

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement

Supérieur et de la Recherche

Scientifique

Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie électrique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electrotechnique

Spécialité

Commande électriques

Thème

**Utilisation des convertisseurs multi-niveaux pour le contrôle
d'un système de production d'énergie éolienne autonome basé
sur une génératrice asynchrone à cage d'écureuil**

Présenté par:

***TOUATI SIHEM
ALIBEY MELISSA***

Encadré par :

***MR IDJDARENE KASSA
Mme HACINI KAHINA***

Année universitaire 2020-2021

REMERCIEMENT

*Nous tenons tout d'abord à remercier **DIEU** le tout puissant, pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions très vivement notre Promoteur **Professeur IDJDARENE**, de l'aide précieux qu'il a toujours bien voulu nous apporter, et pour nous tendre la main à chaque fois qu'on a besoin.*

*Notre sincère remerciement à notre Promoteur **Mme HACINI** pour son aide inestimable et ses précieux conseils.*

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

Enfin, Nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail.

A mes très chers parents qui n'ont jamais cessé de me soutenir tout au long de mon parcours d'étude.

À mon frère (Amine) et À ma sœur (Lila) et son mari.

À mon neveu aksel

Et à tous les membres de ma famille,

À ma chère amie du parcours Sihem avec laquelle j'ai eu le plaisir de travailler et à toute sa famille.

Et mes copines sarah, meriem, amel, sabrina, yasmine. Que dieu, le tout puissant, vous préserve et vous procure santé et longue vie afin que je puisse à mon tour vous combler.

melissa



Dédicace

Je dédie Mon Travail avant tous A mes Chers Parents

Mon PERE qui ne cesse pas de M'encourager, et qui Ma toujours soutenu, Ma jolie MERE symbole de sacrifice et qui est tout pour moi, pour Sa Tendresse profonde « Que Dieux me les protègent ».

À Mes chers Frères et Sœurs et ses familles.

À ma chère amie du parcours Melissa avec laquelle j'ai eu le plaisir de travailler et à toute sa famille.

À mes chères amies.

A tous ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire.



Sihem

Sommaire

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles

Introduction générale.....1

Chapitre I : Généralités sur les systèmes de production d'énergie éolienne

1. Introduction.....	3
2. Description de l'énergie éolienne.....	3
3. Principaux composants d'une éolienne.....	4
4. Différents types d'éoliennes.....	5
4.1 Les éoliennes à axe horizontal.....	5
4.2 Les éoliennes à axe vertical.....	6
5. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	7
6. Mise en œuvre des éoliennes.....	8
6.1 Les éoliennes connectées au réseau électrique.....	8
6.1.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	8
6.1.2 Les éoliennes à vitesse variable.....	8
6.2 Les éoliennes en fonctionnement autonome.....	8
6.2.1 Machine synchrone.....	9
6.2.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné.....	9
6.2.1.2 Machines synchrones à aimants permanents.....	9
6.2.1.3 Réductance variable.....	10
6.2.2 Machine asynchrone.....	10
6.2.2.1 Génératrice asynchrone à cage d'écureuil.....	10
6.2.2.2 Génératrice asynchrone à double alimentation.....	11
7. Structures autonomes à base de la machine asynchrone à cage.....	11
7.1 Machine asynchrone auto-excitée par des condensateurs fixes.....	11
7.2 Machine asynchrone auto-excitée par une batterie de condensateurs commandés.....	12
7.3 Auto-amorçage par un convertisseur statique.....	13
8. Intérêt de convertisseur multiniveaux.....	13
9. Conclusion.....	15

CHAPITRE II : Modélisation de l'ensemble convertisseur- MAS

1. Introduction.....	16
2. Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	16
3. Transformation du système triphasé.....	19
3.1 Transformation de park appliquée à la machine asynchrone à cage d'écureuil.....	19
3.1.1 Équation électrique d'un enroulement triphasé dans les axes d et q.....	20
3.1.2 Couple électromagnétique.....	22
4. Auto-amorçage de la MAS par un convertisseur statique.....	22
5. Redresseurs multi niveaux.....	23

Liste de figure

Chapitre I: Généralités sur le système de la production d'énergie éolienne

Figure I.1: Principe de conversion d'énergie.....	4
Figure I.2: Les éléments d'une éolienne	5
Figure I.3: Eolienne à axe horizontal.....	6
Figure I.4: Eolienne à axe vertical.....	7
Figure I.5: Machines synchrones à aimants permanents.....	9
Figure I.6: Système éolien basé sur une génératrice asynchrone à cage à fréquence variable	10
Figure I.7 : Génératrice asynchrone à double alimentation	11
Figure I.8 : Machine asynchrone auto-excitée par des condensateurs fixes	12
Figure I.9 : MAS auto-excité par batterie de condensateur variable	12
Figure I.10 : Auto-amorçage par un convertisseur	13
Figure I.11 : Les différentes topologies des onduleurs multiniveaux	15

CHAPITRE II: Modélisation de l'ensemble convertisseur- GAS

Figure.II.1: représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la MAS.....	17
Figure II.2: Passage du système triphasé au système biphasé et inversement.....	19
Figure.II.3: Auto-amorçage par un convertisseur à MLI.....	23
Figure .II.4. schéma représentatif d'un redresseur triphasé à deux niveaux de tension.....	24
Figure II.4a. la caractéristique statique d'un Transistor et d'une diode.....	24
Figure.II.4b. Mise en parallèle d'un transistor et d'une diode.....	24
Figure .II.5. Structure d'un redresseur triphasé à structure NPC.....	26
Figure II.5.a. Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode.....	27
Figure II.5.b. Un bras redresseur à trois niveaux de type NPC.....	27
Figure II.6 : Allure du courant statorique d'une phase.....	31
Figure II.7 : Evolution du couple électromagnétique.....	31
Figure II.8 : Evolution temporelle la vitesse.....	32
Figure .II.9 : MLI à deux porteuses pour un onduleur à deux niveaux.....	33
Figure .II.10 : L'allure de la tension composé vab à la sortie de l'onduleur à 2N	33

Figure .II.11 : L'allure de la tension simple de la phase1 à la sortie de l'onduleur à 2N	33
Figure .II.12 : L'allure des tensions simples V_{abc} à la sortie de l'onduleur à 2N.....	34
Figure .II.13 : MLI à deux porteuses pour un onduleur à trois niveaux.....	34
Figure .II.14 : L'allure de la tension entre phase a et le point milieu o.....	34
Figure .II.15 : L'allure de la tension composé V_{ab} à la sortie de l'onduleur à 3N.....	35
Figure .II.16 : L'allure de la tension simple de la phase1 à la sortie de l'onduleur à 3N.....	35
Figure.II.17 : L'allure des tensions simples V_{abc} à la sortie de l'onduleur à 3N.....	35

Chapitre III: Commande vectorielle de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil (SEIG)

Figure.III.1 : Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu	38
Figure.III.2 : Schéma de principe de la commande vectorielle à flux orienté.....	42
Figure.III.3 : Vitesse d'entraînement.....	43
Figure.III.4 : La charge.....	43
Figure.III.5 : Tension redressée.....	44
Figure.III.6 : Flux rotorique.....	45
Figure III.7 : Couple électromagnétique.....	46
Figure.III.8 : Courants i_{ds} et i_{qs}	47
Figure III.9 : Fréquence statorique.....	48
Figure III.10 : Courants statoriques.....	49
Figure.III.11 : L'allure de la tension composé v_{ab}	50
Figure.III.12 : L'allure de la tension statorique v_a	50
Figure.III.13 : l'allure de la tension composé v_{ab}	50
Figure.III.14 : L'allure de la tension entre phase a et le point milieu o.....	51
Figure.III.15 : l'allure de la tension statorique de la phase a v_a	51
Figure.III.16 : Spectre harmonique de courant statorique (avec le redresseur à 2N).....	52
Figure.III.17 : Spectre harmonique de courant statorique (avec le redresseur à 3N).....	52

Liste des tableaux

Tableau I.1:Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....7

Tableau.III.1: Valeur des harmoniques des tensions de sortie d'un onduleur deux et trois niveaux de type NPC.....55

Nomenclature :

$[V_{sabc}]$: Matrice des tensions statoriques.

$[V_{rabc}]$: Matrice des tensions rotoriques.

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

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

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

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

$[R_s]$: Matrice des résistances statoriques.

$[R_r]$: Matrice des résistances rotoriques.

$[V_{sdq0}]$: Matrice des tensions statoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[I_{sdq0}]$: Matrice des courants statoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[\Phi_{sdq0}]$: Matrice des flux statoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[V_{rdq0}]$: Matrice des tensions rotoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[I_{rdq0}]$: Matrice des courants rotoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

$[\Phi_{rdq0}]$: Matrice des flux rotoriques dans les axes « d, q, o » du modèle.

T_{em} : Couple électromagnétique.

g : Glissement.

M : Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

ω_s : Pulsation des signaux statoriques.

ω_r : Pulsation du champ rotorique.

$i_{sd}i_{sq}$: Courants magnétisants statoriques dans les axes « d, q ».

$i_{rd}i_{rq}$: Courants magnétisants rotoriques dans les axes « d, q ».

Φ_{sdq0} : Matrice des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

Φ_{rdq0} : Matrice des flux rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.

$L_{s=l_s+M}$: Inductance cyclique statorique

$L_{r=l_r+M}$: Inductance cyclique rotorique

l_s : Inductance de fuite statorique.

l_r : Inductance de fuite rotorique.

M : Mutuelle inductance.

$S_a S_b S_c$: Les fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

F_x^h : Fonction de commutation.

V_{dc} : Tension du bus continu.

Abréviations Et Nomenclatures

V_{ao}, V_{bo} et V_{co} : Tensions phases-point milieu.

V_{ab}, V_{bc} et V_{ca} : Les tensions composées entre phases.

(v_a, v_b, v_c) : Les tensions simples côté charge.

(i_{d1}, i_{d2}, i_{d3}) : Les courants des branches d'entrée de l'onduleur.

(m) : l'indice de modulation.

(r) : Le taux de modulation.

f_r : La fréquence de la tension de référence.

f_p : La fréquence de la tension de la porteuse.

V_r : L'amplitude de la tension de référence.

V_p : L'amplitude de la porteuse.

Mots abrégé :

MAS : Machine asynchrone.

MCC : Machine à courant continu.

MADA: Machine asynchrone à double alimentation.

MSAP: Machine synchrone à aimants permanents.

MRV: La Machine à Réductance Variable.

GTO: Gate turn-Off Thyristor.

NPC: Neutral Point Clamped.

MLI: Modulation de Largeur d'Impulsion.

Introduction générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes: ce sont les énergies de l'avenir [1].

Parmi les énergies renouvelables, l'énergie éolienne occupe la deuxième place derrière l'énergie solaire. Les systèmes de conversion de l'énergie éolienne utilisent dans leur grande majorité des générateurs synchrones ou asynchrones [2]. Elle consiste essentiellement à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. L'exploitation de cette dernière a connu un développement remarquable grâce à l'évolution technologique du côté aérodynamique et l'apparition des machines électriques tournantes [3].

Traditionnellement, les machines synchrones ont été utilisées pour la production d'énergie électrique mais les machines asynchrones sont de nos jours de plus en plus utilisées car elles offrent des performances attractives en termes de maintenance et de coût d'investissement.

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées. Celles-ci ont plusieurs avantages : elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique. Par ailleurs, leurs inconvénients se trouvent au niveau de la consommation d'énergie réactive, qu'elles tirent soit du réseau, soit elles sont compensées par une batterie de condensateurs d'où la possibilité de fonctionnement autonome [4].

Aujourd'hui, et grâce à l'évolution de l'électronique de puissance et la technologie de traitement numérique des signaux, il est devenu possible de donner à la MAS un comportement dynamique similaire à une machine à courant continu (MCC) à excitation séparée. La stratégie de commande vectorielle, en particulier, celle basée sur l'orientation de flux rotorique, et aujourd'hui reconnue comme étant la technique la plus répandue dans le domaine de la commande des machines électrique [5][6].

La commande vectorielle est largement utilisée dans les systèmes éoliens autonomes ou isolés pour le réglage de la tension continue. Cela dit, on passe tout d'abord par le choix d'une structure ou organe de commande convertisseurs multiniveaux d'électronique de puissance approprié à nos besoins. En général, cette technique de commande prend une structure en cascade et souvent quatre régulateurs sont utilisés habituellement des régulateurs PI, les signaux de commande pour le convertisseur à MLI sont générés grâce à une technique de " Modulation de Largeur d'Impulsion " MLI ou " pleine onde ". L'utilisation des redresseurs multiniveaux

permet de générer des tensions très proches de la sinusoïde. Les redresseurs à deux et à trois niveaux sont bien adoptés surtout pour les moteurs à moyenne puissance [7][8].

Dans notre travail, nous nous intéresserons à la préoccupation principale dans un tel fonctionnement, est le maintien de l'amplitude et la fréquence des tensions générées à des valeurs constantes, quelques soit la variation de la vitesse du vent et la puissance demandée par la charge autonome. Bien évidemment, pour réaliser cet objectif, on passe forcément par l'utilisation d'une stratégie de commande vectorielle. Cela dit, on passe tout d'abord par le choix d'une structure ou organe de commande convertisseurs multiniveaux (deux niveaux, trois niveaux).

Notre travail est réparti sur trois chapitres :

Un premier chapitre sera consacré aux généralités sur l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes, le principe de fonctionnement d'une éolienne et les machines électriques adaptables à un système éolien.

Dans le deuxième chapitre, en premier lieu, nous présenterons une modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil. On donne ensuite la modélisation de convertisseur statique triphasé multi niveaux NPC, ce dernier est commandé par la technique de Modulation de Largeur d'impulsions (MLI).

Dans le troisième chapitre, nous exposons le principe de la commande vectorielle par orientation de flux rotorique. Différents résultats de simulation seront montrés et commentés à la fin de l'étude de cette stratégie de commande.

CHAPITRE I

1. Introduction

Depuis quelques années, la production électrique éolienne est en plein développement industriel. Elle présente en effet de nombreux atouts: c'est tout d'abord une énergie renouvelable non polluante qui contribue à une meilleure qualité de l'air et à la lutte contre l'effet de serre. C'est aussi une énergie qui utilise les ressources nationales et concourt donc à l'indépendance énergétique et à la sécurité des approvisionnements [9].

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique et d'une manière générale. Il y a plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (à axe vertical ou axe horizontal). Et aussi différents configurations d'un système éolienne (à vitesse fixe et a vitesse variable). De a fait les éoliennes sont considérés comme des génératrices de puissance variable, connectés au réseau électrique [10].

2. Description de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne et une énergie reconvertibles contribuant à la production d'électricité. Un aérogénérateur plus communément appelé éolienne est un dispositif qui utilise une partie de l'énergie cinétique du vent pour entrainer l'arbre de son rotor celle-ci convertie en énergie mécanique disponible sur l'arbre de transmission puis transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique combinée à la turbine éolienne. Cette jonction mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre d'ampleur, soit accompli par le médiateur d'un multiplicateur dans le cas inverse. Enfin il existe différent modèle d'utilisation de l'énergie électrique produite: soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit-elle alimentée des foyers isolés [11][12].

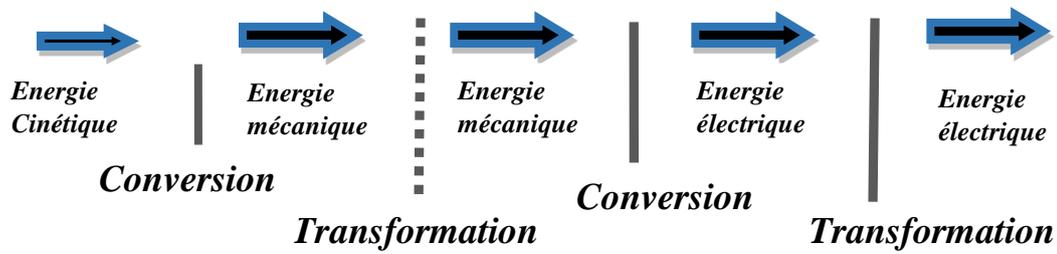
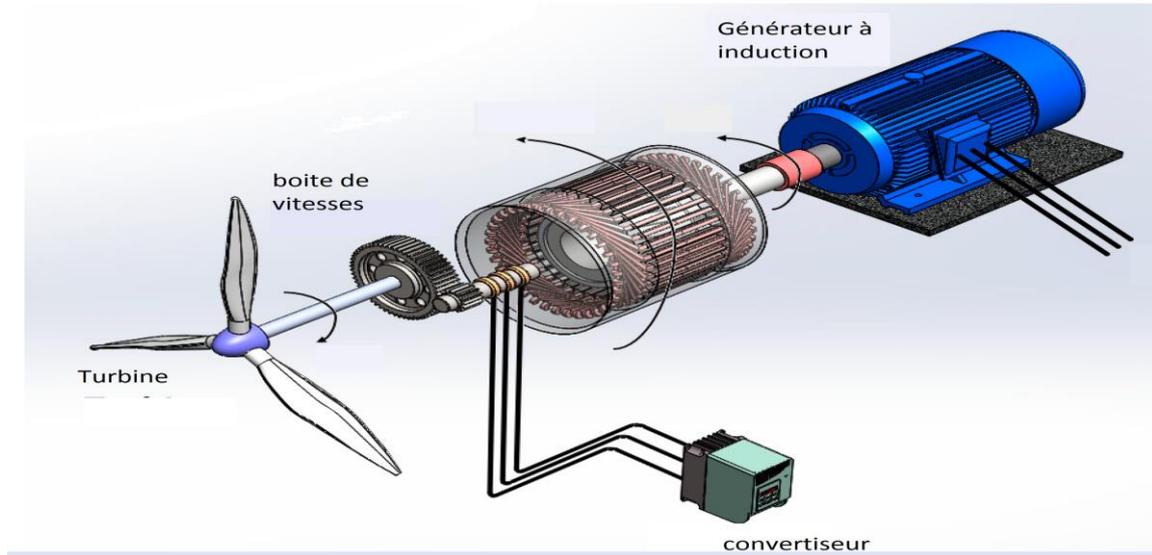


Figure.I.1: Principe de conversion d'énergie

3. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est constituée principalement de trois parties: les pales (entre 1 et 3), la nacelle et la tour. Chacune de ces parties doit être minutieusement étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système ainsi qu'un faible coût d'investissement [13] [14].

- **Le mât:** généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol et bénéficier au maximum de l'énergie du vent.
- **La nacelle:** La nacelle : est la partie où l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique par le biais d'une génératrice. Il y a aussi dans la nacelle des systèmes de contrôle et de frein dans le cas où le vent serait trop fort.

- **Le rotor:** formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3.

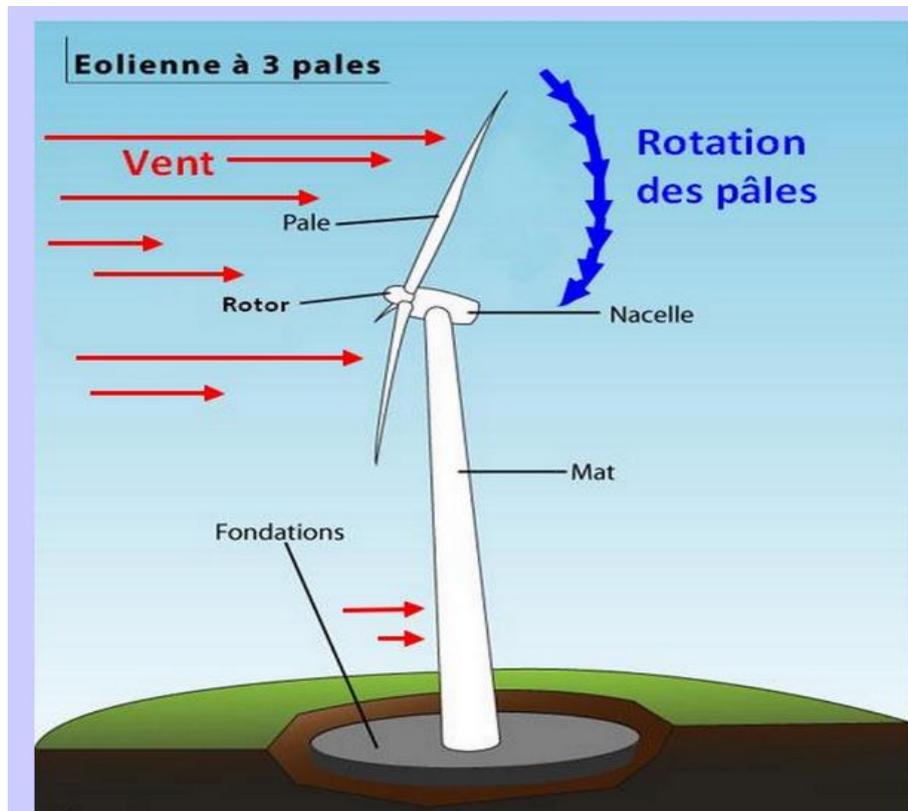


Figure.I.2: Les éléments d'une éolienne

4. Différents types d'éoliennes

4.1. Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Sont les plus utilisées car leur productivité aérodynamique est supérieure à celui des éoliennes à axe vertical. Ces éoliennes à axe horizontal, généralement, ce sont des éoliennes à trois pales : en effet, un nombre impair de pales consent d'assurer la stabilité de l'éolienne. Si on ne met que deux pales sur une éolienne, lorsque l'une des pales passera devant le mat et sera donc abritée du vent, la seconde pale sera tout en haut, là où elle reçoit plus de vent, ce qui déséquilibre l'éolienne [11].

