'adapter le plan de production à la situation réelle, et de répartir la réserve tournante entre les différents moyens de production. Cette réserve est la puissance quasi-instantanée mobilisable, en supplément de la prévision de consommation moyenne. La répartition de cette réserve est basée sur des critères économiques et techniques.

Le problème de détection de la variation de fréquence ne se pose pas. En effet, les génératrices synchrones étant directement couplées au réseau, une variation de fréquence entraîne une variation de vitesse : la détection est donc naturelle.

IV.3.3.2. Réglage de la fréquence et contrôle de la puissance active :

Le contrôle de la puissance active produite par les groupes de production est lié au réglage de la fréquence du réseau. Cette fréquence doit être maintenue à l'intérieur de certaines limites afin de respecter les conditions techniques de fonctionnement du réseau [19].

La Figure ci dessous présente le principe du contrôle de la puissance active au niveau d'une turbine classique. La puissance fournie par la turbine se présente sous la forme du couple mécanique produit en sortie de la turbine et de sa vitesse de rotation, liée à la fréquence des grandeurs électriques du réseau. La puissance demandée par le réseau se présente sous la forme du couple électromagnétique au niveau du générateur et de la vitesse de rotation de ce générateur liée également à la fréquence du réseau [19].

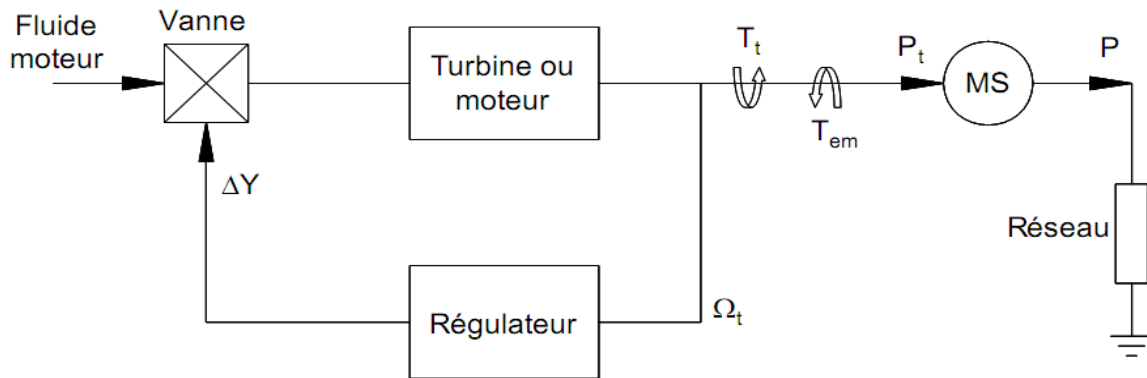


Fig IV.6 : principe du contrôle de la puissance mécanique

Tout changement dans la consommation est vu par le système comme une variation au niveau du couple électromagnétique et toute variation de la production est observée comme une variation du couple mécanique. Pour conserver l'équilibre et ainsi une fréquence constante dans le réseau, la production doit s'adapter à tout moment aux variations de la consommation. Si la consommation excède la production, le système est en déséquilibre, la vitesse des machines et, par voie de conséquence, la fréquence du réseau baisse[19]. A contrario, si c'est l'offre qui est supérieure à la demande, le système voit les groupes accélérer et la fréquence augmenter. On observe cela plus clairement dans l'équation suivante :

$$\sum_{i=1}^n J_i \cdot \frac{d\Omega_t}{dt} = T_a = T_t - T_e \quad (\text{IV.1})$$

