

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la technologie

كلية العلوم والتكنولوجيا

Département Electromécanique

قسم الإلكتروميكانيك

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande électriques

Présenté par :

- YAICHE Salim
- SAIDOUNE Abdelhakim

Intitulé :

*Étude et analyse des performances d'un moteur asynchrone alimenté
par un onduleur de tension multi-niveaux*

Soutenu le : **01/07/2023**

Devant le Jury composé de :

<i>Nom & Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Dr. BENHANICHE Abdelhak</i>	<i>MCA</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. MEDJMADJ Slimane</i>	<i>MCA</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Dr. ZAIDI El Yazid</i>	<i>MCB</i>	<i>Co-Encadreur</i>	<i>ENSH-Blida</i>
<i>Dr. TALHAOUI Hicham</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

Année Universitaire 2022/2023

Remerciements

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de notre projet de fin d'étude de master de Département d'Electromécanique de la Faculté des Sciences et de la Technologie d'Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arreridj.

Tout d'abord, on tient à remercier Dieu le tout puissant pour ses bienfaits inestimables, de nous avoir permis de terminer nos études ainsi que ce modeste travail dans de bonnes conditions.

*Nous adressons nos remerciements à notre Encadreur **Dr. S. MEDJMADJ, MCA**, maitre conférence de l'Université de Bordj Bou Arreridj, pour sa contribution et sa disponibilité à l'élaboration de ce travail.*

*Nous adressons nos remerciements à notre Co- encadreur **Dr. Zaidi ELyazid, MCB**, on remercie les enseignants pour leur assistance que nous avons ressenti durant notre travail, aussi tout au long du cursus de notre formation, et aussi pour leurs orientations, leurs conseils. Durant tout ce temps, on a su apprécier leurs qualités scientifiques, leurs humanismes et surtout leur modestie.*

On profite également pour remercier tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont aidé et donc ont contribué au succès de ce travail.

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chers frères (ALLA et SAAD) pour leurs encouragements permanents, et ma belle-sœur (CHAHD)

Je souhaite exprimer ma gratitude envers à

Bahi, Hakim, Imad , RiadhStotch , Laid , Sofian , Bilal ET Issam

Mes amis et mes proches qui ont été présents à chaque étape de ce voyage, m'apportant leur soutien moral et leur amitié sincère.

A mon Encadreur Dr. Medjmadj Slimane et

Co-Rapporteur Dr. Zaidi El Yazid pour leurs aide et efforts au long de la réalisation de ce travail de mémoire

Mon binôme Yaiche Salim avec qui j'ai partagé des heures de travail acharné, des idées échangées et des défis relevés ensemble.

Ta collaboration et ton soutien ont été inestimables, et cette réussite est le fruit de notre partenariat

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Merci d'être toujours là pour moi

SAIDOUNE ABDELHAKIM

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chers frères (AYMEN et RIADH) pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

Je souhaite exprimer ma gratitude envers à

Bahi, Hakim, Amine, Abdel Ali

Mohammed, Laid, Chaabane, Farid, Ramzi ET Hocine

Mes amis et mes proches qui ont été présents à chaque étape de ce voyage, m'apportant leur soutien moral et leur amitié sincère.

A mon Encadreur Dr. Medjmadj Slimane et Co-Rapporteur Dr. Zaidi El Yazid pour leurs aide et efforts au long de la réalisation de ce travail de mémoire

Mon binôme Saidoune Abdelhakim avec qui j'ai partagé des heures de travail acharné, des idées échangées et des défis relevés ensemble. Ta collaboration et ton soutien ont été inestimables, et cette réussite est le fruit de notre partenariat

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Merci d'être toujours là pour moi

YAICHE SALIM

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	iii
Liste des Abréviations& Symboles	v
Introduction Générale	1

Chapitre 1 : État de l'art de l'association onduleur multi niveaux-machine asynchrone

1.1 Introduction	4
1.2 Généralités et types des machines électrique.....	4
1.2.1 Machines asynchrones triphasées	5
1.2.2 Machines double alimentation	6
1.2.3 Machines asynchrones multi-phasées.....	7
1.3 Généralités sur L'Onduleur de tension.....	9
1.4 Différentes topologies des onduleurs multi niveaux.....	9
1.5.1 Onduleur a diode de bouclage NPC.....	10
1.5.2 Onduleur a condensateur flottant.....	11
1.5.3 Onduleur Pont H en cascade	12
1.5 Choix du système d'entraînement électrique.....	13
1.6 Conclusion	14