Par conséquent, ce type de turbines doit toujours être orienté face au vent par comparaison à la turbine à axe vertical, pour la même vitesse de vent, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie grâce à un meilleur coefficient de puissance. Par ailleurs, elles ont

un coût moindre et une efficacité accrue due à leur position à plusieurs dizaines de mètres du sol [15].



Figure.I.3: Eolienne à axe horizontal

4.2. Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol facilement accessibles mais leur plus faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation [16].

- Eolienne à axe vertical de type Darrieus: L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes (Aéole, 4 MW, installée au Canada en 1987), n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient consentis dans la recherche sur ce sujet [9].

- Eolienne à axe vertical de type Savonius: L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner [9].



Figure I.4.a: Rotor de Savonius



Figure I.4.b: Rotor de Darrieus

Figure.I.4: Eolienne à axe vertical

5. Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne

Tout système de production d'énergie a ses avantages et ses inconvénients [17][11]

Tableau I.1 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

Avantages	Inconvénients
L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution ni déchets	L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo.
L'énergie éolienne produit de l'électricité : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux, sans polluer les sols	Possède un mécanisme bruyant.
L'industrie éolienne présente un potentiel important en termes d'emplois au niveau de la fabrication et de l'installation	La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
La surface occupée au sol est peu importante.	L'impact visuel, « ça reste néanmoins un thème subjectif ».

L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable. Il constitue donc une véritable ressource renouvelable.	
Le cout d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.	

6. Mise en œuvre des éoliennes

6.1. Les éoliennes connectées au réseau électrique

On peut recenser deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [16].

6.1.1. Les éoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales. Ces systèmes reposent généralement sur l'utilisation d'une machine asynchrone avec des régulateurs ou d'une machine asynchrone à cage d'écureuil [18].

6.1.2. Les éoliennes à vitesse variable

Fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire. Ce mode de fonctionnement repose beaucoup plus sur l'utilisation des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) et asynchrones à doubles alimentation (MADA) [19].

6.2. Les éoliennes en fonctionnement autonome

Les éoliennes de petite puissance dont la puissance varie de quelques dizaines de watts à quelques dizaines de kilowatts(kW), sont principalement utilisées dans le cadre d'installations électriques autonomes, c'est à dire d'installations qui ne sont pas raccordées au réseau de distribution d'électricité. Ces systèmes autonomes conviennent particulièrement pour les

aménagements dont le besoin en électricité est réduit ou pour les sites dont le raccordement au réseau est impossible, difficile à réaliser ou trop cher [20].

6.2.1. Machine synchrone

6.2.1.1. Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [15].

6.2.1.2. Machines synchrones à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. L'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, Les inducteurs à aimants à haute énergie permettent de gagner environ 25% de masse par rapport à ceux de type bobiné. Ces qualités sont contre balancées par un coût plus élevé que la MAS. Le convertisseur de fréquence s'impose. C'est pourquoi les machines à entraînement direct sont toutes à vitesse variable. Mais leur inconvénient principal provient de l'absence de possibilité de réglage du flux d'excitation. Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation [21].

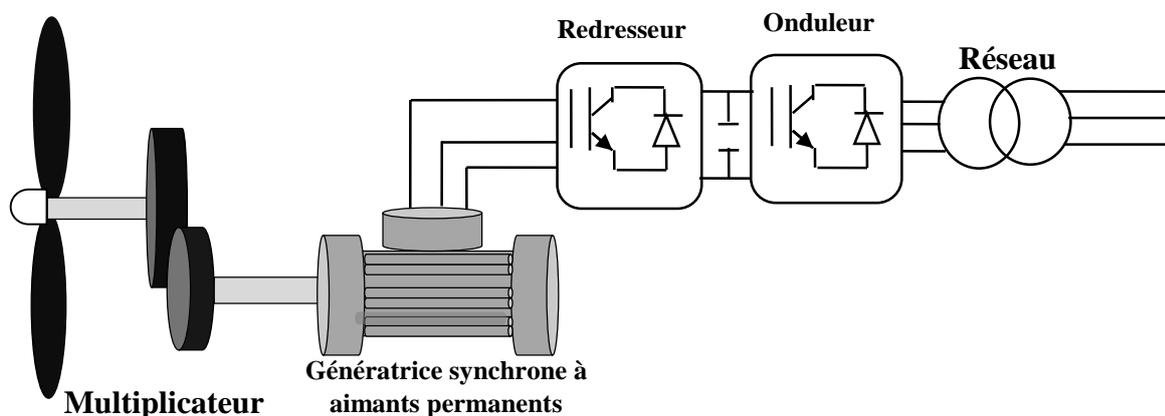


Figure.I.5: Machines synchrones à aimants permanents.

6.2.1.3. Réductance variable

La Machine à Réductance Variable (MRV) présente l'avantage d'un découplage des phases (absence de couplage magnétique et absence de couplage électrique entre les enroulements de deux phases différentes de la machine). Une étude comparative l'inductance de phase en fonction de la position du rotor. La valeur du couple dépend du carré du courant, la MRV est donc alimentée par des impulsions de courant positives. Une autre remarque importante est que le signe du couple dépend uniquement du sens de variation de l'inductance en fonction de la position. La MRV est une machine réversible capable de fonctionner en mode moteur si on applique l'impulsion de courant dans la région croissante de l'inductance et en mode générateur si on l'applique dans la région décroissante de l'inductance pour créer un couple négatif [22].

6.2.2. Machine asynchrone

6.2.2.1. Génératrice asynchrone à cage d'écureuil

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil est appelée aussi génératrice a rotor en court-circuit. C'est la génératrice qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Les machines électriques asynchrones a cage sont les plus simples à fabriquer et moins Coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle de puissance. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de d' défaillance très peu élevé [23].

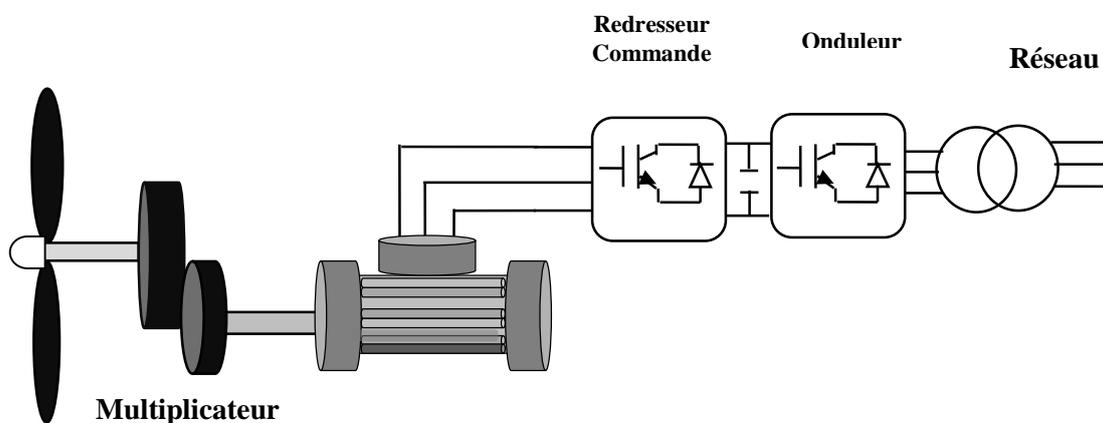


Figure I.6: Système éolien basé sur une génératrice asynchrone à cage à fréquence variable

6.2.2.2. Génératrice asynchrone à double alimentation

Avec les génératrices asynchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions Concurrentes en éolien à vitesse variable. La génératrice à double alimentation (MADA) à Rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des génératrices asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse. Intégrée dans le système éolien, la machine a généralement son stator connecte ou réseau et l'énergie rétorque varie selon différents systèmes utilise [24].

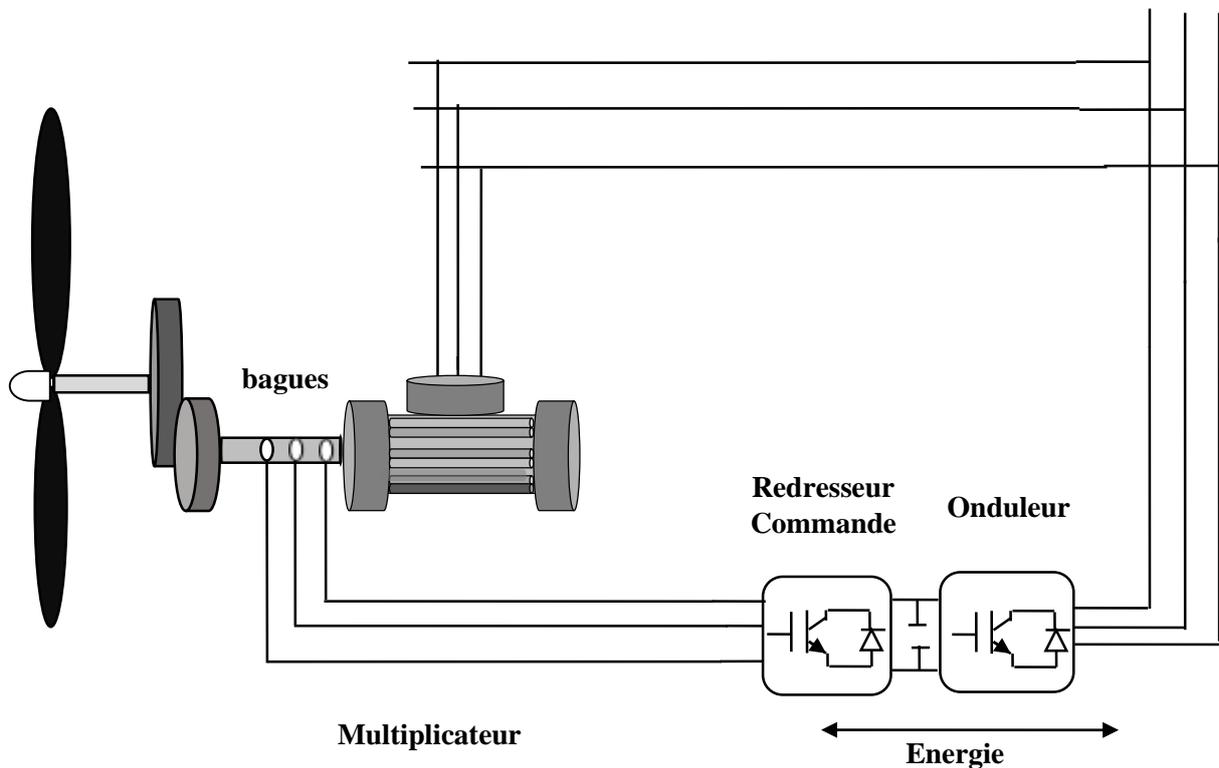


Figure.I.7: Génératrice asynchrone à double alimentation

7. Structures autonomes à base de la machine asynchrone à cage

7.1. Machine asynchrone auto-excitée par des condensateurs fixes

Il est préférable d'utiliser un banc de capacités en parallèle à la charge, constitué de trois condensateurs connectés soit en étoile ou en triangle aux bornes de la génératrice, cela permet d'assurer plus de sûreté de fonctionnement pour le système de production d'énergie éolienne, soit pour une charge monophasée ou triphasée. En cas de défaut dans une phase ou dans un condensateur, le système peut fonctionner mais il y aura une chute de tension due à la

diminution de la magnétisation de la génératrice. Cette configuration peut aussi induire des courants statoriques déséquilibrés dans le cas de l'alimentation d'une charge monophasé ou triphasé déséquilibrée [15].

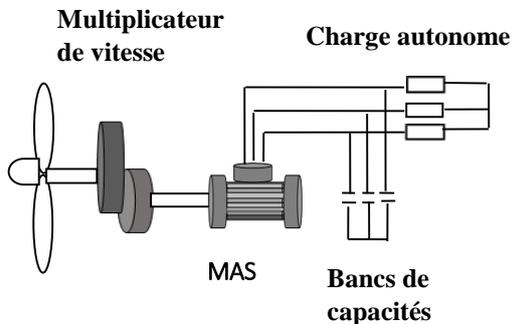


Figure I.8.a: MAS auto-excité par batterie de condensateur en étoile.

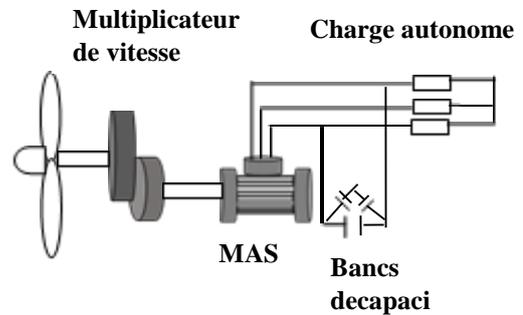


Figure I.8.b: MAS auto-excité par batterie de condensateur en triangle.

7.2. Machine asynchrone auto-excité par une batterie de condensateurs commandés

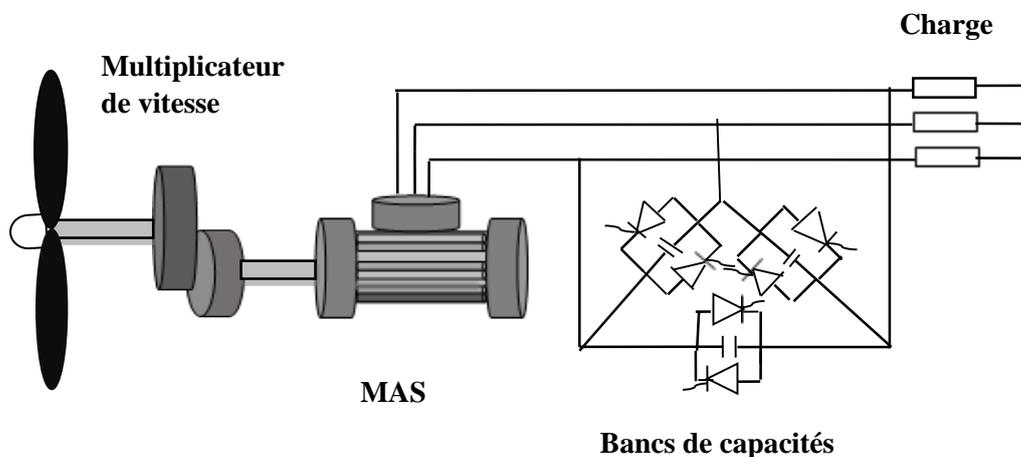


Figure I.9: MAS auto-excité par batterie de condensateur variable

Cette structure utilise des batteries de condensateurs, elle est constituée de capacité fixes en parallèles avec des interrupteurs GTO (Gate Thyristor Off) montés en tête bêche (figure I.9). Ce dispositif se comporte comme un condensateur variable, de façon à créer une source d'énergie réactive variable permettant d'élargir la plage de fonctionnement face au variations de tensions lors des perturbations de la vitesse du vent ou de la charge, mais ne garantissent pas

un contrôle contenue de l'énergie réactive, sans compter l'injection des harmoniques causés par les commutation des GTO [15][19].

7.3. Auto-amorçage par un convertisseur statique

Dans cette partie on exposera le modèle mathématique de l'auto-amorçage par un convertisseur statique qui nous permet à la fois de laisser passer l'énergie réactive et de maintenir constante la tension continue à sa sortie.

De la tension continue et la fréquence de référence imposée au fondamental des grandeurs statoriques. Cependant, le système ne peut s'amorcer seul puisqu'à l'instant de la mise sous tension, aucune énergie réactive n'est disponible. On utilise alors la réversibilité du convertisseur en connectant une batterie du côté continu qui fournit le réactif durant la phase d'amorçage. Une diode découple la batterie du redresseur dès que la tension générée en sortie du redresseur est supérieure à celle côté batterie.

Dans ce qui suit, nous introduisons une synthèse de la modélisation du système d'auto amorçage avec un convertisseur [20].

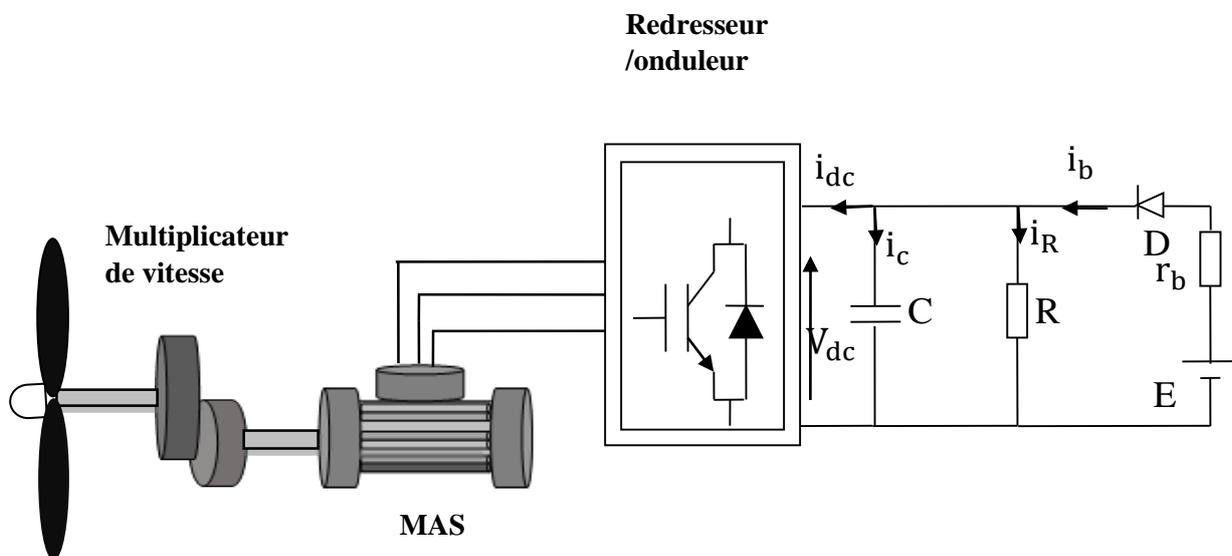


Figure I.10: Auto-amorçage par un convertisseur

8. Intérêt de convertisseur multiniveaux

Un convertisseur statique est dit « multi niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi niveaux permettent de limiter les contraintes en

tension subies par les interrupteurs de puissance: chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension continue que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. L'amplitude des raies harmoniques est, par conséquent, d'autant moins élevée.

Dans le cas plus précis d'un fonctionnement en modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques [25][26]. La figure(I.11) représente les trois topologies principales des onduleurs multiniveaux les plus récentes.

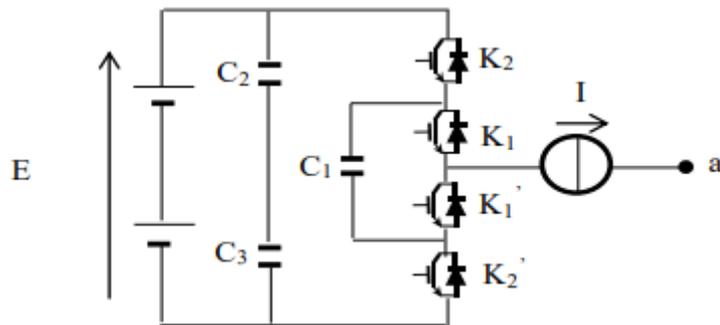


Schéma d'un bras d'onduleur à cellules imbriquées

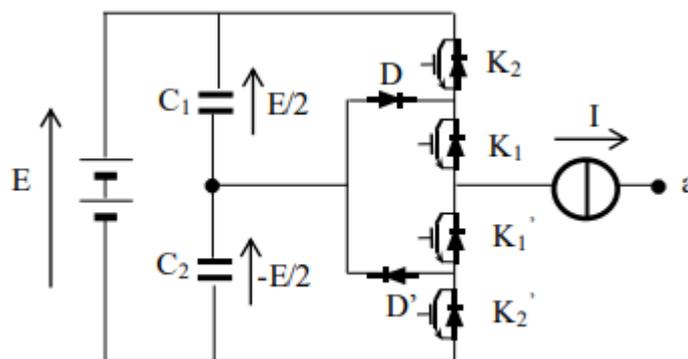
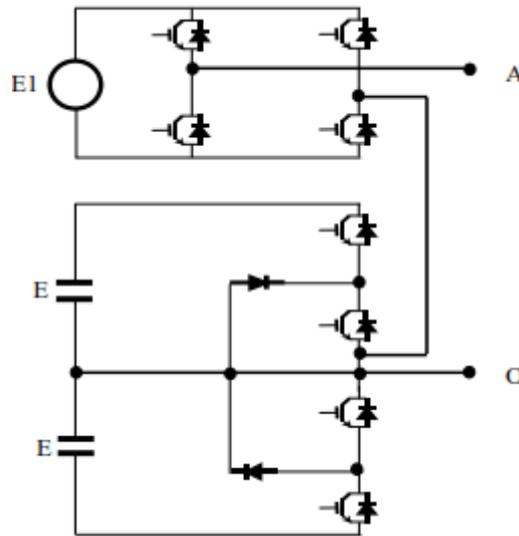


Schéma d'un bras d'onduleur à trois niveaux à diode flottante



Onduleurs multiniveaux hybrides

Figure I.11: Les différentes topologies des onduleurs multiniveaux

9. Conclusion

Une brève description sur le système éolien a été présentée dans ce chapitre. Nous avons écrit les différents types des éoliens avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements, ainsi que leurs avantages et inconvénients. Partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, à la fin on a présenté les machines adaptées à un système éolien et l'intérêt de convertisseur multiniveaux.