Où : J_i : Inertie de chaque groupe de production

T_a : Couple d'accélération

T_t : Couple mécanique de la turbine ou moteur

T_e : Couple électromagnétique

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine ou moteur

ΔY : Variation de la position de la vanne

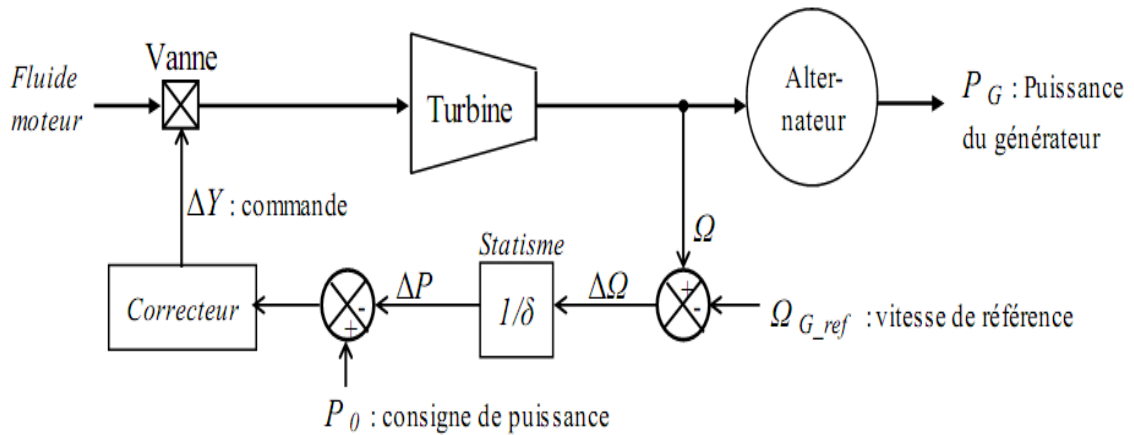


Fig IV.7 : Intégration d'un statisme dans une boucle de régulation de vitesse

IV.4.LES PRINCIPAUX TYPES DE DEFAUTS DANS LES RESEAUX ELECTRIQUE :

Tout défaut engendre Un creux de tension étant la répercussion de ce défaut sur la tension. Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture à une valeur inférieure à une valeur de seuil (comprise entre 10 et 90 % de la tension contractuelle U_c), suivie de son rétablissement après un court instant [8].

L'amplitude du creux de tension est conditionnée par la structure du réseau, notamment la puissance de court-circuit et la distance entre le point de défaut et le point ou est situé l'utilisateur sur réseau. Ainsi, plus la puissance de court circuit en amont de l'utilisateur est élevée ou plus le défaut est éloigné du point de raccordement de l'utilisateur, moins l'amplitude du creux de tension ressentie est importante, ou plus la profondeur est faible (fig. IV.8) [8].

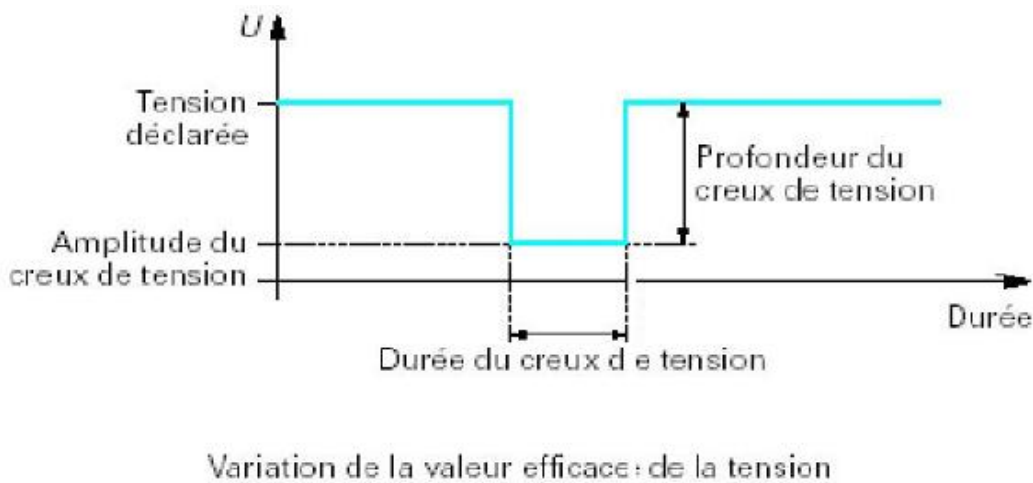


Fig. IV.8 : Caractérisation du creux de tension

IV.4.1. Classification des creux de tension

Lorsqu'un défaut a dans un point du réseau, le calcul des tensions au niveau de la génératrice devient délicat. Le système triphasé de tension qui en résulte peut être l'un des six représentés à la figure suivante :