Chapitre 2: Modélisation et commande de l'association onduleur à trois niveaux-machine asynchrone

2.1 Introduction.....	18
2.2 Modélisation de la machine asynchrone.....	18
2.3 Modelé de la machine asynchrone (MAS).....	19

2.4 Equation générale de la machine asynchrone.....	19
2.4.1 Équations électriques.....	19
2.4.2 Equations magnétiques.....	20
2.4.3 Équations mécaniques.....	21
2.5 Modélisation de l'onduleur de tension.....	22
2.6 Stratégie de commande MLI-ST.....	25
2.7 Simulation de l'association machine-onduleur sans commande.....	27
2.7.1 Résultats de simulation.....	27
2.8 Conclusion.....	29

Chapitre 3: Commande vectorielle de la MAS alimentée par un onduleur de tension à multi-niveaux

3.1 Introduction.....	32
3.2 Principe de la commande vectorielle.....	32
3.2.1 Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté.....	34
3.2.2 Schéma de la commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté de la MAS35	
3.2.3 Simulation de la commande vectorielle du système en mode dégradé.....	36
3.3 Résultats de simulation.....	37
3.3.1 Changement du sens de rotation.....	37
3.3.2 Test de robustesse paramétrique.....	43
3.3.3 Distorsion harmonique totale.....	45
3.4 Conclusion.....	47
Référence bibliographies.....	48
Conclusion générale.....	49
Annexe A : Modélisation de l'onduleur de deux niveaux et la transformation de Park.....	50
Annexe B : Synthèse des régulateurs de la commande vectorielle.....	53
Annexe c : Paramètres du système.....	54

Liste des figures

Figure 1-1 : Schéma de principe de l'association Onduleur/MAS.	5
Figure 1-2 Schéma de principe de la machine à double alimentation.	6
Figure 1-3 Schéma d'alimentation d'une machine hexaphasée double étoile.	8
Figure 1-4 Schéma d'alimentation d'une machine asynchrone penta-phases.	8
Figure 1-5 Les différents structure des onduleurs multi-niveaux.	10
Figure 1-6 Onduleurs multi-niveaux de type NPC à trois et cinq niveaux.	10
Figure 1-7 Onduleurs NPC à condensateur Flottant.	12
Figure 1-8 Onduleur multi-niveau H Bridge monophasé de niveau m en cascade.	12
Figure 2-1 Représentation schématique d'une MAS triphasée.	19
Figure 2-2 Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux.	23
Figure 2-3 Principe de la commande MLI-ST à trois niveaux.	26
Figure 2-4 Les tensions de référence avec les signaux porteuses de l'onduleur à trois niveaux.	26
Figure 2-5 Modèle de simulation sous <i>Matlab/Simulink</i> de l'association machine-onduleur.	27
Figure 2-6 Allures des grandeurs mécaniques de la MAS sans commande.	28
Figure 2-7 Allures des courants des phases de la MAS sans commande.	28
Figure 2-8 Allure des tensions aux bornes de la MAS sans commande.	28
Figure 3-1 Principe de pilotage vectoriel de la machine à courant continue et de la machine asynchrone triphasé	33
Figure 3-2 Schéma global de la commande vectorielle indirecte de la MAS.	36
Figure 3-3 Schéma de la commande vectorielle indirecte du système sous <i>Matlab/Simulink</i>	37
Figure 3-4 Allures des vitesses de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux.	38
Figure 3-5 Allures des couples de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux , (b) : Onduleur trois niveaux.	39

Figure 3-6 Allures des courants des phases de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux .	40
Figure 3-7 Allures des tensions aux bornes de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux .	41
Figure 3-8 Allures des fluxes de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux.....	42
Figure 3-9 Allures des courants direct et quadratique de la MAS, (a) onduleur deux niveaux (b) onduleur trois niveaux.....	42
Figure 3-10. Allures des vitesses de la MAS , (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux.....	43
Figure 3-11 Allures du couple de la MAS (a) onduleur deux niveaux (b) onduleur trois niveaux.....	44
Figure 3-12 Allures des courants des phases de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux .	44
Figure 3-13 Allures des tensions aux bornes de la MAS(a) onduleur deux niveaux (b) onduleur trois niveaux .	45
Figure A-14 Transformation de Park des bobinages du moteur sur deux axes tournant avec le champ.....	51