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

CHAPITRE II

I. Introduction

La machine asynchrone à cage reste sans conteste celle qui est la plus largement répandue pour des applications en conversion éolienne autonome ou isolée et ce pour des raisons de robustesse et de prix. En effet, cette structure est démunie de contacts électriques par balais et d'aimants permanents ce qui lui confère une robustesse et une longévité sans égales [27] et également un coût d'achat et d'entretien bien inférieur à celui d'un alternateur d'une même puissance [28].

L'apparition des convertisseurs multi niveaux est l'un des résultats de cette évolution, il y a eu une augmentation considérable dans l'application du redresseur MLI. Récemment, les redresseurs à trois niveaux ont été largement appliqués aux nouveaux systèmes énergétiques, tels que l'énergie éolienne et les systèmes d'énergie solaire. Ils sont aussi appliqués à des systèmes d'entraînement haute tension à fréquence variable et à de nombreux autres systèmes à haute capacité car de leurs caractéristiques sont attrayantes, telles qu'une faible distorsion harmonique des courants d'entrée, fonctionnement du facteur de puissance unitaire, capacité de flux de puissance bidirectionnel, faible tension de commutation, faible fréquence de commutation et ainsi de suite [29].

2. Modélisation de la machine asynchrone à cage d'écureuil

Le modèle général de la machine asynchrone est obtenu en considérant les hypothèses simplificatrices suivantes:

- Entrefer constant et uniforme sur le pourtour des armatures et effet d'encoche négligé,
- Répartition spatiale sinusoïdale des champs l'induction dans l'entrefer,
- Caractéristique magnétique linéaire (saturation négligée) et à perméabilité constante,
- Effet de la température, effet de peau, hystérésis et courant de Foucault sont négligeables,
- Pertes ferromagnétiques négligeables.

Les conséquences de ces hypothèses sont :

- L'additivité des flux,
- La constance des inductances propres,
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

• Schéma d'un moteur asynchrone triphasé

On peut représenter la machine asynchrone schématiquement par les trois enroulements de phase du stator S_A, S_B, S_C . ainsi, que les trois enroulements du rotor R_A, R_B, R_C [30].

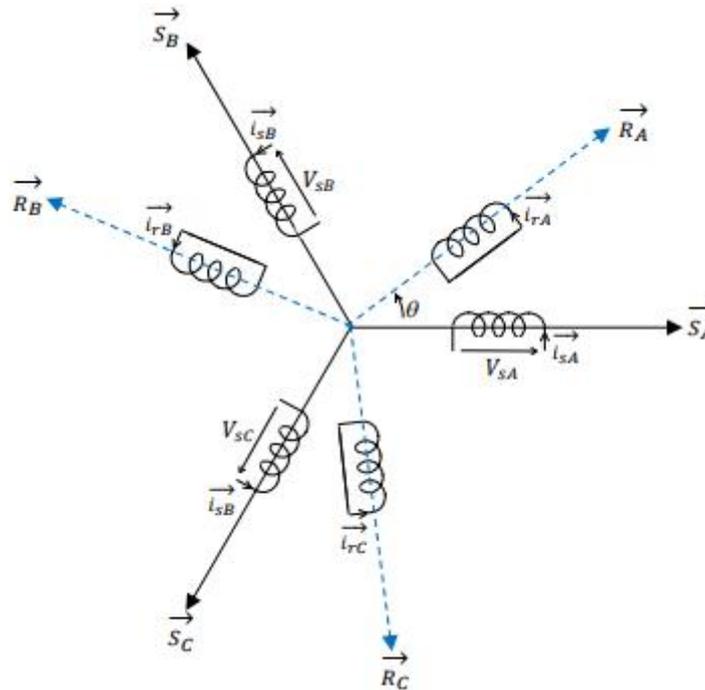


Figure.II.1: Représentation des enroulements statoriques et rotoriques de la MAS

De plus, les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles-mêmes et θ est l'angle électrique entre l'axe de la phase S_A statoriques et la phase R_A rotoriques [31].

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on peut écrire pour chacun des six enroulements statoriques et rotoriques, l'équation électrique suivante:

$$v = Ri + \frac{d\Phi}{dt} \quad (\text{II.1})$$

Avec v, i et Φ représentent respectivement la tension, le courant et le flux.

On résume l'écriture de la relation (II-1) par l'écriture matricielle condensé comme suite :

Pour l'ensemble des phases au stator [32].

$$v_{sabc} = [R_s][i_{sabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) [\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.2})$$

$$v_{rabc} = [R_r][i_{rabc}] + \left(\frac{d}{dt}\right) [\Phi_{rabc}] = 0 \quad (\text{II.3})$$

On désigne par :

$[i_{sabc}] = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T$ La matrice des courants au stator.

$[i_{rabc}] = [i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$ La matrice des courants au rotor.

$[v_{sabc}] = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs}]^T$ La matrice des tensions au stator.

$[v_{rabc}] = [v_{ar} \ v_{rb} \ v_{rs}]^T$ La matrice des tensions au rotor.

$[\Phi_{sabc}] = [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T$ La matrice des flux du couplage magnétique de la machine au stator.

$[\Phi_{rabc}] = [\Phi_{ar} \ \Phi_{br} \ \Phi_{cr}]^T$ La matrice des flux du couplage magnétique de la machine au rotor.

R_s : La résistance d'un enroulement réel du stator

R_r : La résistance d'un enroulement fictif(non mesurable) rotorique.

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante:

$$\begin{bmatrix} [\Phi_s] \\ [\Phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} [i_s] \\ i_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

Ou l_s : L'inductance propre d'un enroulement réel du stator.

Ou l_r : L'inductance propre d'un enroulement factif du rotor.

$$[M_{sr}] = [M_{rs}] = M_{rs} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Ou

M_{rs} : Représente la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre phase du stator/rotor

Equations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire de la variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) [31].

L'équation du mouvement de la machine est :

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_r \Omega \quad (\text{II.6})$$

J : Moment d'inertie des masses tournantes.

C_r : Couple résistance imposé à l'arbre de la machine.

Ω : Vitesse angulaire.

C_{em} : Couple électromagnétique.

f_r : Coefficient de frottement visqueux.

$(f_r \cdot \Omega)$: Terme de couple de frottement visqueux.

3. Transformation du système triphasé

3.1. Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone à cage d'écureuil

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée-biphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère fixe (abc) vers le repère mobile (dq). Les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider pour simplifier ces équations. Ceci se fait en liant les θ_s et θ_r angles par la relation [33]:

$$\theta_s = \theta + \theta_r \quad (\text{II.7})$$

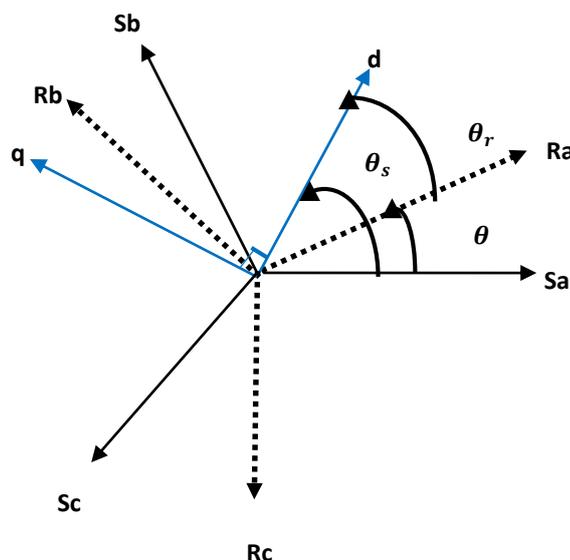


Figure II.2: Passage du système triphasé au système biphasé et inversement

3.1.1. Équation électrique d'un enroulement triphasé dans les axes d et q

Le passage du système triphasé au système biphasé est assuré par la matrice de passage directe et inverse [32]

$$[v_{dq0}] = [P][v_{abc}] \quad (\text{II.8})$$

$$[v_{abc}] = [P]^{-1}[v_{dq0}] \quad (\text{II.9})$$

Tel-que :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$v_{abc} = [R][i_{abc}] + \left(\frac{d}{dt}\right)[\Phi_{abc}] \quad (\text{II.12})$$

$$[R] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

La transformation $[P]^{-1}$

$$[P]^{-1}[v_{dq0}] = [R][P]^{-1}[i_{dq0}] + \left(\frac{d}{dt}\right)[P]^{-1}[v_{dq0}] \quad (\text{II.14})$$

En multipliant l'équation (II.10) par $[P]$ on aura :

$$[v_{dq0}] = [R][i_{dq0}] + \left(\frac{d}{dt}\right)[\Phi_{dq0}] + [P] \left(\frac{d[P]^{-1}}{dt}\right) [\Phi_{dq0}] \quad (\text{II.15})$$

On obtient finalement, En appliquant alors la transformation de Park aux équations statoriques avec un angle rotation θ_s , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq

$$v_{sd} = R_s i_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sq} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \quad (\text{II.16})$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \quad (\text{II.17})$$

$$v_{s0} = R_s i_{s0} + \frac{d\Phi_{s0}}{dt} \quad (\text{II.18})$$

De même, en l'appliquant aux équations rotoriques avec un angle de rotation θ_r , on obtient les équations rotoriques dans le repère dq

$$v_{rd} = R_r i_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{rq} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \quad (\text{II.19})$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{rd} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \quad (\text{II.20})$$

$$v_{r0} = R_r i_{r0} + \frac{d\Phi_{r0}}{dt} \quad (\text{II.21})$$

En supposant le système parfaitement équilibré, les équations (II.18) et (II.21) qui correspondent aux composantes homopolaires, sont identiquement nulles. Suite à l'hypothèse de linéarité des matériaux, les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante [15]:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$L_s = l_s + M$: Inductance cyclique statorique

$L_r = l_r + M$: Inductance cyclique rotorique

l_s : Inductance de fuite statorique.

l_r : Inductance de fuite rotorique.

M : Mutuelle inductance.

Ainsi, en partant des équations (II.16), (II.17), (II.19), (II.20), et en utilisant la relation (II.22) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère dq [4]:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \\ v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & 0 & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_s M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r \omega M & 0 & \omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

3.1.2. Couple électromagnétique

$$T_{em} = P.M(i_{rd}i_{sq} - i_{rq}i_{sd}) \quad (\text{II.24})$$

$$T_{em} = P.\frac{M}{L_r}(\Phi_{rd}i_{sq} - \Phi_{rq}i_{sd}) \quad (\text{II.25})$$

4. Auto-amorçage de la MAS par un convertisseur statique

- **Modèle mathématique de l'auto-amorçage [20]**

Pour décrire les équations de l'auto-amorçage. Deux cas de figure sont à considérer :

— Lorsque la diode est passante, on peut écrire les équations suivantes :

$$i_{dc} = i_b - i_R - i_c \quad (\text{II.26})$$

$$i_{dc} = \frac{E-V_{dc}}{r_b} - C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.27})$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = -i_{dc} + \frac{E-V_{dc}}{r_b} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.28})$$

Par conséquent, la tension redressée V_{dc} est donnée par la relation suivante :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} \left[-i_{dc} + \frac{E-V_{dc}}{r_b} - \frac{V_{dc}}{R} \right] dt \quad (\text{II.29})$$

-lorsque la diode se bloque :

$$i_{dc} = -i_c - i_R \quad (\text{II.30})$$

$$i_{dc} = -C \frac{dV_{dc}}{dt} - \frac{V_{dc}}{R} \quad (\text{II.31})$$

$$\frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} \left[-i_{dc} - \frac{V_{dc}}{R} \right] \quad (\text{II.32})$$

Dans ce cas, la tension redressée V_{dc} est donnée par la relation suivante :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C} \left[-i_{dc} - \frac{V_{dc}}{R} \right] dt \quad (\text{II.33})$$

La diode est bloquée lorsque $V_{dc} \geq E$

Avec :

R: Représente la résistance vue du côté continu.

r_b : La résistance interne de la batterie.

E: Tension aux bornes de la batterie.

V_{dc} : Tension redressée.

i_{dc} : Courant redressé.

i_c : Courant dans la capacité.

i_R : Courant dans la charge résistive.

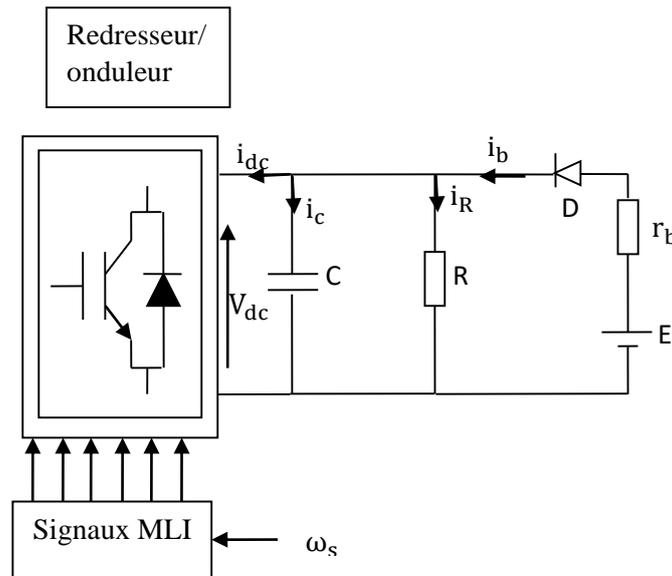


Figure.II.3: Auto-amorçage par un convertisseur à MLI

5. Redresseurs multiniveaux

Les onduleurs à trois niveaux sont réversibles par leur structure. Ils peuvent fonctionner en onduleur et ainsi transférer de l'énergie de la source de tension continu à la source de courant alternatif ou bien fonctionner en redresseur et assurer alors le transfert énergétique dans le sens inverse [34].

5.1. Structure de redresseur à deux niveaux

Les redresseurs sont des convertisseurs statiques de type continu ou alternatif, un redresseur se définit comme un appareil électrique de puissance. Ils sont (statiques) car ils ne font intervenir aucun mouvement mécanique (contrairement aux moteurs).

Le redresseur triphasé est l'assemblage de trois demi pont monophasés chacun est formé de deux « interrupteurs » en série (($K_{a1}K_{a2}$), ($K_{b1}K_{b2}$)et($K_{c1}K_{c2}$)).

Les interrupteurs d'un même demi-point doivent être complémentaires pour que la source de tension v_{dc} ne soit jamais en court-circuit. Pour que les circuits des courants i_a , i_b et i_c ne soient jamais ouverts [35].

Pour que les six interrupteurs puissent imposer les tensions de sortie, quels que soient les courants i_a, i_b, i_c il faut que ces interrupteurs soient bidirectionnels en courant. Chacun d'eux est formé d'un semi-conducteur à ouverture et fermeture commandées et d'une diode montée en antiparallèle (figure (II.3b)) K_{a1} et D_{a1} , K_{a2} et D_{a2} , K_{b1} et D_{b1} ...

- La branche 1 correspond à l'état bloquant du transistor et de la diode (figure (II.4a)).

- La branche 2 correspond à la conduction du transistor.
- La branche 3 correspond à la conduction de la diode.

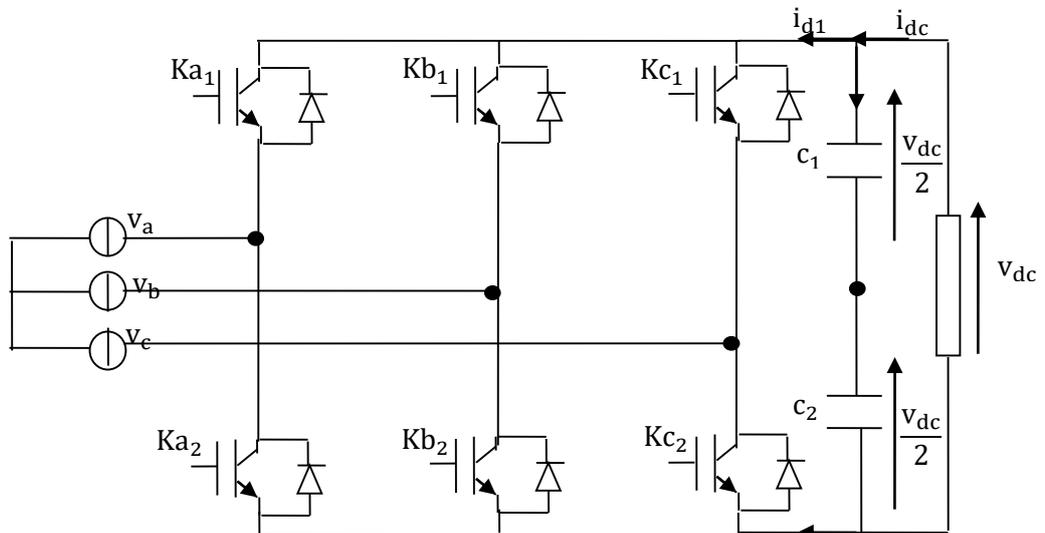


Figure.II.4: schéma représentatif d'un redresseur triphasé à deux niveaux de tension

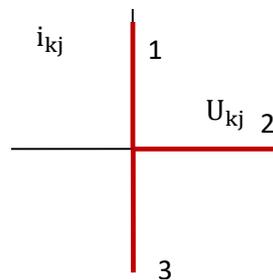


Figure.II.4.a: la caractéristique statique en parallèle d'un Transistor et d'une diode

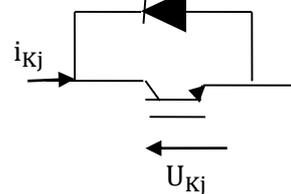


Figure.II.4.b: Mise en anti parallèle d'un transistor et d'une diode

5.1.1. Fonction de commutation

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouvert ou fermé. Chaque interrupteur K_{xi} est associé à une fonction de connexion S_{xi} , tel que [36]:

$$\begin{cases} S_{xi} = 1 \text{ si } K_{xi} \text{ fermé} \\ S_{xi} = 0 \text{ si } K_{xi} \text{ ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Avec $x=a,b,c$: Indicateur de phase; $i=1, 2$: Numéro de l'interrupteur du bras x .

5.1.2. Commande complémentaire des interrupteurs

Sachant que la fermeture ou l'ouverture simultanée des deux interrupteurs du même bras conduit au risque de destruction du condensateur et des composants semi-conducteurs soit par surintensité soit par surtension, il est indispensable de réaliser une commande complémentaire entre les deux interrupteurs $K_{x1}K_{x2}$. Ce qui conduit à la relation logique suivante [37]:

$$S_{x2} = \bar{S}_{x1} = 1 - S_{x1} \quad (\text{II.35})$$

5.1.3. Tension de sortie

Le redresseur de tension à deux niveaux délivre deux niveaux de tensions $\frac{V_{dc}}{2}$ ou $-\frac{V_{dc}}{2}$ suivant la fonction de connexion S_{x1} comme illustré dans l'équation [37]

$$V_{xo} = \begin{cases} \frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_{x1} = 1 (S_{x2} = 0) \\ -\frac{V_{dc}}{2} & \text{si } S_{x1} = 0 (S_{x2} = 1) \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Avec V_{xoc} est la tension simple entre la phase x et le point milieu o.