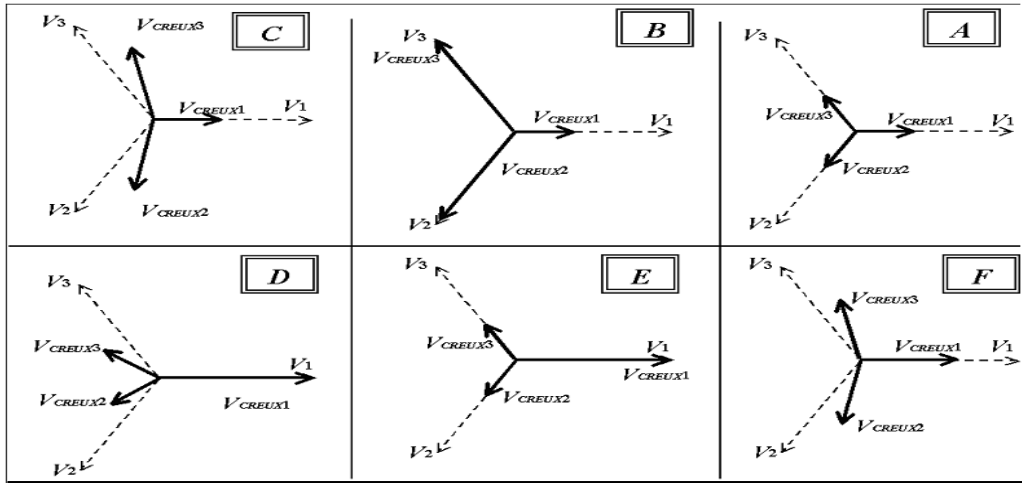


Fig. IV.9 : Classification des creux de tension (avant défaut en pointillé)

Les principaux types de creux de tensions sont les suivants:

- Creux de tension de type A appelé creux de tension triphasé équilibré ;
- Creux de tension de type B appelé creux de tension monophasé ;
- Creux de tension de type C creux de tension biphasé avec saut de phase.

IV.4.2.Types de réseaux

Il existe deux types de réseau:

IV.4.2.1.Les réseaux de transport et de répartition en régime « bouclé »

Les réseaux de transport fonctionnent en système maillé ont le neutre mis à la terre. Le principe de détection des défauts est basé essentiellement sur la mesure de l'impédance, donc de la distance, ce qui permet d'assurer une sélectivité de déclenchement des disjoncteurs en fonction de la forme et de la localisation du défaut [8]. Le système de protection vise:

- pour chaque forme et position de défaut, à limiter le nombre de disjoncteurs à ouvrir. Notons que pour les réseaux à très haute tension, les défauts étant essentiellement entre une phase et la terre, les ouvertures de disjoncteurs sont limitées à la phase atteinte par le défaut;

- à tenter, chaque fois que ce la est possible, une remise automatique en service afin de limiter l'impact sur la clientèle des coupures pouvant résulter des déclenchements.

La fig.IV.10 montre une portion d'un réseau maillé.

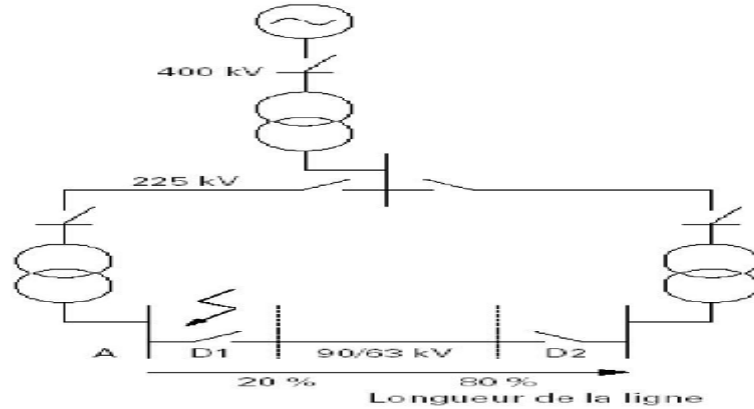


Fig. IV.10 : Exemple d'un réseau maillé (HTB >50kV)

IV.4.2.2. Les réseaux de distribution radiale

Les réseaux MT fonctionnent en système radial et ont le neutre aujourd'hui mis à la terre par l'intermédiaire d'une impédance de limitation du courant de défaut. Le principe de détection des défauts est basé essentiellement sur la mesure du courant. De plus, le nombre de défauts atteignant plusieurs phases étant relativement important, les déclenchements sont toujours triphasés. La reprise automatique du service utilise un dispositif de réenclenchement triphasé. Après un premier déclenchement, trois tentatives de réenclenchement sont effectuées: la première, au terme d'une temporisation courte (quelques centaines de ms) et les deux suivantes avec des temporisations plus longues (plusieurs dizaines de secondes).