Liste des Abréviations & Symboles

FOC :	Field Oriented Control
MAS :	Machine asynchrone triphasée
MLI-ST :	Modulation de largeur d'impulsion sinus triangle
SV-PWM:	Space vector pulse width modulation
MLI-V :	Modulation de largeur d'impulsion vectorielle
PI:	Proportionnelle - Intégrale
IGBT:	Insulated Gate Bipolar Transistor
NPC:	Neutral Point Clamped
GTO:	Gate Turn-off Thyristor
CHB:	Cascade H-bridges
MLI :	Modulation de largeur d'impulsion
I_{ds} :	Composante du courant statoriques suivant l'axe (d)
I_{qs} :	Composante du courant statoriques suivant l'axe (q)
V_{ds} :	Composante de tension rotorique suivant l'axe (d)
V_{qs} :	Composante de tension rotorique suivant l'axe (q)
K_i, K_p :	Coefficients du régulateur conventionnel de la vitesse
L_s :	Inductance cyclique propre d'une phase statorique
L_r :	Inductance cyclique propre d'une phase rotorique
R_r :	Résistance d'une phase de l'enroulement rotorique
R_s :	Résistance d'une phase de l'enroulement statoriques
V_{sabc} :	Tensions instantanées des phases statoriques
V_{rabc} :	Tensions instantanées des phases rotoriques
\emptyset_{sabc} :	Flux des phases statoriques

Φ_{rabc} :	Flux des phases rotoriques
Φ_{ds} :	Composante du flux statorique suivant l'axe (d)
Φ_{qs} :	Composante du flux statorique suivant l'axe (q)
Φ_{dr} :	Composante du flux rotorique suivant l'axe (d)
Φ_{qr} :	Composante du flux rotorique suivant l'axe (q)
\mathbf{J} :	Moment d'inertie du rotor
Ω :	Vitesse angulaire mécanique du rotor
\mathbf{f} :	Coefficient de frottement visqueux
C_{em} :	Couple électromagnétique délivré par le moteur
C_r :	Couple résistant, ou de charge
ω :	Vitesse angulaire électrique du rotor
θ :	L'angle de rotation du rotor par rapport au stator
θ_{obs} :	Angle de rotation de (d, q) par rapport au stator
θ_r :	Angle de rotation de (d, q) par rapport au rotor
$T_r = \frac{L_r}{R_r}$:	Constante de temps rotorique

Introduction Générale

Grâce aux développements de l'électronique de puissance et de l'électronique de commande, il est aujourd'hui possible de mettre en œuvre des algorithmes de commande inenvisageables il y a une dizaine d'années. Ainsi, sont apparus des entraînements à base de machines asynchrones aussi performants que ceux avec des machines à courant continu, tout en bénéficiant de leurs avantages (robustesse ; faible coût ; large gamme de vitesse). Dans cette optique, l'utilisation d'onduleurs multi niveaux pour alimenter les machines asynchrones a suscité un intérêt croissant ces dernières années. Ces onduleurs offrent des avantages potentiels en termes de qualité de tension de sortie, de réduction des pertes et de comportement dynamique amélioré d'une machines.

Dans ce travail, notre principal objectif est de proposer une étude et une analyse des performances d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur multi-niveaux, avec une comparaison spécifique entre un onduleur à deux niveaux et un onduleur à trois niveaux. Notre travail est organisé en trois chapitres, comme suit:

[Dans le premier chapitre](#), nous présentons un état de l'art sur les machines asynchrones et les onduleurs. Nous abordons les principes de fonctionnement des moteurs asynchrones, leurs caractéristiques et leur utilisation courante. De plus, nous examinons en détail les différents types d'onduleurs, en mettant l'accent sur les onduleurs à deux et trois niveaux.

[Le deuxième chapitre](#) est consacré à la modélisation d'une machine asynchrone et d'un onduleur à trois niveaux. Nous réalisons une simulation en utilisant l'outil *Matlab/Simulink*, où nous mettons en œuvre une commande [Modulation de Largeur d'Impulsion \(MLI\)](#) pour l'association du moteur et de l'onduleur à trois niveaux. Cette modélisation nous permet d'évaluer les performances du système dans des conditions spécifiques.

[Dans le dernier chapitre](#), nous effectuons une simulation en utilisant *Matlab/Simulink* pour comparer les performances d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à deux niveaux et un onduleur à trois niveaux. Nous mettons en œuvre une commande vectorielle de flux orienté rotorique et nous évaluons les paramètres tels que : la vitesse, le couple, le flux, la tension et le courant. Cette comparaison approfondie nous permet de déterminer les avantages et les inconvénients de chaque configuration d'onduleur.