L'équation (II.36) peut être écrite sous la forme suivante :

$$v_{xo} = \frac{V_{dc}}{2} (S_{x1} - 1) \quad (\text{II.37})$$

➤ Les trois tensions phases-point milieu v_{ao} , v_{bo} et v_{co} et sont exprimées par :

$$\begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{2} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - 1 \\ 2S_{b2} - 1 \\ 2S_{c3} - 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

➤ Les tensions composées entre phases v_{ab} , v_{bc} et v_{ca} deviennent donc :

$$\begin{bmatrix} v_{ab} \\ v_{bc} \\ v_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bo} - v_{co} \\ v_{co} - v_{ao} \end{bmatrix} = V_{dc} \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.39})$$

➤ Les grandeurs que l'on souhaite contrôler grâce à redresseur sont les tensions simples côté charge (v_a, v_b, v_c). Pour une charge triphasée équilibrée, ces tensions vérifient la relation suivante :

$$v_a + v_b + v_c = 0 \quad (\text{II.40})$$

➤ Les tensions phases-neutre sont données, en fonction des tensions composées et des tensions phases point milieu, par:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} \quad (\text{II.41})$$

Et en fonction des fonctions de connexions par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

5.2. Redresseur à trois niveaux

5.2.1. Structure de redresseur à trois niveaux

La structure de ce type de redresseur est présentée à la figure II.5 Ce redresseur est composé de trois bras, chaque bras ayant quatre interrupteurs bidirectionnels, réalisés par la mise en antiparallèle d'un transistor et une diode. On suppose que la tension V_{dc} est divisée en égalité entre les deux capacités $v_{dc1} = v_{dc2} = \frac{v_{dc}}{2}$ On associe à chaque phase des diodes appelées diodes flottantes, qui servent à appliquer les différents niveaux de tension de la source continue [38].

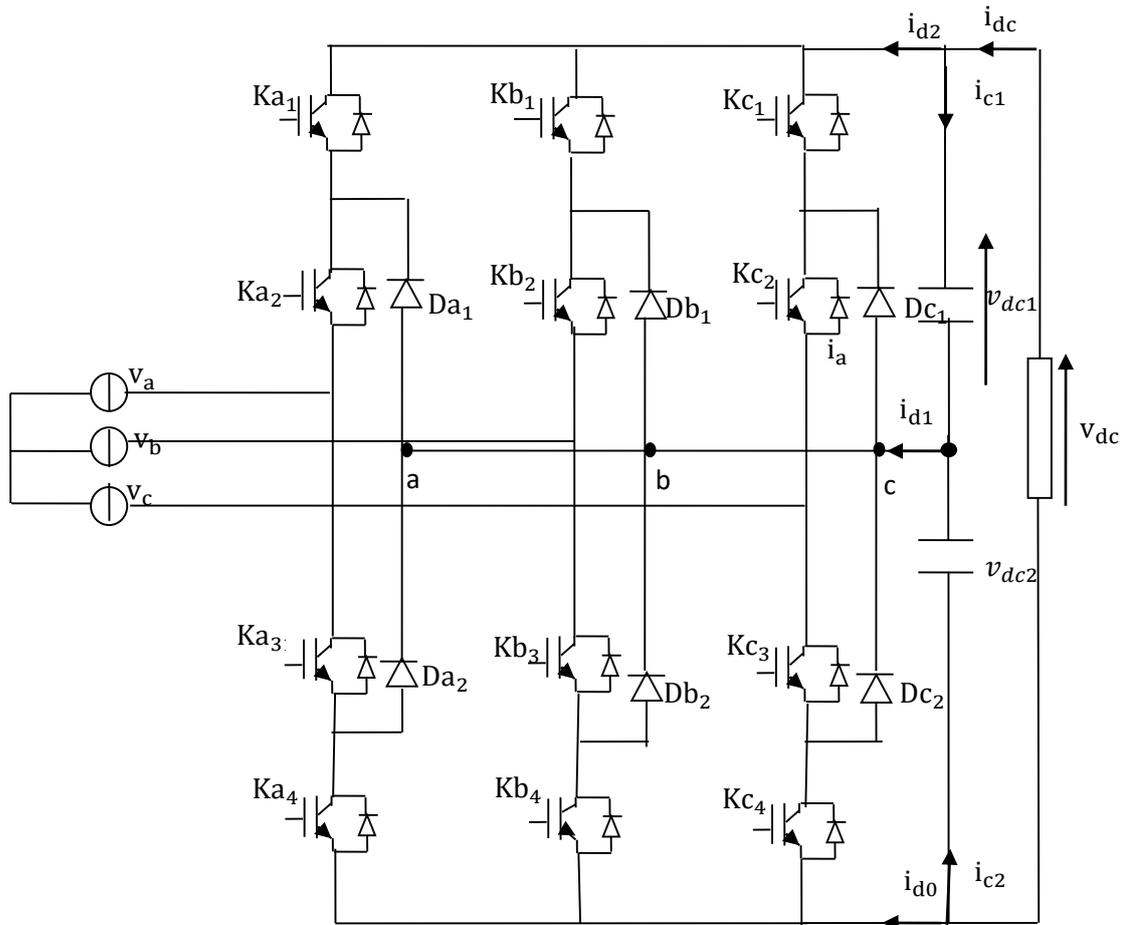


Figure.II.5: Structure d'un redresseur triphasé à structure NPC

Pour la complexité de la structure de redresseur a trois niveaux on présente chaque paire (transistor-diode) par un seul interrupteur bidirectionnel K_i (figure (II.5.a))et vue la symétrie de la structure, on présente la configuration d'un seul bras(figure(II.5.b))

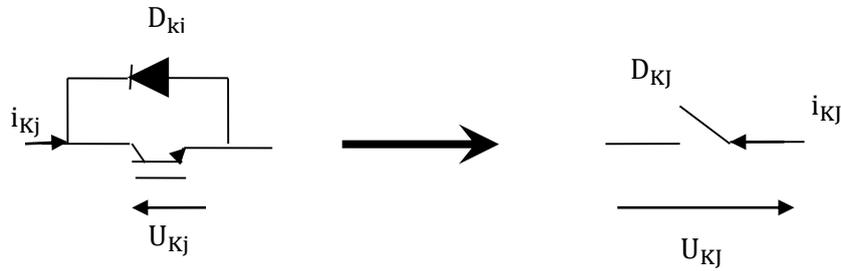


Figure II.5.a. Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode

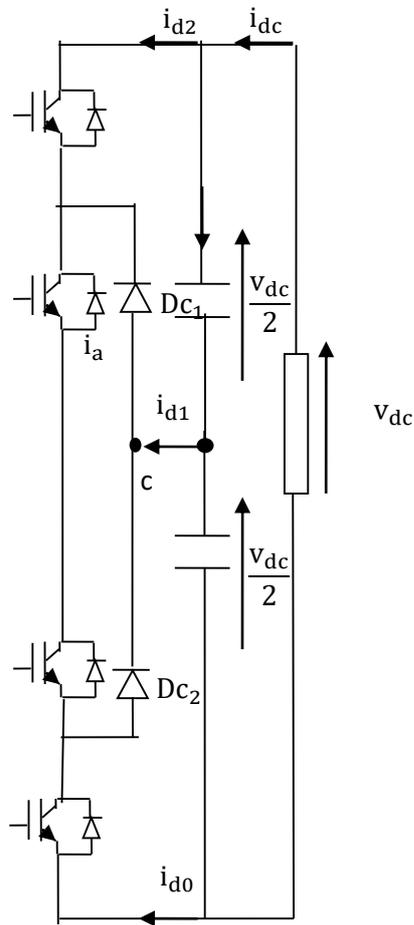


Figure II.5.b: Un bras redresseur à trois niveaux de type NPC

5.2.2 Etats d'un bras de l'onduleur [40]

En mode commandable, chaque bras de l'onduleur a trois états possibles

L'état 2: Les deux interrupteurs $K_{x1}K_{x2}$ sont fermés tandis que les deux interrupteurs $K_{x3}K_{x4}$ sont ouverts, la tension de sortie par rapport au neutre de la source(0) est $\frac{v_{dc}}{2}$.

L'état 0: Les deux interrupteurs $K_{x3}K_{x4}$ sont fermés tandis que les deux interrupteurs $K_{x1}K_{x2}$ sont ouverts, la tension de sortie par rapport au neutre de la source(0) est 0.

L'état 1: Les deux interrupteurs $K_{x2}K_{x3}$ sont fermés tandis que les deux interrupteurs $K_{x1}K_{x4}$ sont ouverts, la tension de sortie par rapport au neutre de la source(0) est $\frac{v_{dc}}{2}$.

5.2.3. Fonction de commutation

Les commutations établies par les interrupteurs, supposés idéaux, sont décrites par une fonction de connexion. Cette dernière décrit leurs états ouverts ou fermés. Chaque interrupteur K_{xi} est associé à une fonction de connexion S_{xi} tel que [40]:

$$\begin{cases} S_{xi} = 1 & \text{si } K_{xi} \text{ fermé} \\ S_{xi} = 0 & \text{si } K_{xi} \text{ ouvert} \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

Avec $i = 1, 2, 3, 4$: numéro de l'interrupteur du bras x

5.2.4. Commande complémentaire des interrupteurs

Afin d'éviter la destruction des composants soit par surintensité soit par surtension lors de la fermeture ou l'ouverture simultanées des quatre interrupteurs d'un seul bras, il est indispensable de prévoir une commande complémentaire entre les interrupteurs du même bras. Cette commande complémentaire est définie comme suit:

$$S_{x(j+2)} = \bar{S}_{xj} = S_{xj} - 1 \quad (\text{II.44})$$

Nous définissons pour chaque état h du bras x une fonction de connexion. Elle est notée F_x^h les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment, en fonction de celles des interrupteurs comme suite [41]

$$\begin{cases} F_x^2 = S_{x1}S_{x2} \\ F_x^1 = S_{x2}\bar{S}_{x1} \\ F_x^0 = \bar{S}_{x2}\bar{S}_{x1} \end{cases} \quad (\text{II.45})$$

5.2.5. Tension de sortie

Les tensions de sortie par rapport au point neutre de la source continue sont exprimées par [37]:

$$V_{x0} = \begin{cases} V_c & \text{si } F_x^2 = 1 \\ 0 & \text{si } F_x^1 = 1 \\ -V_c & \text{si } F_x^0 = 1 \end{cases} \quad (\text{II.46})$$

L'équation (II.46) peut être exprimée par la forme suivante :

$$V_{x0} = V_c(F_x^2 - F_x^0) \quad (II.47)$$

➤ Les trois tensions phases-point milieu, et $V_{a0}V_{b0}V_{c0}$ on peut écrire :

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} = V_c \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (II.48)$$

➤ Les tensions composées, $V_{ab}V_{bc}V_{ac}$ aussi sont données comme suit: Les tensions

$$\text{composées} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{a0} - V_{b0} \\ V_{b0} - V_{c0} \\ V_{c0} - V_{a0} \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}_c \begin{bmatrix} F_a^2 - F_a^0 \\ F_b^2 - F_b^0 \\ F_c^2 - F_c^0 \end{bmatrix} \quad (II.49)$$

➤ Les tensions simples aux bornes de la charge seront données, en fonction des tensions composées puis en fonction des tensions phases-point milieu, par:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{bmatrix} \quad (II.50)$$

A partir des relations (II.49) et (II.50), nous obtenons le système matriciel donnant l'expression des tensions simples aux bornes de la charge en fonction des fonctions de connexions.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (F_a^2 - F_a^0) \\ (F_b^2 - F_b^0) \\ (F_c^2 - F_c^0) \end{bmatrix} \quad (II.51)$$

$$\begin{cases} i_{d1} = F_a^2 i_a + F_b^2 i_b + F_c^2 i_c \\ i_{d2} = F_a^1 i_a + F_b^1 i_b + F_c^1 i_c \\ i_{d3} = F_a^0 i_a + F_b^0 i_b + F_c^0 i_c \end{cases} \quad (II.52)$$

6. Modulation de largeur d'impulsion

Afin de générer les impulsions de la commande du convertisseur à (2 ou 3 niveaux) nous allons appliquer une technique de la modulation triangulo-sinusoïdale MLI; en anglais (*Pulse Width Modulation*, soit *PWM*).

Le principe de cette stratégie consiste à utiliser l'intersection d'une onde de référence ou modulante sinusoïdale d'amplitude A_r et de fréquence f_r , avec une porteuse d'amplitude A_p et de fréquence f_p , chaque comparaison donne 0 si la porteuse est supérieure ou égale à la référence, 1 dans le cas contraire [42].

La modulation de largeur d'impulsion consiste à comparer le signal de référence avec un ensemble de porteuses (signal triangulaire ou en dents de scie). Le nombre de porteuses est inférieur d'une unité par rapport au nombre de niveaux souhaités.

La comparaison permet de produire un signal modulé qui servira à déterminer les signaux de gâchettes des interrupteurs [26].

En effet chaque niveau du signal modulé correspond à un niveau de tension de sortie et sera obtenu avec un chemin de courant bien précis découlant de l'état des interrupteurs du convertisseur.

6.1. Caractéristique de la MLI sinus triangle

Si la tension de référence est sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la commande ; l'indice de modulation m et le taux de modulation r .

L'indice de modulation m est égal au rapport de la fréquence de la porteuse sur celle de la référence. La valeur de cet indice est sujette à un compromis entre un bon rejet des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur qui se détériore à cause des pertes de commutations.

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (\text{II.53})$$

Où :

f_r est la fréquence de la tension de référence.

f_p : fréquence de la tension de la porteuse.

Le taux de modulation r est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence sur la valeur de crête de la porteuse. Dans la pratique, on s'arrange toujours à avoir un taux de modulation inférieur à l'unité, de façon à éviter les ratés de commutation qui pourront entraîner des discontinuités de fonctionnement, et en particulier dans les applications à vitesse variable où l'on fait varier l'amplitude de la tension de référence[43][44].

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{II.54})$$

Où V_r est l'amplitude de la tension de référence et V_p est celle de la porteuse.

La modulation sinusoïdale avec porteuse bidirectionnelle Le principe de cette technique est le même que celui de la modulation sinusoïdale, sauf que la porteuse triangulaire est bidirectionnelle (bipolaire) (II.13)

Dans le cas convertisseur à trois niveaux, on utilise deux porteuses bipolaires (A_{p1}, A_{p2}) qui sont déphasés d'un demi période ($T_p/2$) l'une par rapport à l'autre, définies comme suit [44][45]:

$$\begin{cases} V_{p1}(t) \begin{cases} V_p \left(4 \cdot \frac{t}{T_p} - 1 \right) & \text{si } 0 < t \leq \frac{T_p}{2} \\ V_p \left(-4 \cdot \frac{t}{T_p} + 3 \right) & \text{si } \frac{T_p}{2} < t \leq T_p \end{cases} \\ V_{p2}(t) = -V_{p1} \end{cases} \quad (\text{II.55})$$

Les intersections entre les tensions de références et la porteuse donnent les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs.

7. Résultats des simulations de la MAS et Onduleur

▪ Machine Asynchrone

Un essai de démarrage à vide de fonctionnement en moteur de la machine asynchrone à cage d'écureuil a été simulé sous MATLAB/SIMULINK. Le moteur est alimenté par une source triphasée équilibré (230V/50Hz), cela permet de mettre en évidence le comportement du moteur asynchrone. Les résultats de simulation sont représentés dans les Figures suivantes :

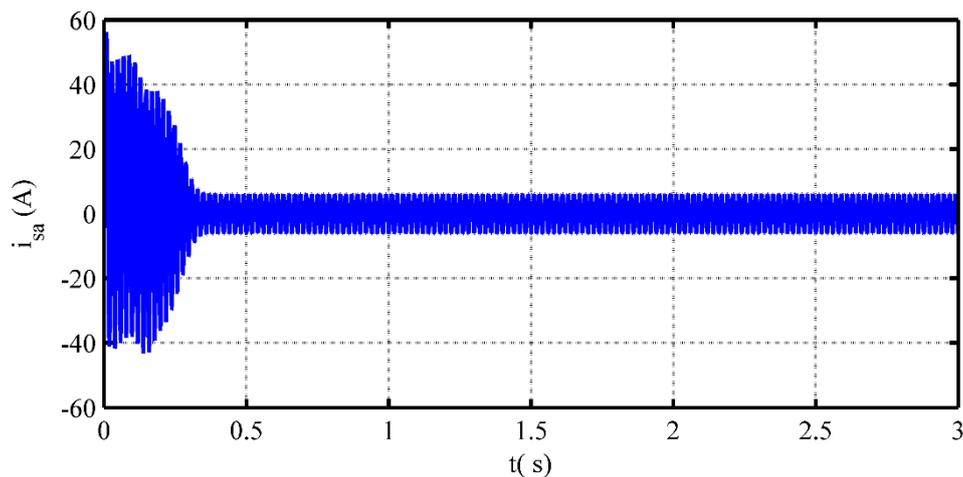


Figure II.6: Allure du courant statorique d'une phase

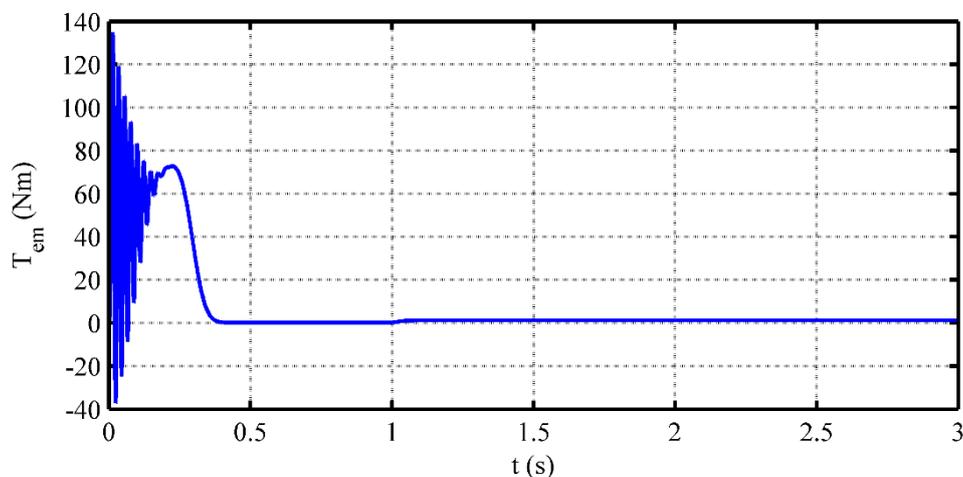


Figure II.7: Evolution du couple électromagnétique

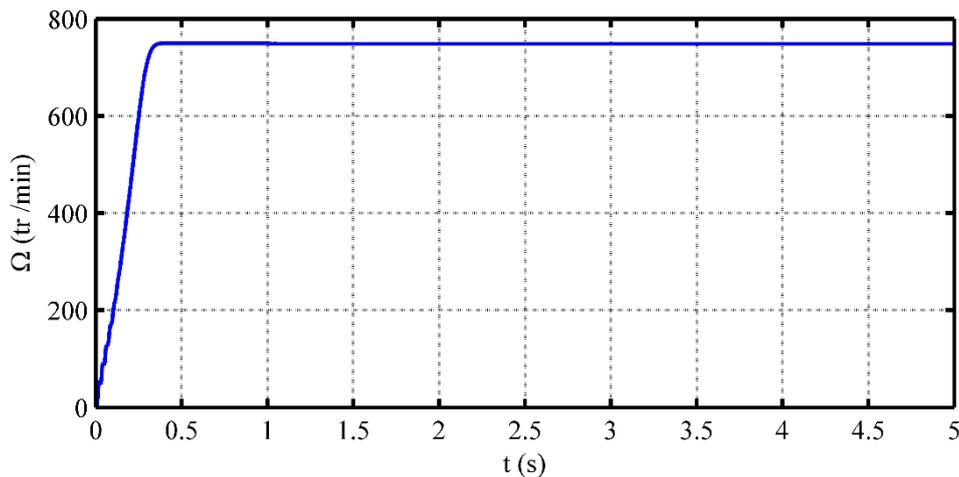


Figure II.8: Evolution temporelle la vitesse

La figure (II.6) représente l'évolution du courant statorique du moteur fonctionnement à vide, on remarque qu'ils prennent la même forme en bouteille, il atteint des valeurs importantes lors de démarrage (régime transitoire) puis se stabiliser en régime permanent à une valeur constante. L'évolution du couple est illustrée par la figure (II.7) Nous remarquons la présence des oscillations au démarrage ou le couple atteint des valeurs importantes qui représente le régime transitoire puis se stabilise en régime permanent.

La figure (II.8) illustre l'évolution temporelle de la vitesse de rotation, en régime transitoire et en régime permanent, dans la phase transitoire en trouve de légère ondulation celles-ci sont dues aux oscillations du couple. Ensuite elle évolue vers une valeur proche de la vitesse de synchronisme à 750 tr/mn.