En conséquence, pendant un cycle d'élimination d'un défaut, un utilisateur raccordé en moyenne tension (MT) sur un départ voisin du départ aérien en défaut peut ressentir quatre creux de tension successifs, tandis que celui raccordé directement sur le départ en défaut est soumis d'abord à un creux de tension, puis trois coupures brèves et enfin une coupure longue (fig.IV.11).

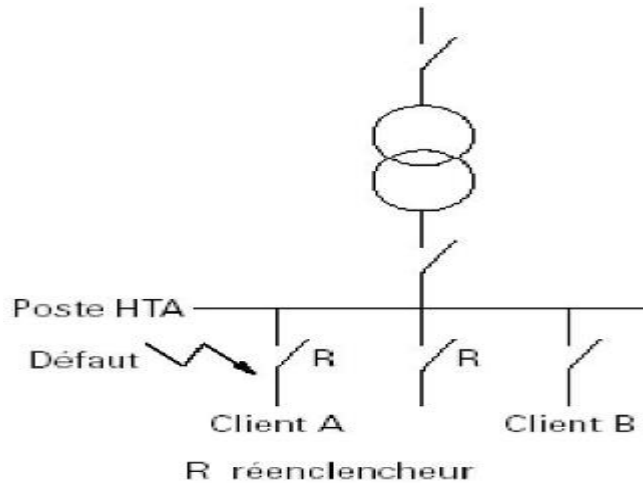


Fig. IV.11 : Exemple d'un réseau radial (HT 1 à 60kV)

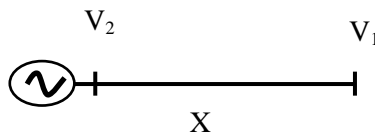
IV.5 PUISSANCE TRANSMISSIBLE DANS UNE LIGNE :

Contrairement à une idée très répandue, ce n'est pas l'échauffement maximal des conducteurs qui, en général, limite la puissance transmissible à travers une ligne [20].

Nous supposons, d'abord, que la résistance R de la ligne est nulle (elle est généralement très faible vis-à-vis de la réactance X) et que la puissance réactive Q₂ de la charge est nulle (ce qui est vrai en cas d'une bonne compensation de puissance réactive).

Et la puissance active est :

$$P_1 = P_2 = \frac{V_1 V_2}{X} \sin \theta \quad (IV.2)$$



V₁, V₂ : tension de ligne.

X : réactance.

IV.6. CALCUL D'ÉCOULEMENT DE PUISSANCE DES RESEAUX ELECTRIQUES :

La résolution du problème d'écoulement de puissance consiste à déterminer les modules et les phases des tensions, les puissances actives et réactives des différents jeux de barres et les charges. Pour cela, le problème d'écoulement de puissances est décrit par un ensemble d'équations non linéaires. Ces équations peuvent être résolus par des méthodes itératives, en

utilisant soit la matrice admittance ou impédance caractérisant le réseau électrique (méthodes de Gauss, Gauss Seidel, Newton Raphson,...etc).

IV.7.CLASSIFICATION DES JEUX DE BARES :

Selon les puissances actives et réactives, les tensions, les angles, les jeux de barres sont classés comme suit :

IV.7.1.jeu de barres de référence (slack bus) : où la tension et l'angle sont spécifiés, les puissances actives et réactives sont inconnues.

IV.7.2.jeu de barres de charge (PQ bus) : où les puissances actives et réactives sont spécifiées, la tension et l'angle sont inconnus.

IV.7.3.jeu de barres de génération (PV bus) : où la puissance active et la tension sont spécifiées, la puissance réactive et l'angle sont inconnus.

IV.8.EQUATIONS DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE EN UTILISANT LA MATRICE ADMITTANCE :

La résolution du problème de l'écoulement de puissance est basée sur un processus itératif. Pour un réseau à n jeux de barres, l'expression de la puissance apparente est donnée par la relation suivante :

$$S_p = V_p I_p^* = P_p + jQ_p \quad (IV.3)$$

$$S_p^* = P_p - jQ_p = \bar{V}_p I_p^* \quad (IV.4)$$

(p=1, 2, 3..., n)

L'expression du courant est donnée par :

$$I_p^* = \frac{P_p + jQ_p}{V_p} \quad (IV.5)$$

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p} \quad (IV.6)$$

Où :

I_p^* : courant conjugué.