Nous terminons notre étude par un assemblage de tous les résultats de simulations obtenues des différentes stratégies mentionnées dans les précédents chapitres et nous concluons qui reflète les avantages et les inconvénients de chaque stratégie.

Finalement, notre travail sera clôturé par une conclusion générale et quelques perspectives qui pourront faire suite à ce travail de recherche.

Chapitre 1 :

État d'art de l'association onduleur multi niveaux- machine asynchrone

Chapitre 1 : État de l'art de l'association onduleur multi niveaux-machine asynchrone

1.1 Introduction

Les machines triphasées à courant alternatif permettent la transformation électrique-mécanique et vis-versa. Elles sont les plus largement utilisées dans les applications industrielles et domestiques depuis longtemps après une version des machines biphasées qui n'a pas prospéré. Néanmoins, la machine asynchrone est la plus populaire, cela est dû à sa simplicité de construction et de maintenance, sa fiabilité, sa robustesse et sa puissance massique élevée.

Au cours des dernières décennies, la qualité des conversions des énergies électriques pour l'alimentation des systèmes des entraînements électriques a été le centre d'intérêt de plusieurs travaux de recherche actuelle. De plus, diverses mesures d'évaluation des conversions des énergies (DC/AC) des systèmes ont été définies et analysées [1-2].

L'objectif de ce chapitre est de présenter l'état de l'art des différents types machines électriques, puis nous énumérons les avantages et les inconvénients des différents types des machines. De plus, les différents types des convertisseurs (DC/AC) seront aussi présentés et discutés les avantages et les inconvénients de chaque type. Finalement, une prise de décision sur le choix d'une topologie adéquate du convertisseur de puissance sera effectuée.

1.2 Généralités et types des machines électrique

Les machines à courant continu, a satisfait des parties de ces exigences mais il est pourvu des balais frottant sur le collecteur à lames, ce qui limite la vitesse maximale et la puissance et montre des interruptions de fonctionnement et des difficultés des maintenances préventive et corrective. Pour toutes ces raisons, les machines à courant continu trouvent des limites d'utilisation, les machines à courant alternatif à tendance de le remplacer dans nombreuses applications [3]. Cette existence des machines à courant alternatif dans les entraînements électriques à vitesse variable est due à l'évolution technologique, dans les domaines d'informatique et d'électronique de puissance [4].

1.2.1 Machines asynchrones triphasées

Les machines asynchrones triphasées “MAS” sont des machines électriques à courant alternatif sans connexion entre le rotor et le stator, pour ce dernier, il existe deux types : le rotor bobiné et le rotor à cage d'écureuil. En effet, le cas du rotor à cage est moins coûteux et présente une meilleure robustesse d'un point de vue mécanique [5]. De plus, les circuits magnétiques du rotor et du stator sont constitués d'un empilage de fines tôles métalliques pour éviter la circulation de courant de Foucault [6]. La machine asynchrone on la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elle était à l'origine uniquement utilisée en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, elle est de plus en plus souvent utilisée en génératrice [5]. Par conséquent, la machine asynchrone est associée avec un onduleur de tension à deux niveaux, comme le montre sur la Figure 1.1.

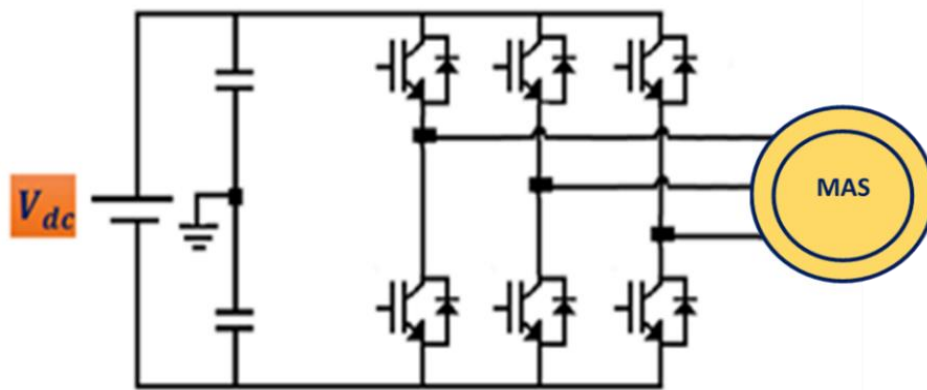


Figure 1-1 : Schéma de principe de l'association Onduleur/MAS.