▪ **Onduleur :**

Pour générer les impulsions de commande MLI du convertisseur à deux niveaux, une seule porteuse triangulaires est nécessaire elle est ensuite comparée aux signaux sinusoïdaux déphasés entre eux de 120° (modulante); Dans les cas de redresseur de trois niveaux, on utilise deux porteuses triangulaires bipolaires déphasées l'un par rapport à l'autre d'une demi-période. Après la réalisation de la simulation, on obtient les formes d'ondes présentées ci-dessous

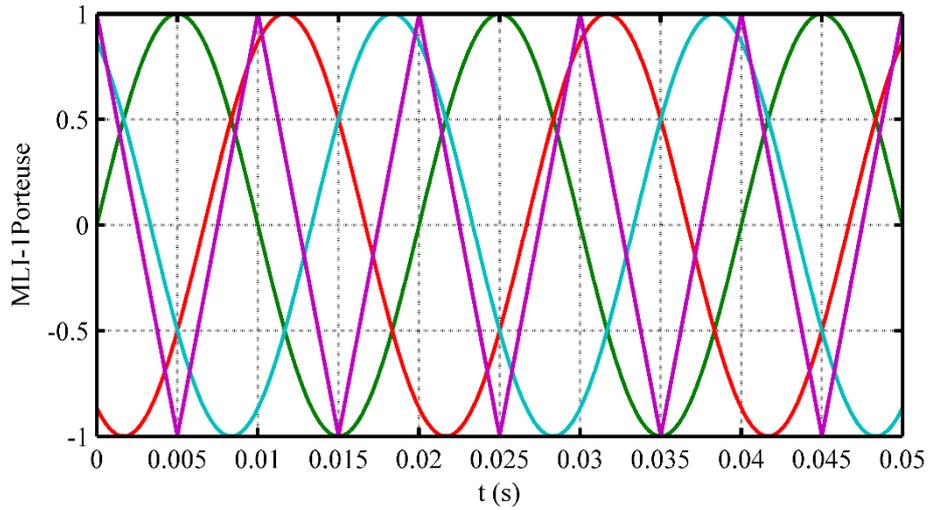


Figure .II.9: MLI à deux porteuses pour un onduleur à 2N

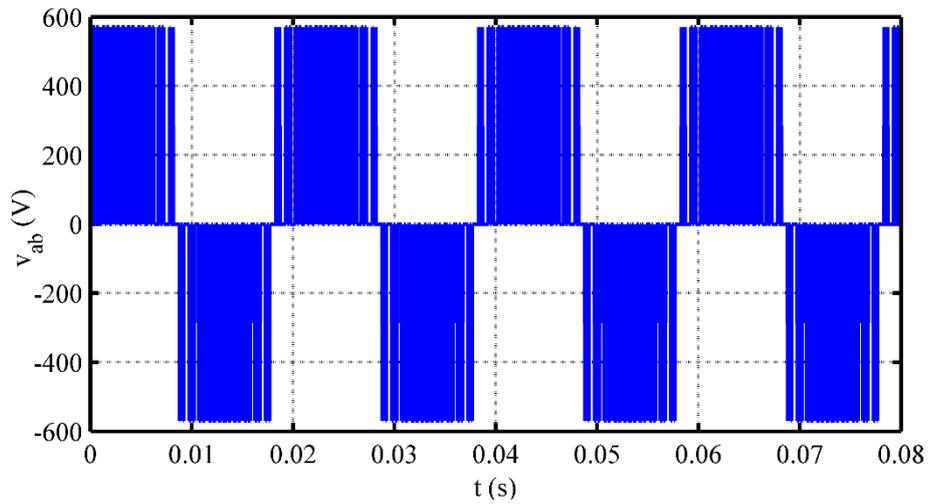


Figure.II.10: L'allure de la tension composé v_{ab} à la sortie de l'onduleur à 2N

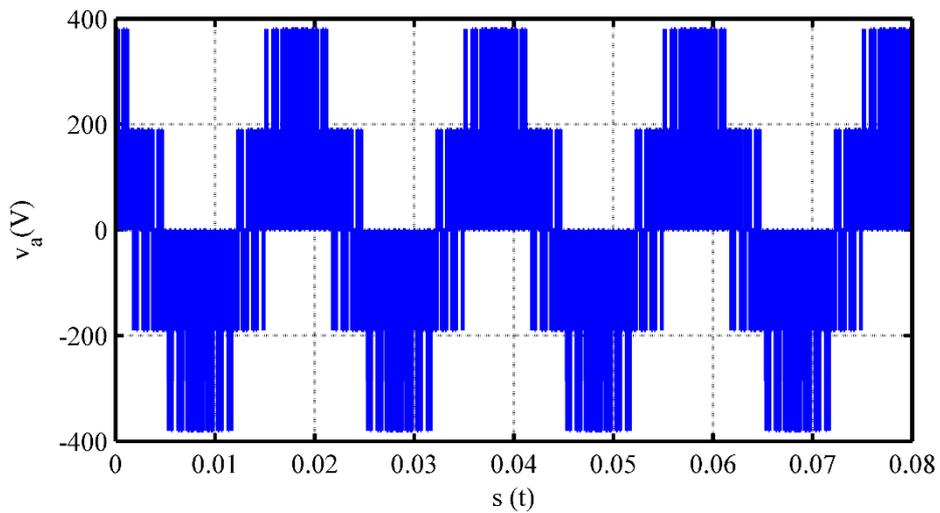


Figure.II.11: L'allure de la tension simple de la phase1 à la sortie de l'onduleur à 2N

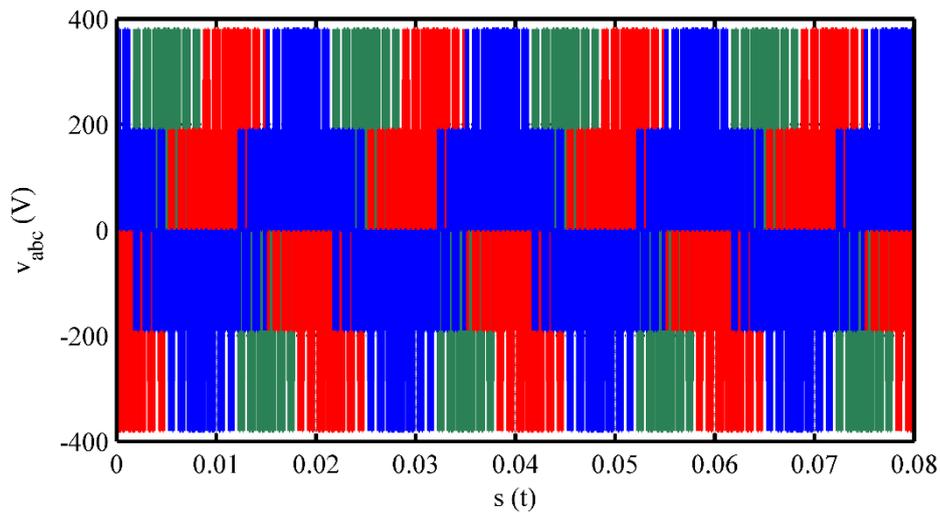


Figure.II.12: L'allure des tensions simples V_{abc} à la sortie de l'onduleur à 2N

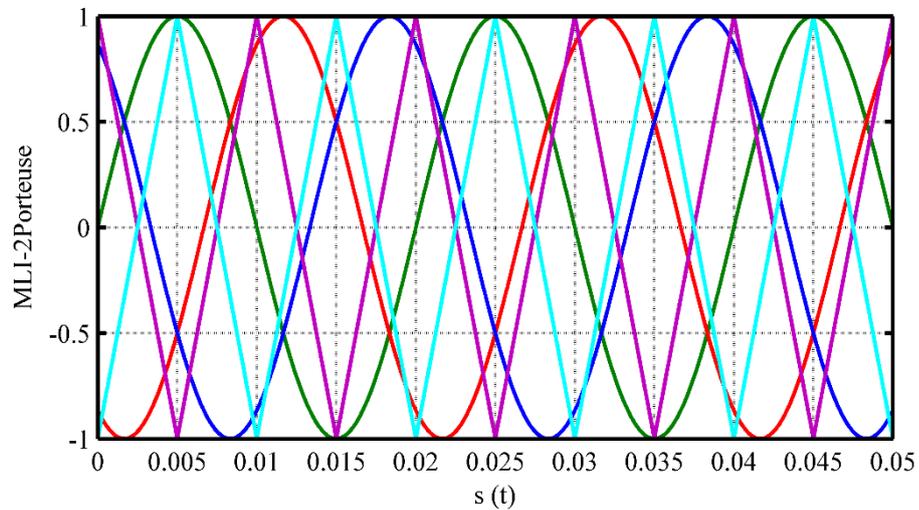


Figure.II.13: MLI à deux porteuses pour un onduleur à 3N

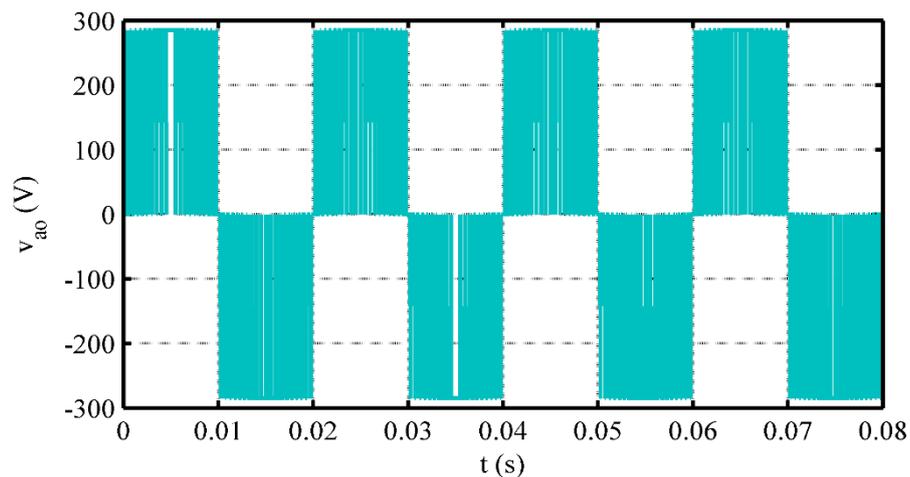


Figure.II.14: L'allure de la tension entre phase a et le point milieu o à 3N

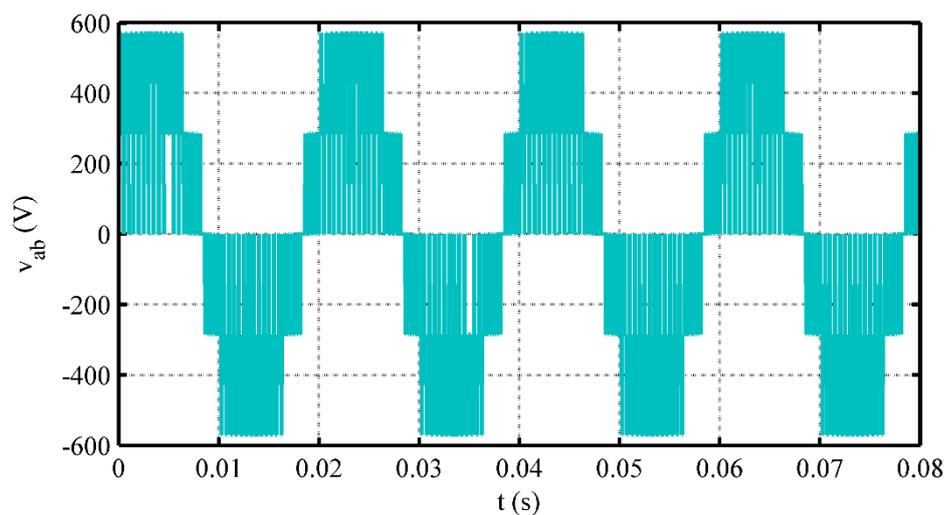


Figure.II.15: L'allure de la tension composé V_{ab} à la sortie de l'onduleur à 3N

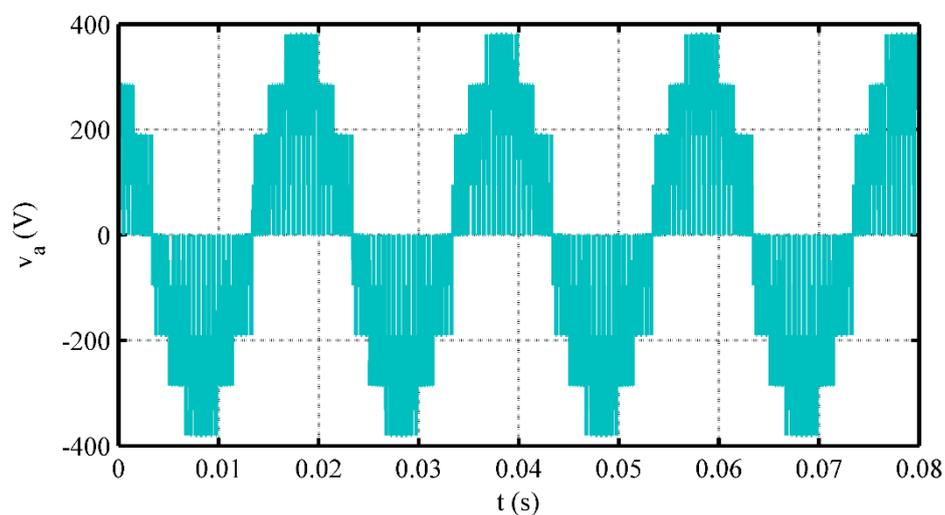


Figure.II.16: L'allure de la tension simple de la phase1 à la sortie de l'onduleur à 3N

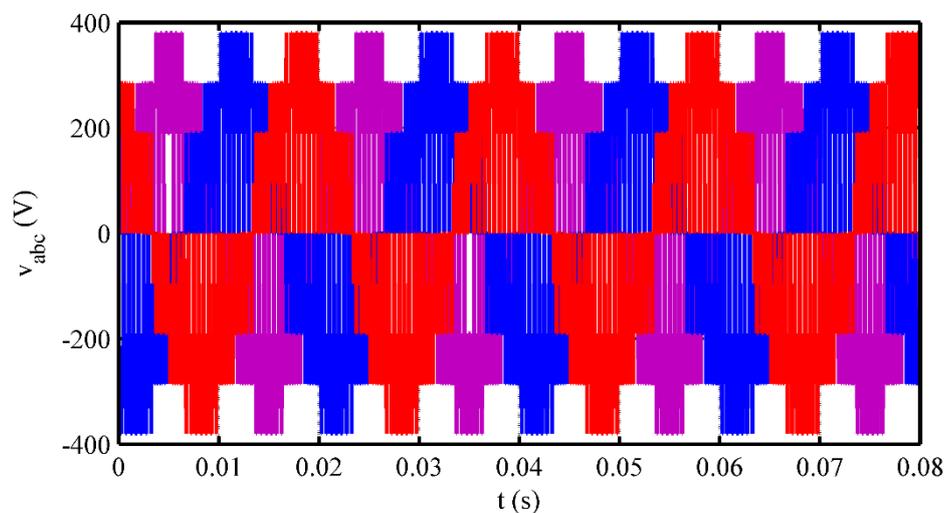


Figure.II.17: L'allure des tensions simples V_{abc} à la sortie de l'onduleur à 3N

8. Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la modélisation de la machine asynchrone fonctionnant en génératrice autonome. Après avoir appliqué la transformation de Park, on a élaboré le modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil et par la suite élaboré un modèle mathématique de l'auto-amorçage par un convertisseur statique.

On a présenté et discuté les résultats de la simulation de cette machine lors du fonctionnement à vide. Comme nous avons présenté un redresseur multi – niveaux et leur principes de fonctionnements, le modèle de convertisseur à deux niveaux et a trois niveaux qui est commandé par une MLI, et les résultats de sa simulation.

Le chapitre suivant est consacré à l'élaboration de la stratégie de commande du système étudié en utilisant une commande vectoriel.

CHAPITRE III

1. INTRODUCTION

La commande de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, et du flux [46]. La difficulté majeure rencontrée dans la commande de la machine asynchrone réside dans le fait que le couple et le flux sont des variables fortement couplées et que toute action sur l'une d'elles se répercute sur l'autre. Par contre dans la machine à courant continu à excitation séparée, ces deux variables sont naturellement découplées, ce qui explique la simplicité de la commande de cette machine [47].

Au cours de ces dernières années, des méthodes de commande ont été mises au point, permettant d'assurer le découplage entre les commandes de flux et du couple de la machine asynchrone. Actuellement, la méthode la plus utilisée est donnée par la théorie de commande par flux orienté [42].

Dans ce chapitre en présenterons la machine asynchrone contrôlée par la commande vectorielle et alimentée par redresseur à deux et à trois niveaux.

2. Commande à flux orienté

Le but de la commande vectorielle est d'éliminer le problème de couplage entre le stator et le rotor en dissociant le courant statorique en deux composantes en quadrature, de telle sorte que l'une des composantes commande le flux et l'autre commande le couple. Ceci permet de se ramener à des fonctionnements comparables à ceux d'une machine à courant continu à excitation séparée (figure.III.1) où le courant inducteur contrôle le flux et le courant induit contrôle le couple [42].

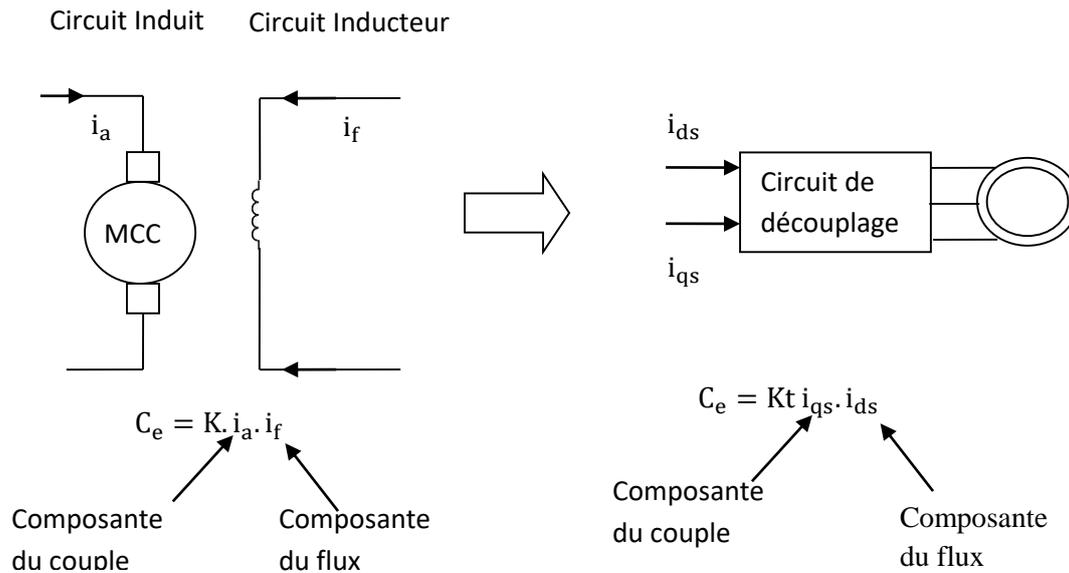


Figure.III.1: Analogie de la machine asynchrone avec le moteur à courant continu

3. Choix d'orientation de flux

Le choix des axes d'orientation peut être fait selon l'une des directions des flux de la machine à savoir le flux rotorique, statorique ou d'entrefer.

* $\Phi_{rq} = 0$ et $\Phi_r = \Phi_{rd}$: c'est le flux rotorique qui orienté.

* $\Phi_{sd} = 0$ et $\Phi_s = \Phi_{sq}$: c'est le flux statorique qui orienté.

* $\Phi_{mq} = 0$ et $\Phi_m = \Phi_{md}$: c'est le flux d'entrefer qui orienté.

Dans les trois cas le couple est proportionnel au produit du flux par la composante du courant statorique en quadrature avec le flux.

L'orientation du flux rotorique permet d'obtenir un couple de démarrage important et nécessite la connaissance des paramètres rotorique [48].

Dans tout ce qui va suivre l'orientation du flux rotorique est la méthode qui sera retenue.