S_p : puissance apparente au noeud p

P_p, Q_p : puissance active et réactive au noeud p

Y_{pq} : élément de la matrice admittance défini par $Y_{pq} = |Y_{pq}| < -\theta_{pq}$

V_p, V_q : tensions aux jeux de barres p et q respectivement exprimées par :

$$V_{p,q} = |V_{p,q}| < \delta_{p,q} \quad (IV.8)$$

$$I_p = \sum_{q=1}^n Y_{pq} V_q \quad (IV.9)$$

IV.9.RESOLUTION DU PROBLEME D'ECOULEMENT DE PUISSANCE PAR LA METHODE DE GAUSS-SEIDEL :

On remplace l'équation (IV.6) dans l'équation (IV.8) :

$$\frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} = (Y_{p1} V_1 + Y_{p2} V_2 + Y_{pp} V_p + \dots + Y_{pn} V_n) \quad (IV.10)$$

D'où :

$$Y_{pp} V_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - (Y_{p1} V_1 + Y_{p2} V_2 + \dots + Y_{pn} V_n) \quad (IV.11)$$

Donc l'expression de la tension au noeud p sera donnée par :

$$V_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} V_q \right] \quad (p=1, 2, 3, \dots, n, p \neq s) \quad (IV.12)$$

s : désigne le jeu de barres de référence

Pour simplifier l'équation précédente, on pose

$$\frac{1}{Y_{pp}} = L_p \quad (IV.13)$$

$$P_p - jQ_p = K \quad (IV.14)$$

L'équation (IV.12) s'écrit comme suit :

$$V_p = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} L_p - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^n Y_{pq} L_p V_q \quad (IV.15)$$

L'équation (IV.15) devient :

$$V_p = \frac{K}{V_p^*} L_p - \sum_{\substack{q=1 \\ p \neq q}}^n Y_{pq} L_p V_q \quad (IV.16)$$

Le calcul des nouvelles valeurs se fait sur la base de (IV.16) par un processus itératif, les étapes de calcul sont les suivantes :

-Estimation des valeurs initiales $V_{(0)}$

- Calcul de nouvelle solution $V_{(0)}$ en utilisant les valeurs estimées

-Teste de convergence $\left| \overline{V}_i^{(L+1)} - \overline{V}_i^{(L)} \right| < \varepsilon$ (ε : tolérance désirés) pour tous les jeux de

barres .

- la solution obtenue sera utilisée pour la prochaine itération.

Dans chaque itération, la tension est déterminée pour tous les jeux de barres sauf pour le jeu de barres de référence. Si les nouvelles valeurs sont utilisées pour calculer les prochaines tensions dans la même itération, ce processus est connu par la méthode de Gauss Seidel.

Si le même ensemble des valeurs des tensions calculées est utilisé dans une itération complète (au lieu de substituer les nouvelles valeurs chaque fois qu'elles sont déterminées pour calculer la tension du jeu de barres suivant) le processus serait appelé la méthode de Gauss .

Les deux processus itératifs sont donnés par :

➤ **Méthode de Gauss :**

$$V_p^{(L)} = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{V_p^{*(L-1)}} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} V_q^{(L-1)} \right] \quad (IV.17)$$

➤ **Méthode de Gauss Seidel :**

$$V_p^{(L)} = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{V_p^{*(L-1)}} - \sum_{q=1}^{p-1} Y_{pq} V_q^{(L)} - \sum_{q=p+1}^n Y_{pq} V_q^{(L-1)} \right] \quad (IV.18)$$

Où :

L et L-1 : indiquent les itérations en cours et précédente.

La puissance de transit entre les nœuds p et q est donnée par l'expression (IV.19) :

$$S_{pq} = \overline{V}_p \left(\overline{V}_p^* - \overline{V}_q^* \right) Y_{pq} + \overline{V}_p^* \overline{V}_q^* B_{pq}^* \quad (IV.19)$$

B:désigne la susceptance de la branche p, q

IV .10.CONCLUSION:

Dans Ce chapitre, nous avons présenté les conditions, ainsi les normes de raccordement des éolienne dans les réseaux électriques, un aperçu sur le calcul de puissance est présenté.



CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE:

Le travail présenté dans ce mémoire, a amené une contribution à la chaîne de production éolienne à base d'une machine Asynchrone à Double Alimentation, ainsi que l'apport qu'elle pourrait apporter son application dans une chaîne de production d'énergie éolienne. Pour ce faire, dans le premier chapitre, on a présenté l'état de l'art sur les différents types d'éoliennes existantes, les différentes génératrices utilisées et le choix de la machine asynchrone à double alimentation. De plus, les structures d'alimentation de la MADA associée à des convertisseurs d'électronique de puissance ont été présentées. La structure optée est celle qui comporte un système de convertisseurs indirects connectés au rotor de la génératrice (MADA) dont le stator est lié directement au réseau électrique. Après le choix de la génératrice et sa structure d'alimentation, la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation a fait l'objet du deuxième chapitre. La mise en équation des différentes grandeurs caractérisant la machine étudiée, nous a permis d'établir un modèle mathématique équivalent dont la complexité a été réduite en se basant sur certaines hypothèses simplificatrices. Les résultats de simulation de ce modèle sur Matlab nous confirment la possibilité de double alimentation par la stabilité des différentes grandeurs de la machine étudiée.

Les travaux présentés dans ce mémoire répondent à certaines questions qui laissent d'autres points en réponse, ils seront intéressés à savoir des études :

- Calcul d'écoulement de puissance et lors de l'intégration des éoliennes.
- L'étude et l'application d'autres structures des convertisseurs multi niveaux.
- L'utilisation des algorithmes de maximisation de la puissance.
- Enfin, l'étude des perturbations de la production d'énergie éolienne vis-à-vis les déséquilibres du réseau électrique.



BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **L. ABDELHAMID** « Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens ».Mémoire de magistère en électrotechnique - Batna-2008
- [2] **E. BEN KHELIL** « Simulation Dynamique des Fermes Éoliennes Intégrées dans un Réseau Électrique Multimachine » Mémoire de magistère en électrotechnique-univ-de Stif 2010
- [3] **F. MERRAHI** « Alimentation et Commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (Application à l'énergie éolienne) » Mémoire de magistère en électrotechnique-école national polytechnique-2007
- [4] **H. CAMBLONG** « Minimisation de l'Impact des Perturbations d'Origine Eolienne dans la Génération d'Electricité par des Aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat d'Etat en Automatique. Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2003
- [5] **[http: /www.wikipedia.org/home](http://www.wikipedia.org/home)** « World wind energy association»
- [6] **F. POTIERS** « Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour L'utilisation de l'énergie Éolienne » thèse de Doctorat d'état en Electronique et Génie Electrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes -2003.
- [7] **I. HAMAZAOUI** « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénératrice » Mémoire de magistère en électrotechnique-école national polytechnique-2008
- [8] **S.ELAIMANI** « Modélisation de Différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de Doctorat, d'Etat en Electronique et Génie Electrique. Ecole Centrale de Lille (ECL), 2005.
- [9] **P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi**, "Eoliennes", Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie mécanique, pp. BM 4 640 1 - BM 4 640 21.
- [10] **Y. ELBIA** «commande floue optimisée d'une MADA et à flux orienté ». Mémoire de Magistère. Batna.2009
- [11] **J. CHATELAIN** « Machines électriques tournantes ». Edition Dunod, tome1, 1983.

REFERENCES ET BIBLIOGRAPHIES

- [12] **G. SALLOUM** «Contribution à la commande robuste de la MADA » Thèse de doctorat, de l'institut national polytechnique de toulouse-2007
- [13] **F.BOUMARAF** « Commande intelligente d'une association convertisseur statique MADA». Mémoire de Magistère. Batna.2008
- [14]**L. BENALIA** «commande en tension des Moteurs à induction double alimentations». Thèse de doctorat, université de Batna-2010
- [15] **Z.BOUDJEMAA**« Commande vectorielle sans capteur de vitesse de la MADA par régulateur PI-FLOU » Mémoire de Magistère en université de Oran -2009.
- [16] **M. BOUZID Allal**« Onduleur triphasé commandé par la Stratégie d'Élimination d'Harmonique« SHE » Mémoire de magistère en Génie Éctrique univ-Oran-2010
- [17] **A. TENINGE** « Participation aux services système de parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire » thèse Doctorat de l'Institut polytechnique - Génie Electrique-de Grenoble - 2009.
- [18] **N. LAVERDURE** « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » thèse de Doctorat de l'INPG - Génie Electrique- Grenoble-2005.
- [19] **D. Marín** « Intégration des éoliennes dans les réseaux électriques insulaires » thèse de Doctorat de Ecole centrale de Lille -Génie Electrique-2009
- [20]**L. DELENDI** « Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS » Mémoire de Magistère, université de Batna-2009