4. Principe du contrôle par flux orienté

Lorsque le champ rotorique est orienté, et avec l'hypothèse de linéarité autour d'un point de fonctionnement, le comportement de la machine asynchrone est décrit par les équations ci-après [15]. Partant des équations (II.16), (II.17), (II.19) et (II.20), nous obtenons :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \quad (\text{III.1})$$

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \quad (\text{III.2})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rd} - \omega_s \cdot \Phi_{rq} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} \quad (\text{III.3})$$

$$0 = R_r \cdot i_{rq} + \omega_s \cdot \Phi_{rd} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \quad (\text{III.4})$$

Les différents flux sont exprimés par rapport aux courants, pour une saturation constante, sous les formes suivant :

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot i_{sd} + M \cdot i_{rd} \quad (\text{III.5})$$

$$\Phi_{sq} = L_s \cdot i_{sq} + M \cdot i_{rq} \quad (\text{III.6})$$

$$\Phi_{rd} = L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd} \quad (\text{III.7})$$

$$\Phi_{rq} = L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq} \quad (\text{III.8})$$

Comme $\Phi_{rd} = \Phi_r$ et $\Phi_{rq} = 0$, alors les dérivées temporelles des flux sont nulles en régime permanent $\frac{d\Phi_{rd}}{dt} = \frac{d\Phi_r}{dt} = 0$ et $\frac{d\Phi_{rq}}{dt} = 0$

A partir de la relation (III.3), on obtient:

$$\frac{d\Phi_{rq}}{dt} = -R_r i_{rd} \quad (\text{III.9})$$

$$\Phi_r = -\frac{R_r \cdot i_{rq}}{\omega_r} \quad (\text{III.10})$$

De plus, les courants rotoriques peuvent être exprimés, à partir des relations (III.7) et (III.8) de la manière suivante :

$$i_{rd} = \frac{\Phi_r - M \cdot i_{sd}}{L_r} \quad (\text{III.11})$$

$$i_{rq} = -\frac{M \cdot i_{sq}}{L_r} \quad (\text{III.12})$$

4.1. Expressions des tensions statoriques avec flux rotorique orienté

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

effectués uniquement pour v_{sd} sachant que le raisonnement est identique pour v_{sq} . En dérivant le flux Φ_{sd} dont l'expression est donnée par (III.5), [49] par rapport au temps, on obtient :

$$\frac{d\Phi_{sd}}{dt} = L_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} + M \frac{di_{rd}}{dt} \quad (III.13)$$

Dans l'équation (III.1), on remplace ensuite Φ_{sq} (relation (III.6)) et $\frac{d\Phi_{sd}}{dt}$ par leurs expressions respectives. Cela aboutit à :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + L_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot L_s \cdot i_{sq} + M \frac{di_{rd}}{dt} - \omega_s \cdot M \cdot i_{rq} \quad (III.14)$$

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \left[L_s + \frac{M^2}{L_r} \right] \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \left[L_s + \frac{M^2}{L_r} \right] \cdot i_{sq} + \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (III.15)$$

Sachant que le coefficient de dispersion s'écrit $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r \cdot L_s}$ la relation précédente devient :

$$v_{sd} = R_s \cdot i_{sd} + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sq} + \omega_s \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (III.16)$$

De manière identique, on peut réécrire v_{sq} sous la forme suivante :

$$v_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \sigma \cdot L_s \cdot \frac{di_{sq}}{dt} - \omega_s \cdot \sigma \cdot L_s \cdot i_{sd} + \omega_s \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (III.17)$$

Le repère orienté impose $\Phi_{rq}=0$ Connaissant le courant i_{sd} , l'expression du couple électromagnétique donnée par la relation (II.25) devient alors :

$$T_{em} = P \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot i_{sq} \quad (III.18)$$

Pour mettre en œuvre la stratégie de commande, il faut pouvoir estimer Φ_r et ω_s pour l'application de la transformation de Park.

4.2. Estimation du flux rotorique et de la pulsation statorique

Dans la relation (III.9), on remplace i_{rd} par sa valeur exprimée en (III.11), il vient :

$$\Phi_r = \frac{M \cdot i_{sd}}{1 + T_r \cdot s} \quad (III.19)$$

Avec

T_r : Constante de temps rotorique. (s) : opérateur de dérivation.

L'équation (III.16) fait apparaître un terme contenant la dérivée du flux Φ_r .

D'après la relation (III.19), il vient :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = \frac{M}{T_r} \cdot i_{sd} - \frac{\Phi_r}{T_r} \quad (III.20)$$

La connaissance de ω_s permet d'assurer la validité des équations car le référentiel « dq » doit suivre constamment le champ tournant. Pour cela, on se sert de la relation angulaire interne $\omega_s = \omega_r + p \cdot \Omega$. La vitesse de rotation de la machine est mesurée. Par contre, il faut estimer la vitesse du champ rotorique. [15] Dans l'équation (III.10), on remplace i_{rq} par sa valeur donnée en (III.12). Ce qui donne :

$$\omega_r = \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} \quad (\text{III.21})$$

On obtient finalement :

$$\omega_s = \frac{M \cdot i_{sq}}{T_r \cdot \Phi_r} + p \cdot \Omega \quad (\text{III.22})$$

Cette dernière relation correspond à un autopilotage de la machine. C'est cette relation qui force à zéro une des grandeurs de sortie, et permet ainsi le découplage entre les deux grandeurs restantes dans l'expression du couple.

4.3. Stratégie de Commande Vectorielle :

A partir du modèle mathématique de la génératrice asynchrone et des équations de découplage, nous pouvons élaborer un schéma synoptique de la stratégie de la commande vectorielle représenté par la figure (III.2). Afin de la réalisation de cette commande des régulateurs s'imposent, nous avons choisi des régulateurs proportionnel-intégral (PI) pour leur simplicité. Une boucle externe pour le contrôle du flux et de la tension continue et une autre boucle interne pour le contrôle des courants.

Nous remarquons donc, grâce aux équations (III.18) et (III.19) que la composante directe i_{sd} du courant statorique contrôle le flux tandis que la composante en quadrature de ce courant i_{sq} contrôle le couple. La régulation des courants donne deux tensions v_{sd}^* et v_{sq}^* de référence ces dernières qui sortent de la boucle interne sont alors transformées en grandeurs triphasées v_a^* , v_b^* et v_c^* à l'aide de la transformation inverse de Park ces derniers sont introduites au bloc de commande à MLI et comparées au signal triangulaire afin de générer les impulsions de commande des interrupteurs.

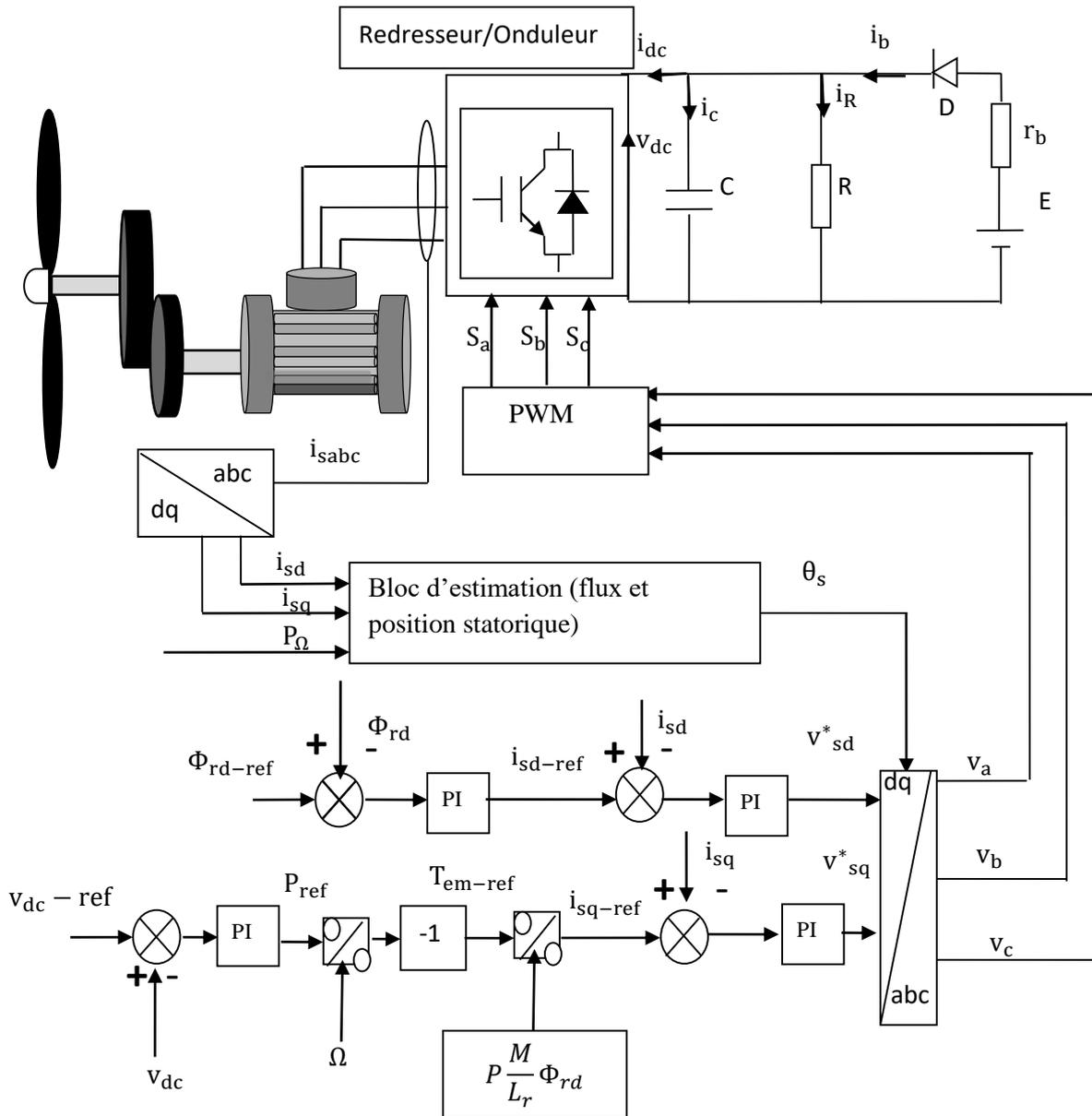


Figure.III.2: Schéma synoptique du contrôle de la génératrice par commande vectorielle à flux orienté

5. Résultats de simulation

Dans cette partie, Une simulation numérique a été réalisée pour l'algorithme de commande présenté précédemment afin de pouvoir connaître les performances de la méthode proposée. Les simulations sont réalisées sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Les paramètres de la génératrice étudiée seront donnés dans l'annexe.

Pour évaluer les performances de la stratégie de commande étudiée, nous avons simulé notre système pour les tests suivants: Un essai de variation de vitesse de rotation et un deuxième teste

basé sur la variation de la charge. Initialement, la génératrice est entraînée à la vitesse de synchronisme (750 tr/min). A l'instant $t=2s$, la vitesse est augmentée de 10%. Puis, à l'instant $t=4s$, elle est diminuée de 10% par rapport à la vitesse de synchronisme (750tr/min), et à l'instant $t=6s$ elle revient jusqu'à sa valeur initial (figure III.3). D'autre part (figure(III.4)), nous avons aussi introduit une variation de charge qui est initialement $R=70\Omega$. Sur tout l'intervalle de $[0,6]$, à $t=6s$ la résistance est augmentée à une valeur de 100Ω puis à $t=8s$, la résistance est diminuée vers une valeur de 80Ω . Avec une tension de bus continu v_{dc} -réf est 570V.

(a) Représente deux niveaux.

(b) Représente trois niveaux.

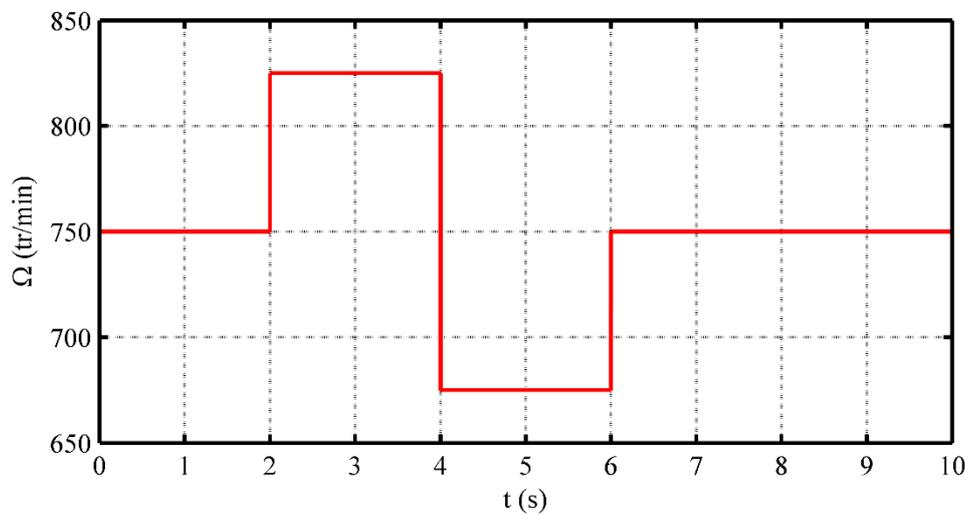


Figure.III.3: Vitesse d'entraînement

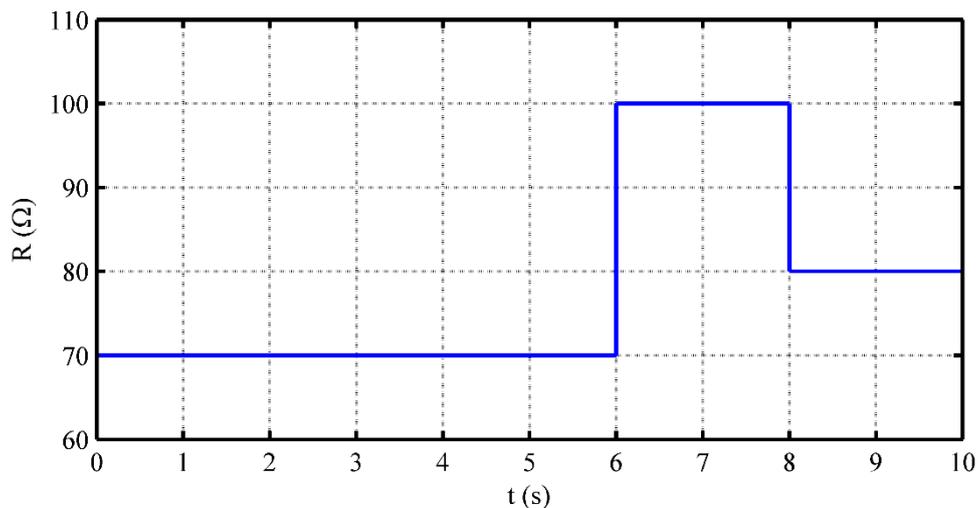
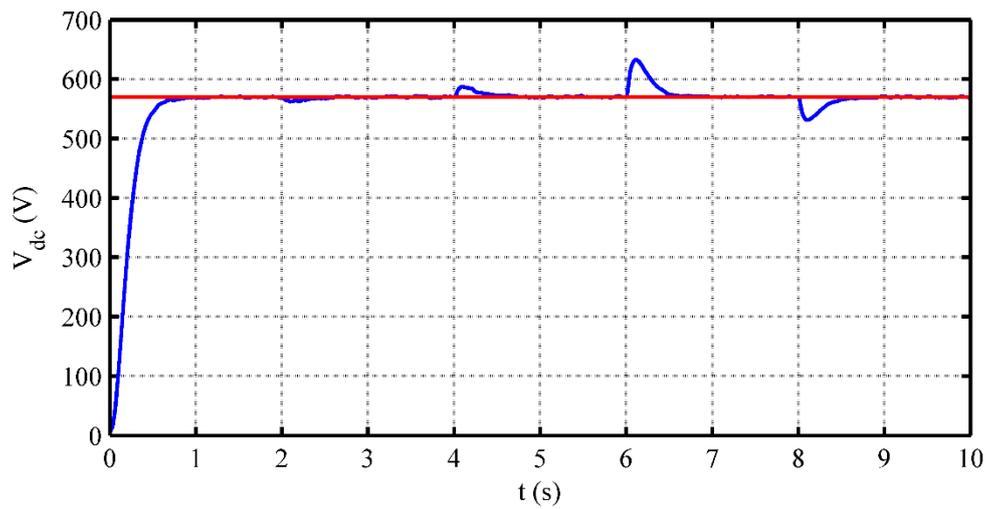
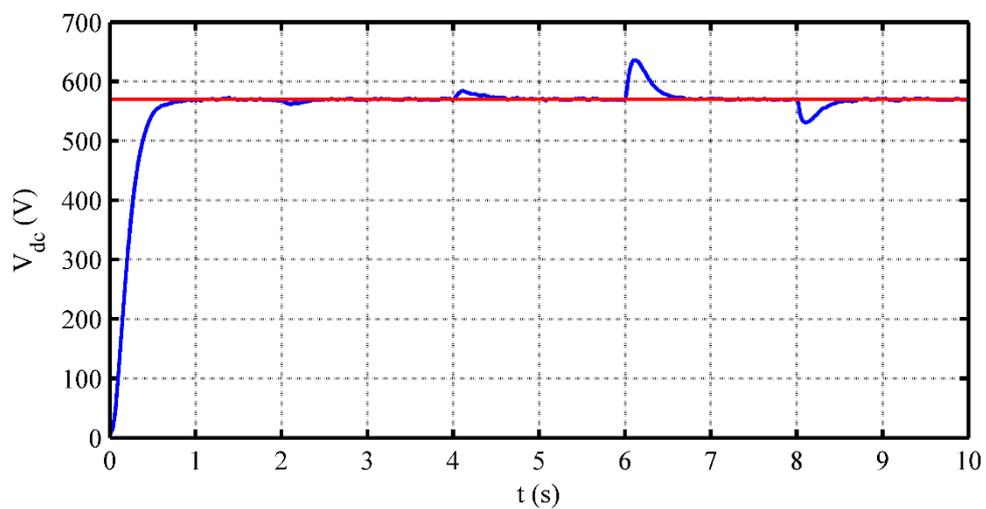


Figure.III.4: La charge



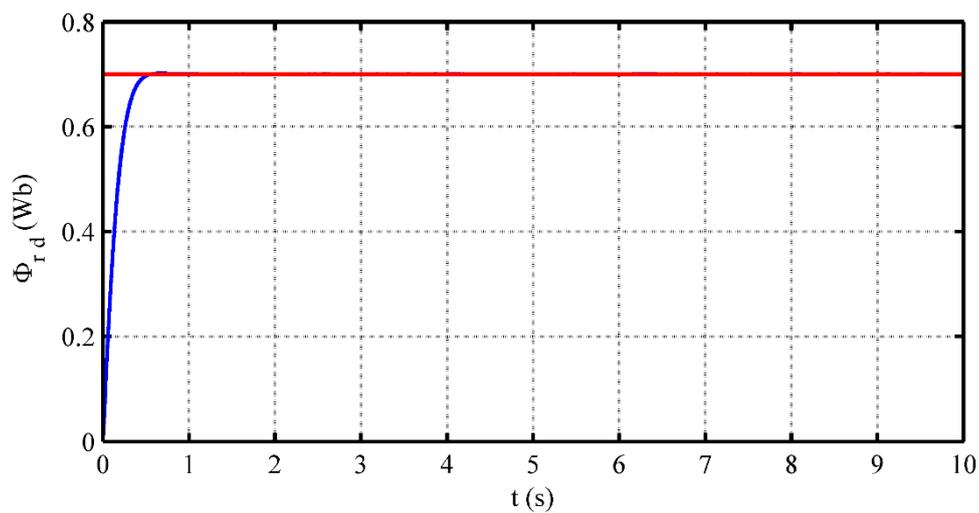
(a)



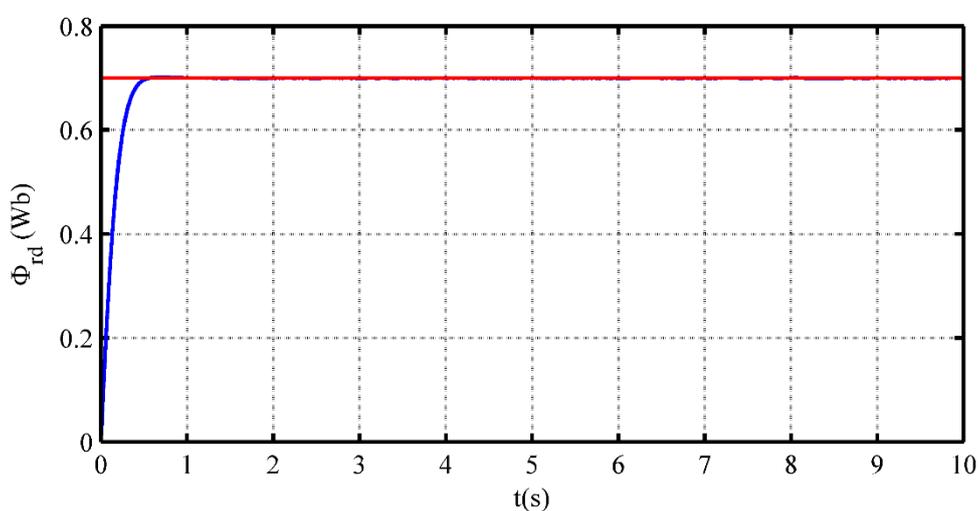
(b)

Figure.III.5: Tension redressée

Les figures (III.5.a) et (III.5.b) représente l'allure de la tensions de bus continu. Les perturbations de la vitesse à ($t=2s, t=4s$) sont éliminées par la commande proposée. À l'instant de perturbation de charge à ($t=8s$), on peut observer un dépassement causé par l'augmentation de la valeur de la résistance, l'impact de cette dernière influe brusquement sur la tension redressé.



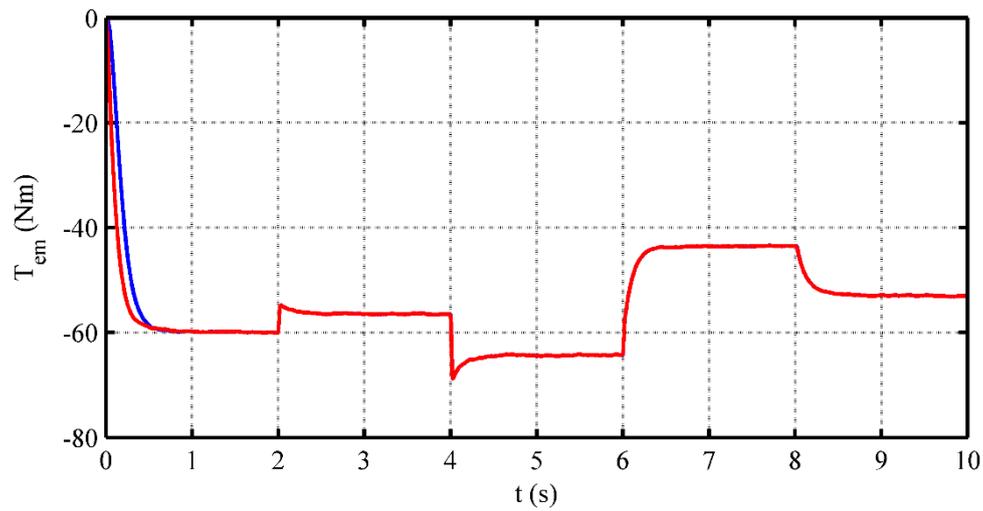
(a)



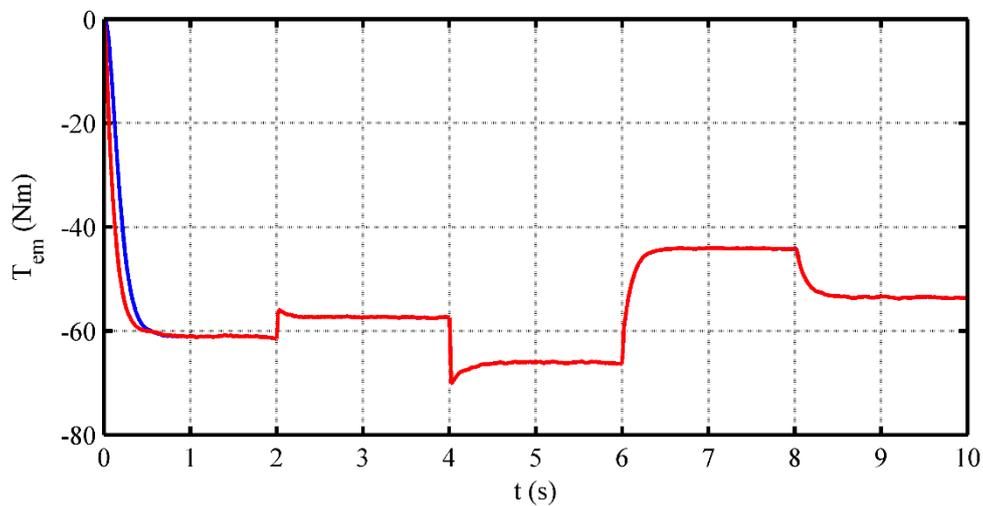
(b)

Figure.III.6: Flux rotorique

Le flux rotorique (figure (III.6.a) (III.6.b)) est totalement insensible à la variation de la vitesse et de la charge.



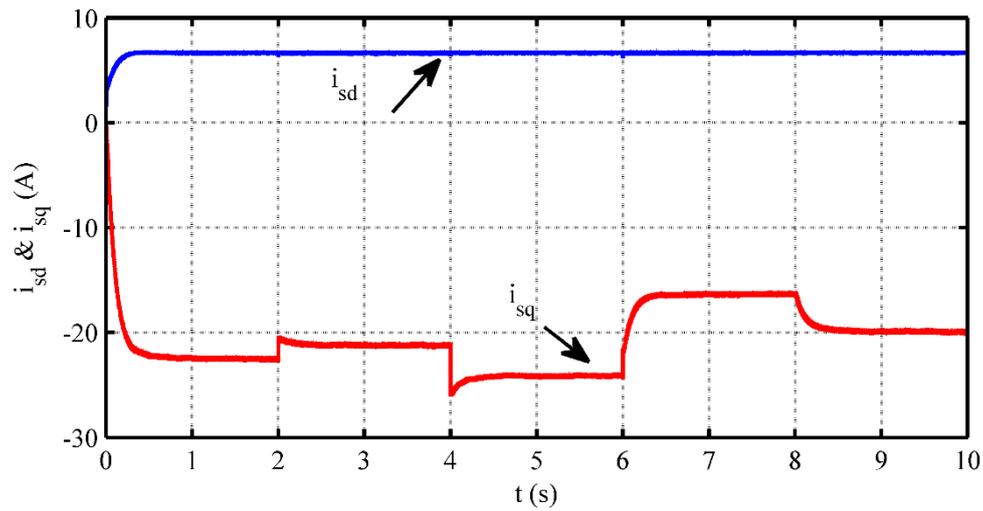
(a)



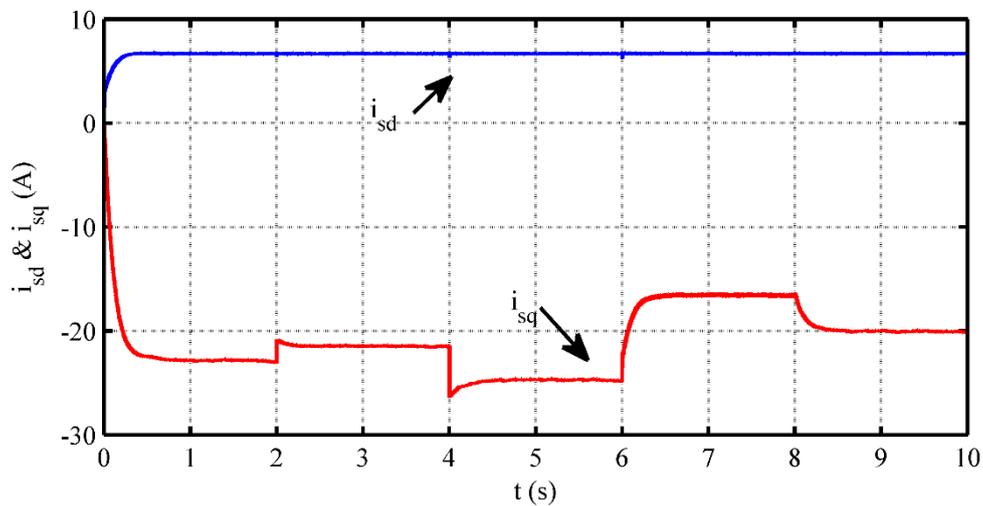
(b)

Figure III.7: Couple électromagnétique

Les figures (III.7a) et (III.7b) montrent l'allure du couple électromagnétique. Du fait que le flux est maintenu constant, le comportement du couple électromagnétique reste inchangé et est presque le même que son image le courant i_{sq} .



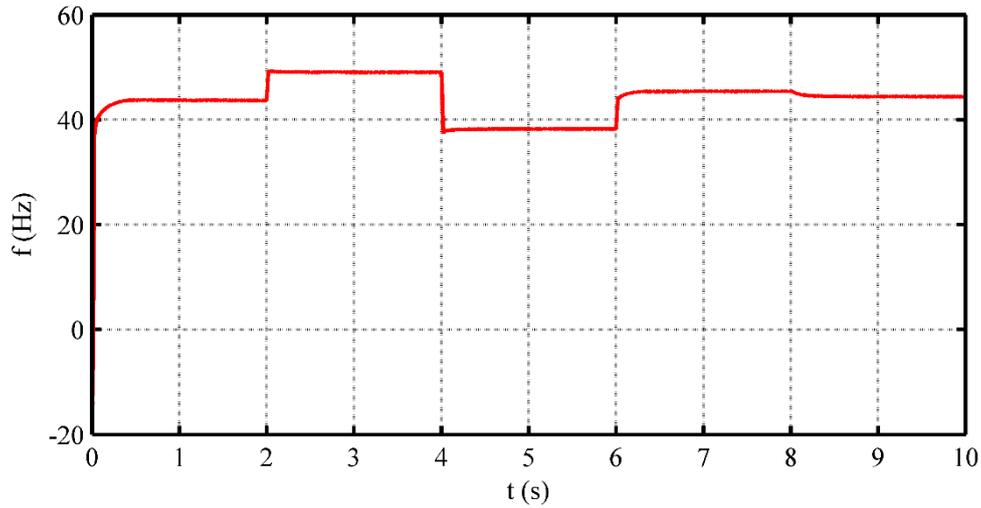
(a)



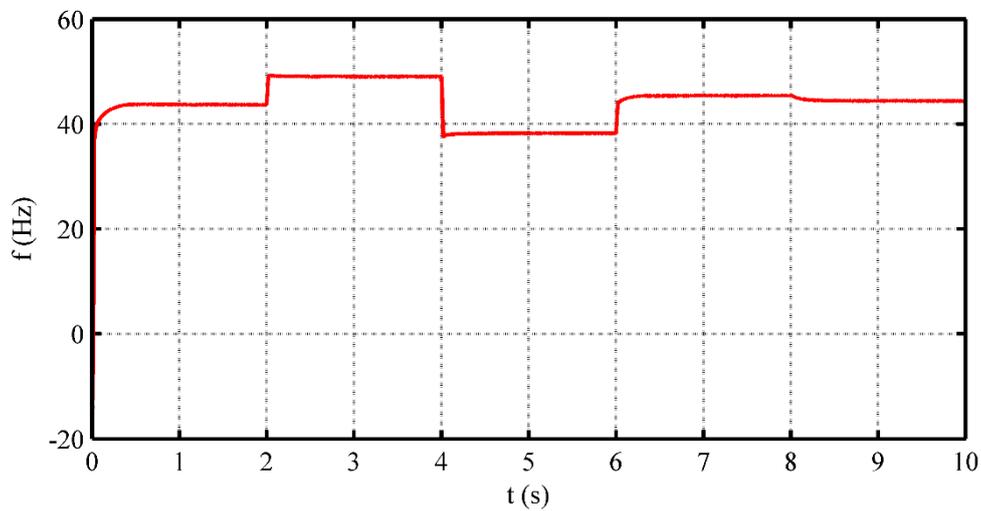
(b)

Figure.III.8: Courants i_{ds} et i_{qs}

Les figures (III. 8.a) et (III.8.b) montre les allures des courant direct i_{ds} et en quadrature i_{qs} . Les deux courants sont régulés indépendamment l'un de l'autre (le découplage de la GAS est respecté). L'évolution du courant i_{ds} est similaire à celle du flux, et l'évolution du courant i_{qs} est similaire à celle du couple.



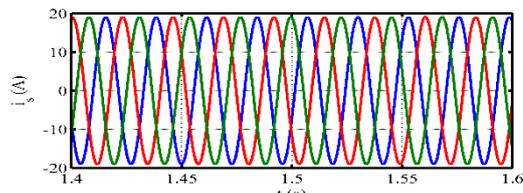
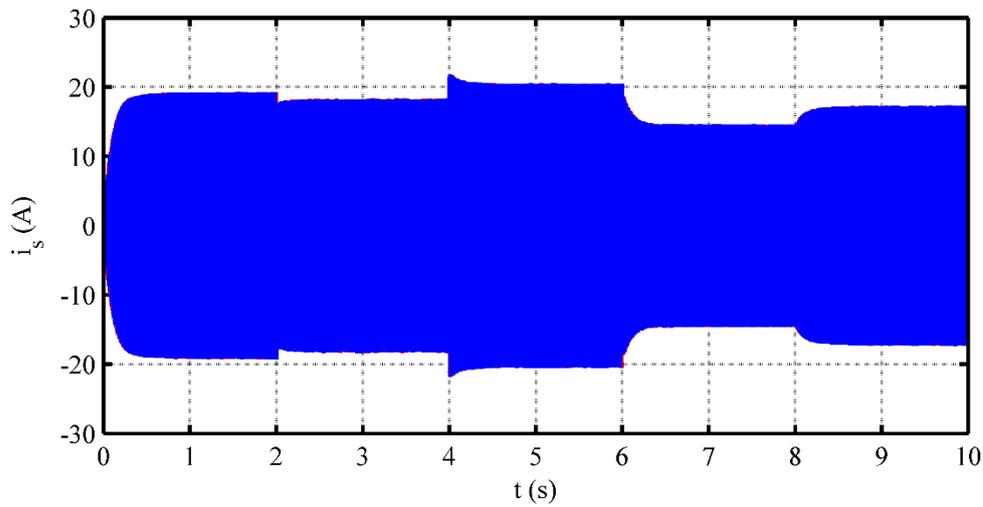
(a)



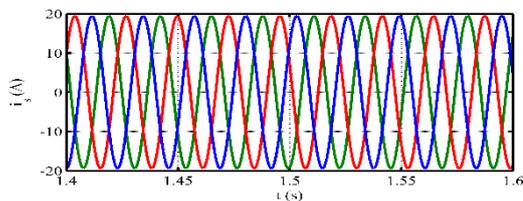
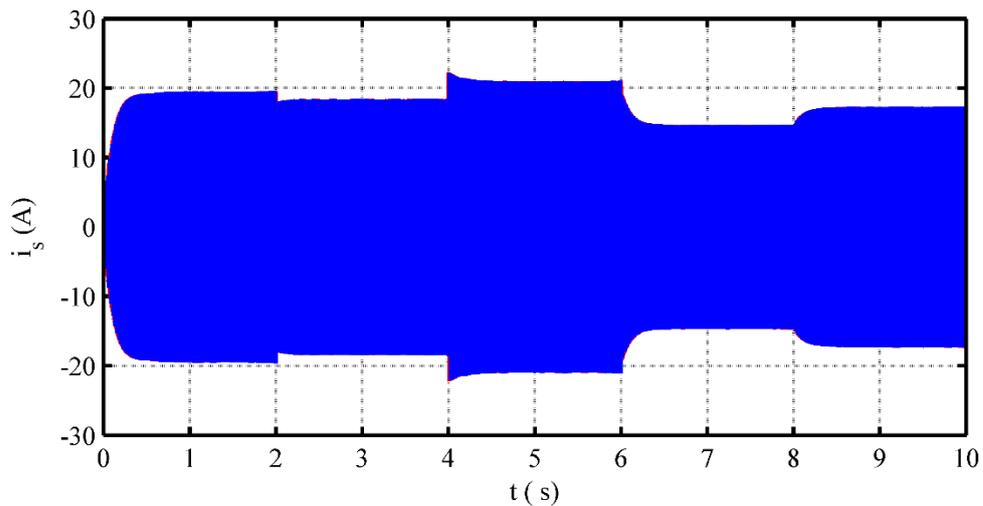
(b)

Figure III.9: Fréquence statorique

La figure (III.9.a)(III.9.b) représente fréquence statorique, on remarque que cette dernière est beaucoup plus sensible à la variation de la vitesse que la variation de charge.



(a)



(b)

Figure III.10: Courants statorique.

Les figures (III.10.a) (III.10.b) montrent les allures des courants statorique et sont zoom, qui sont pratiquement sinusoïdale et répond bien aux variations imposées (vitesse et/ou charge).

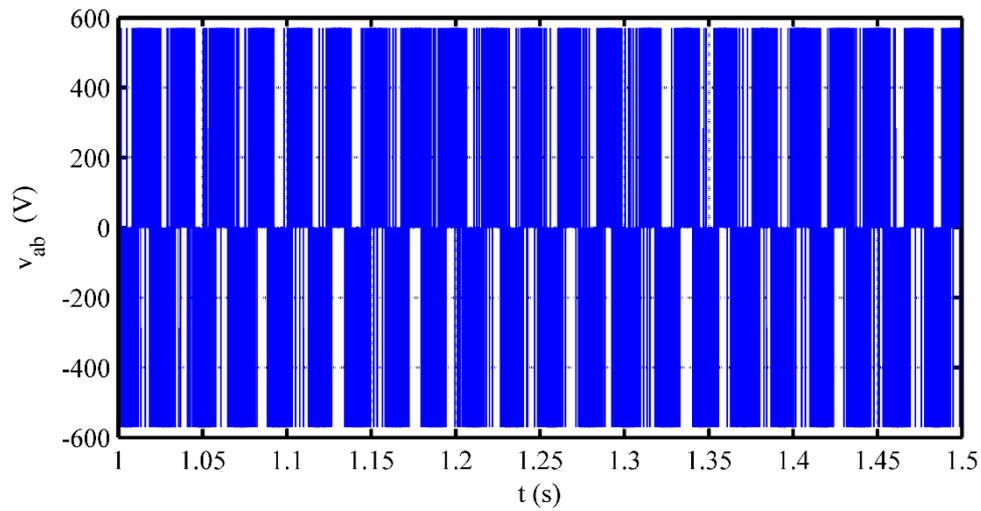


Figure.III.11: L'allure de la tension composé v_{ab} 2N

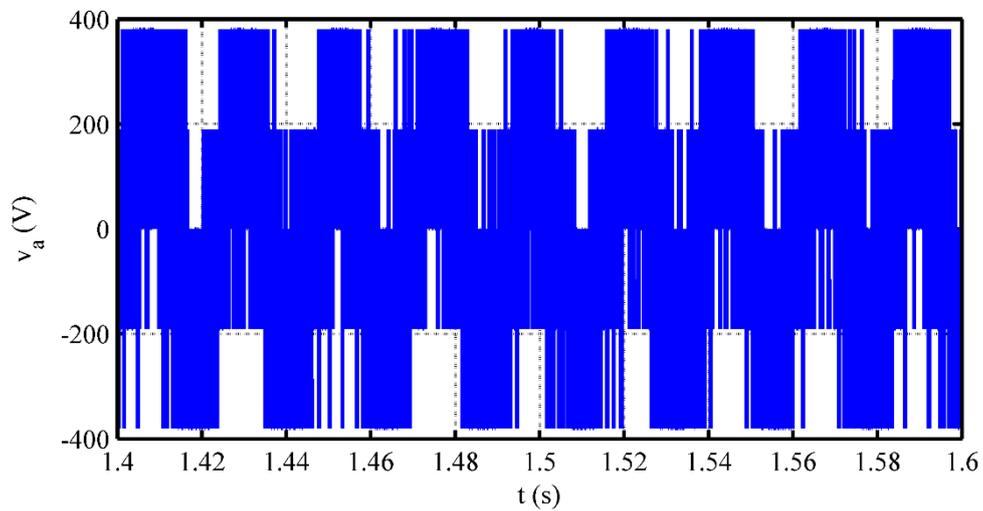


Figure.III.12: L'allure de la tension statorique de la phase v_a 2N

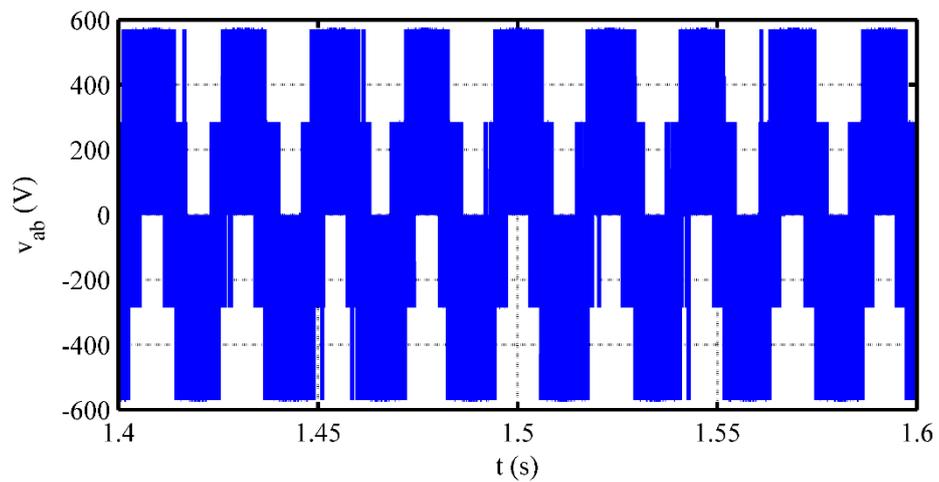


Figure.III.13: l'allure de la tension composé v_{ab} 3N

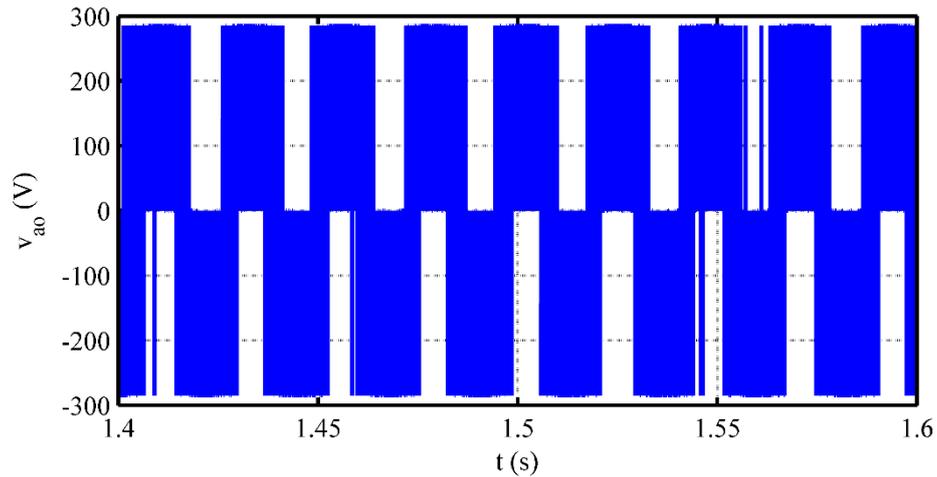


Figure.III.14: L'allure de la tension entre phase a et le point milieu o 3N

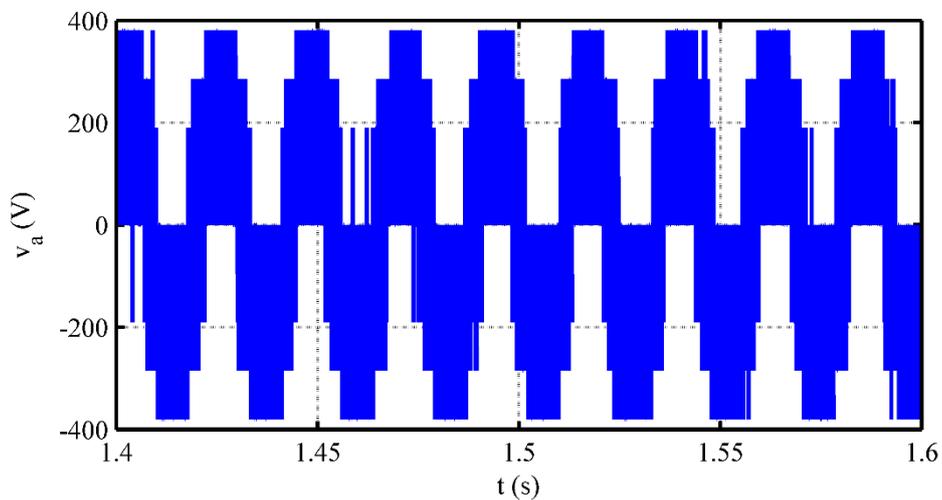


Figure.III.15: L'allure de la tension statorique de la phase a v_a 3N

➤ **Comparaisons entre les deux cascades convertisseur-génératrice en termes de THD :**