INDEX

Annexe

Les paramètres de la turbine éolienne utilisée de 150 KW :

Nombre de pale =3

Diamètre d'une pale R=14

Gain du multiplicateur : G=28

Inertie J= 50 Kg.m²

Coefficient $f_v=7e-3$ N.m.s/rd

Donné de la machine asynchrone double alimentée

Valeurs nominales : 4KW ; 220/380V- 50Hz ; 15/8.6A ; 1500 tr/min.

Paramètre :

Rs (Résistance du stator) =1.2 Ω

Rr (Résistance du rotor) =1.8 Ω

Ls (Inductance stator) = 0.1554H

Lr (Inductance du rotor) = 0.1568H

M (Inductance Mutuelle) = 0.15H

Constantes mécaniques :

J (Moment d'inertie) = 0.2 Kg.m²

f (Coefficient de frottement) = 0.001N.m.s/rd

C=20uF : capacité de filtre entre le redresseur et l'onduleur

ملخص :

العمل المقدم في هذه المذكرة يهدف إلى ، النمذجة و محاكاة الماكنة الامتزامنة مضاعفة التغذية استخدمت في سلسلة من تحويل طاقة الرياح . وبعد تقديم لمحة عامة عن توربينات الرياح، ونوع من المولدات المستخدمة و مختلف هياكل التغذية، اهتمنا بتجميع المحولات.MLI . نتائج المحاكاة تظهر في تقييم أداء تنفيذ الماكنة الامتزامنة مضاعفة التغذية في إنتاج طاقة الرياح.

كلمات مفتاحيه :

طاقة الرياح، ناعورة هوائية، أخطاء دارة كهربائية قصيرة،الماكنة اللامتزامنة مضاعفة التغذية ، محولات MLI، شبكة التوزيع، انخفاضات التوتر.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne, modélisation et simulation d'une machine asynchrone à double alimentation utilisé dans une chaîne de conversion éolienne. Après avoir présenté un aperçu sur les éoliennes, ainsi les différents types de la MADA utilisée et les différentes structures d'alimentation. Ensuite, nous somme intéressé à l'association des convertisseurs MLI. Les résultats de simulation obtenus montrent l'évaluation des performances de l'application de la machine asynchrone à double alimentation dans la production de l'énergie éolienne.

Mots Clés : Energie éolienne, turbine, Machine asynchrone à double alimentation, Convertisseurs MLI, Réseau de distribution, Défauts de court circuit, Creux de tension.

Abstract:

The work presented in this thesis concerns, modeling and simulation of a double-fed asynchronous machine used in a string of wind conversion. After presenting an overview of the wind, and the different types of MADA used and the different structures of power. Then we are interested in the association of PWM converters. The simulation results show the performance evaluation of the implementation of the double-fed asynchronous machine in the production of wind energy.

Keywords: Wind energy, turbine, double-fed asynchronous machine, PWM Converters, Distribution Network, short circuit faults, voltage dips.

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME

DE MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

SPÉCIALITE : AUTOMATIQUE

Proposé et Dirigé par : -Dr. MESSALTI Sabir

Présenté par : -SALEM Karima

THEME

**ÉTUDE D'UNE ÉOLIENNE A BASE D'UNE GÉNÉRATRICE MADA
INTEGRÉE DANS UN RÉSEAU MOYEN TENSION**

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire concerne, modélisation et simulation d'une machine asynchrone à double alimentation utilisé dans une chaîne de conversion éolienne. Après avoir présenté un aperçu sur les éoliennes, ainsi les différents types de la MADA utilisée et les différentes structures d'alimentation. Ensuite, nous somme intéressé à l'association des convertisseurs MLI. Les résultats de simulation obtenus montrent l'évaluation des performances de l'application de la machine asynchrone à double alimentation dans la production de l'énergie éolienne.

Mots Clés : Energie éolienne, turbine, Machine asynchrone à double alimentation, Convertisseurs MLI, Réseau de distribution, Défauts de court circuit, Creux de tension.

N⁰ d'ordre : 021