En comparant les performances obtenues dans le cas de redresseur à trois niveaux avec celle de redresseur à deux niveaux, on constate que sous les mêmes conditions de fonctionnement commande appliqué (MLI Sinusoïdale, commande d'orientation du flux).

Une analyse harmonique du courant statorique en termes de THD. Des valeurs de THD ont été prélevées lors de la simulation.

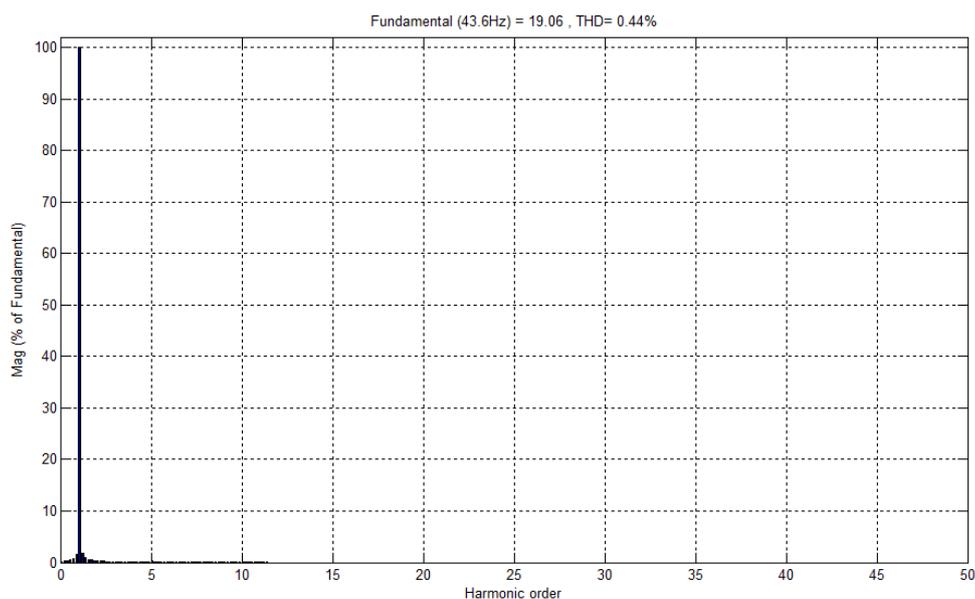


Figure.III.16: Spectre harmonique de courant statorique (avec le redresseur à 2N)

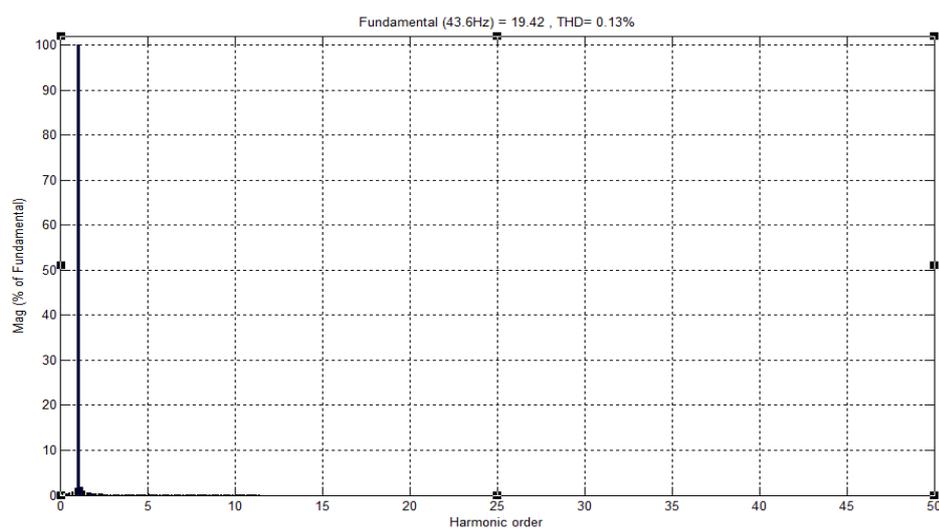


Figure.III.17: Spectre harmonique de courant statorique (avec le redresseur à 3N)

Les figures (III.15 et III.16) représentent spectre harmonique de courant statorique qui ont été prélevées au même instant $t= 1.5s$ pour les deux cas étudié précédemment (pour les deux convertisseurs à 2N et à 3N).

Un tableau récapitulatif pour les différentes valeurs de THD :

Tableau.III.1: Comparaison entre les deux cascades convertisseur- génératrice en termes de THD de courant.

Temps(s) \ Niveau	Deux niveaux	Trois niveaux
[0 2]	0.44 %	0.13 %
[2 4]	0.34 %	0.18 %
[4 6]	0.51 %	0.28 %
[6 8]	0.28 %	0.21 %
[8 10]	0.26 %	0.23 %

On remarque que, lorsqu'on augmente le nombre de niveaux, le THD se diminuait c.-à-d., la forme du courant améliore et proche à la sinusoïde.

6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les concepts de base de la commande vectorielle, et plus particulièrement la commande vectorielle par orientation du flux rotorique. Cette commande assure le découplage nécessaire, permettant de séparer la commande du flux et celle du couple.

On a étudié l'influence de la variation de la vitesse et de la charge, en appliquant la commande vectorielle sur la génératrice asynchrone à cage d'écureuil en utilisant un redresseur (à deux et à trois niveaux) et des régulateurs proportionnel-intégral (PI) en boucle fermé.

Conclusion générale

Conclusion générale

Nous avons présenté dans ce travail une étude sur les éoliennes autonomes, basé sur une machine asynchrone à cage d'écureuil fonctionnant en mode génératrice. Ce travail a été focalisé beaucoup plus sur le contrôle de la tension de la génératrice asynchrone avec utilisation de la commande vectorielle à orientation du flux rotorique qui permet d'imposer à la machine asynchrone des comportements semblable à la machine à courant continu ou dans lesquelles le flux n'est pas affecté par les variations du couple électromagnétique. Face à cet objectif, nous avons réalisé une étude consiste à connecter la génératrice asynchrone à la charge par l'intermédiaire d'un dispositif convertisseur d'électronique de puissance tel que les redresseurs à deux niveaux et trois niveaux commandés par MLI (la modulation triangulo-sinusoïdale).

Dans la première partie du travail, on a fait un rappel des notions élémentaires des systèmes éoliens et c'est différents types avec leurs constitutions et leur mode de fonctionnement. On a présenté aussi les machines adapté à un système éolien.

Dans la deuxième partie, nous avons vu brièvement la modélisation de la machine asynchrone. Nous avons utilisé la transformation de Park pour présenter la machine triphasée dans un repère à deux axes afin de simplifier la résolution des équations électromagnétiques de la machine. On a présenté aussi le modèle de fonctionnement de redresseurs triphasés deux et trois niveaux à structure NPC, commandé par la technique de commande MLI.

La troisième partie, a porté sur la commande du système étudié en vue de réaliser les objectifs escompté, à savoir bien contrôlé la tension de la génératrice en utilisant un redresseur (à deux et à trois niveaux) par des régulateurs PI en boucle fermée.

A la fin, nous avons présenté une étude en simulation du système globale avec différents tests (variation de la vitesse et la variation de la charge) qui nous a justifié l'utilité de la structure du redresseur triphasé à trois niveaux, des résultats de simulation ont été présentés et interprétés. Les résultats obtenus ont montré une bonne régulation de la tension redressée et du flux ainsi une bonne robustesse vis à vis de ces variations.

L'utilisation de la commande vectorielle par un redresseur à multi-niveaux donne des meilleures performances par rapport à l'utilisation d'un onduleur à deux niveaux à savoir, la qualité de la tension de la génératrice s'améliore dans le cas de redresseur à trois niveaux par rapport à celui de deux niveaux ainsi l'analyse harmonique du courant statorique montre une meilleure qualité spectrale pour le cas de trois niveaux par rapport aux onduleurs deux niveaux.

Conclusion générale

En perspective, nous envisageons d'étendre les travaux selon divers axes, application d'autre stratégie de commande tel que: la technique de commande MLI vectorielle, la commande DTC.

Bibliographie

Bibliographié

- [1] BELAKEHAL, S., et al. Modélisation et commande d'une génératrice Synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne. *Journal of Renewable Energies*, 2010, 13.1: 149-161.
- [2] J. F. MANWELL, J. G. MC GOWAN, A. L. ROGERS, "Wind energy explained: theory, design and application", John Wiley & Sons, Ltd, UK, 2002.
- [3] REDJEM, radia. « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne» Mémoire ,Magister. Université Mentouri de Constantine .2009.
- [4] BERABEZ, Kahina « Effets des dispositifs FACTS sur l'amélioration de la qualité d'énergie produite par un générateur asynchrone auto-excité» Mémoire, Magister. Université A. MIRA-Bejaia. 2015.
- [5] IDJDARENE, K., REKIOUA, D., REKIOUA, T., et al. Control strategies for an autonomous induction generator taking the saturation effect into account. In: 2007 European Conference on Power Electronics and Applications. IEEE, 2007. p. 1-10.
- [6] OUKACI, Assia « Commande par mode glissant des paramètres électriques de la machine asynchrone » Mémoire, Magister. Université Ferhat Abbas -Setif 2018.
- [7] HAMEURLAINE, Sid-ali; ZELILEF, Hamza. «Commande d'un onduleur triphasé par les techniques de modulation de largeurs d'impulsions à élimination sélective d'harmoniques. » Mémoire, Master . Université Mohammed seddik ben yahia - Jijel.2018.
- [8] GALLAH, Tarek; MIMOUNI, Mohamed Faouzi; MSAHLI, Faouzi. Commande vectorielle d'un moteur asynchrone par orientation de flux rotorique. *IEEE Trans. on Ind. Electronics*, 44: 3-13.
- [9] RACHID, Ameziane; RACHID, Maacha. « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation». Mémoire, Ingénieur.Université Mouloud Mammeri-Ttizi ouzou.2011
- [10] PREMALATHA, K.; SUDHA, S. Self-excitation and voltage control of an induction generator in an independent wind energy conversion system. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2012, 2.2: 454-461.
- [11] M. NEZLI Zine Eddine «Optimisation dimensionnelle d'une pale éolienne battante avec prise en compte du phénomène de pertes». Mémoire, Master .Université Mohamed Khider – Biskra. 2019.
- [12] BELTRAN, Brice «contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur» Thèse, Doctorat. Université de Bretagne occidentale-Brest.2010.
-

Bibliographié

- [13] MAGHSEL, Saliha. «Contribution à la modélisation et la commande d'une turbine Eolienne ». Mémoire, Magister. Université du 20 Août 1955 Skikda.2012.
- [14] M. Frédéric POITIERS «Etude et commande de génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne» thèse, Doctorat. Université de Nantes.2003.
- [15] IDJDARENE, Kassa. «Contribution à l'étude et la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonomes. ».Thèse, Doctorat. Université A. MIRA-Bejaia, Université Lille1 (France).2010.
- [16] TEBBAL, Abderezzak, SEKHRI, Miloud,. «Commande Prédictive d'un Système éolien à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent». Mémoire, Master. Université de Jijel.2019.
- [17] BRAHMI Cylia. ZENADI DIHIA « Modélisation Et Commande D'un Système Eolien». Mémoire. Master. Université A. MIRA de Bejaia.2020.
- [18] SELLAM Yousra. NAIT SIDOUS HANANE, «Commande d'un système éolien utilisant une génératrice asynchrone à cage d'écureuil». Mémoire. Master. Université A. Mira Bejaia.2020.
- [19] BENMESSAOUD Billal, FEDILA Ghilas, «Contrôle Directe du Couple et du Flux Rotorique dans une Génératrice Asynchrone Autonome.». Mémoire. Master. Université A. MIRA de Bejaia .2017.
- [20] DJEMAA Yacine, KERNOU Ferhat « Commade par mode glissant d'une génératrice asynchrone». Mémoire. Master .Université A. MIRA de Bejaia.2015.
- [21] Mekkaoui Naima. « Contribution à la modélisations et la commande et à la commande d'une Mini-centrale Eolienne à base de machines à induction simple et double alimentée». Mémoire. Magister. Université de Batna, 2004.
- [22] SARR, Abdoulaye, BAHRI, Imen, DIALLO, Demba, et al. «Génératrice à réluctance variable connectée au réseau alternatif monophasé pour une application éolienne». In : Proceedings of the Symposium de Genie Electrique. 2018.
- [23] TAMAARAT, Azzouz. « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA». Thèse. Doctorat. Université Mohamed Khider, Biskra. 2015.
- [24] AMIMEUR, Hocine. « Contributiona la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode de Glissement.». ». Mémoire. Magister en Électrotechnique. Université de Batna 2.2018.
- [25] Abdelkader Boukaroura « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par
-

Bibliographié

- l'Approche Bond Graph » Mémoire. Magister. Université Ferhat Abbas de Sétif.2009.
- [26] BEN ZEMAMOUCHE HOURIA «Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multiniveaux à base de GTO et d'IGBT». Mémoire Magister. Université Badji Mokhtar de Annaba. 2010.
- [27] EL AIMANI, Salma «Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseade moyenne tension », Thèse. Doctorat. Université des sciences et technologies de Lille.2004.
- [28] CAMBLONG, Haritza «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » Thèse. Doctorat .École Nationale Supérieure d'Artset Métiers Centre de Bordeaux.2008.
- [29] SHI, TingNa, et al. Direct power control for three-level PWM rectifier based on hysteresis strategy. Science China Technological Sciences, 2012, 55.11: 3019-3028.
- [30] Malek BOUHARKAT « étude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone a cage en régime dynamique » Thèse. Doctorat. Université de Batna. 2006.
- [31]JOUKACI, Assia « Commande par mode glissant des paramètres électriques de la machine asynchrone ». Thèse. Doctorat. Université Ferhat abbas de sétif.2018.
- [32] HIHAT hacene, BENMEDDOUR Adel «Commande par mode glissant flou d'une génératrice asynchrone autonome». Mémoire. Master. Université A. Mira-Bejaia. 2017.
- [33] W.BOUDJTAT et A. HIMOURA « Etude et simulation d'une machine asynchrone alimentes par un onduleur de tension a commande MLI». Mémoire. Master. Université Badji Mokhtar Annaba. 2017.
- [34] DJEBBAR, Mohamed Salah. « Etude comparative des redresseurs cascades et multiniveaux à commande MLI» Mémoire.Magister en électrotechnique. Université Mentouri Constantine. 2005.
- [35] HAROUN, BRIGHEN et SAFOUANE, HALAIMIA. « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale» Mémoire. Master. Université Larbi Tebssi -tebessa.2016.
- [36] ZEGAI, Mohammed Lamine «Synthèses Des Techniques de Commande DTC Associe à L'intelligence Artificielle Appliquée au Contrôle D'un Moteur Asynchrone Alimenté parOnduleur Multi-Niveaux». Thèse. Doctorat. Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie d'Oran.2017
-

Bibliographié

- [37] A.BOUZIDI, M.bouchareb «Commande par mode glissant floue d'un D-STATCOM multiniveaux». Mémoire. Master. Université Mohamed Boudiaf-M'Sila.2011.
- [38]HIMOUR Kamal. «Optimisation des systèmes photovoltaïques par l'insertion des onduleurs multiniveaux». Thèse de doctorat en Commande et Conversion d'Energie. Université A.MIRA-BEJAIA .2015.
- [39] Eladjaoui Moussa, Bechar Belaid «Modélisation et commande d'un onduleur triphasé multi-niveaux », Mémoire. Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, université Mouloud-Mammeri de Tizi-ouzou, 2013.
- [40] B.TARK «Commande vectorielle de la machine asynchrone par régulateur RST» Mémoire. Ingénieur, université de Batna, 2003.
- [41] FENNOUH, Elhachemi «Apport des onduleurs multiniveaux dans la commande de la machine asynchrone (moteur à induction) ».Thèse. Doctorat. Batna.2012.
- [42] ATIG, Mebarka. «Différentes structures MRAS pour l'estimation de la vitesse du moteur asynchrone». Mémoire. Magister Université Mohamed Boudiaf .Oran.2011.
- [43] GHORZI, Zoulikha; MIMOUNI, Amina. « Stratégies de commande des onduleurs» Mémoire. Master. Ecole Supérieure En Sciences Appliquées. Tlemcen.2019.
- [44] BERREZZEK Farid. « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone». Mémoire. Magister. Université de Annaba-Badji Mokhtar.2006.
- [45] MOHAND Said « DTC appliquée à la MAS alimentée par un onduleur à 3Niveaux». Mémoire.Master. Université Mouloud Mammeri.2014.
- [46] REZGUI Salah Eddine «Commande de machine électrique en environnement Matlab/Simulink et temps réel» Mémoire. Magister. Université Mentouri Constantine .2009
- [47] IDJDARENE, K. «Contrôle d'une génératrice asynchrone à cage dédiée à la conversion de l'énergie éolienne» JCGE'08 LYON, 2008, 16.
- [48] DUGARD, Luc; LANDAU, IoanDoré. «Recursive output error identification algorithms theory and evaluation ». Automatica, 1980, 16.5: 443-462.
- [49] BEN NACEUR Salem «Commande vectorielle avec observateur d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur multi-niveaux». Mémoire. Ingénieur, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila.2011.
-

Annexe

Annexe

1. paramètre de la machine asynchrone

- Rotor de type à cage d'écureuil
- 4 paires de pôles
- 230/400V-5.5 KW- 690 tr/min

2. Paramètre électrique

- $R_s=1.07131\Omega$.
- $R_r=1.29511\Omega$.
- $L_s=0.1137mH$.
- $L_r=0.1096mH$.
- $M=0.10474 H$.

3. Paramètre mécanique

$J=0.230kg. m^2$

$f= 0.0025 N.m /rd.s$

4. Paramètre de simulation

Le bus continu

- Bus continu de 570 V.
 - Capacité de bus continu $C =1000\mu F$.
-