a. *Avantages des machines asynchrones triphasées* [7] :

- Coût d'achat faible ;
- Démarrage facile ;
- Puissance adaptée à tous les besoins ;
- Robustesse et fiabilité à toute épreuve.

b. *Inconvénients des machines asynchrones triphasées* [7]:

- Couple de démarrage qui est proportionnel au carré de la tension est réduit dans le même rapport ;
- Pertes de glissement et surtout à la nécessité de fonctionner pratiquement au voisinage de la vitesse de synchronisme ;
- Courant de démarrage plus élevé (5 à 8 fois le courant nominal) ;
- Difficile de contrôler la vitesse mande.

1.2.2 Machines double alimentation

La machine à double alimentation simple (MADA), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague [8-9]. En effet, la Figure 1.2 illustre le schéma de principe de cette dernière, tel que : le stator est alimenté directement par le réseau, ainsi que le rotor est alimenté au moyen d'un convertisseur alternatif de telle sorte que le glissement de la machine peut être contrôlé. Il faut noter que l'onduleur indiqué dans la Figure peut être composé par un redresseur et un onduleur (*conversion indirecte*) ou bien peut être un cyclo convertisseur (*conversion directe*) [8-9].

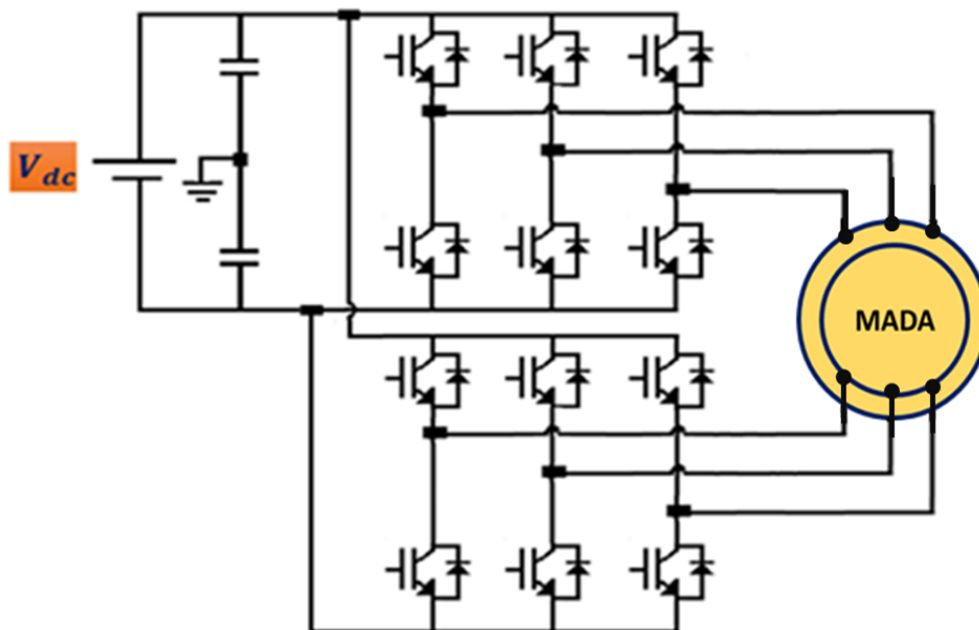


Figure 1-2 Schéma de principe de la machine à double alimentation.

a. *Avantages des machines double alimentation* [7] :

- Accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance ;
- Capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme ;
- Dans la *MADA*, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator;
- Réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique ;
- Possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau électrique.

b. *Inconvénients des machines double alimentation* [7]:

- Marché traditionnel est conquis par la *MAS* à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer ;
- L'aspect multi-onduleurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le cout;

1.2.3 Machines asynchrones multi-phasées

Les machines électriques multiphasées sont des machines ayant un nombre des phases supérieur à trois phases [7][10]. L'augmentation du nombre de phases permet de diminuer en proportion la puissance transitée par chaque phase et par conséquent par composant semi-conducteur [7][10].

- a. *Machines asynchrones multi-étoiles* : les machines asynchrones multi-étoiles sont les machines dont le nombre de phases statoriques q est un multiple de trois de sorte que l'on puisse les regrouper en mp étoiles triphasées. Ces machines sont aussi appelées *machines polyphasées de Type 1* [7][10].

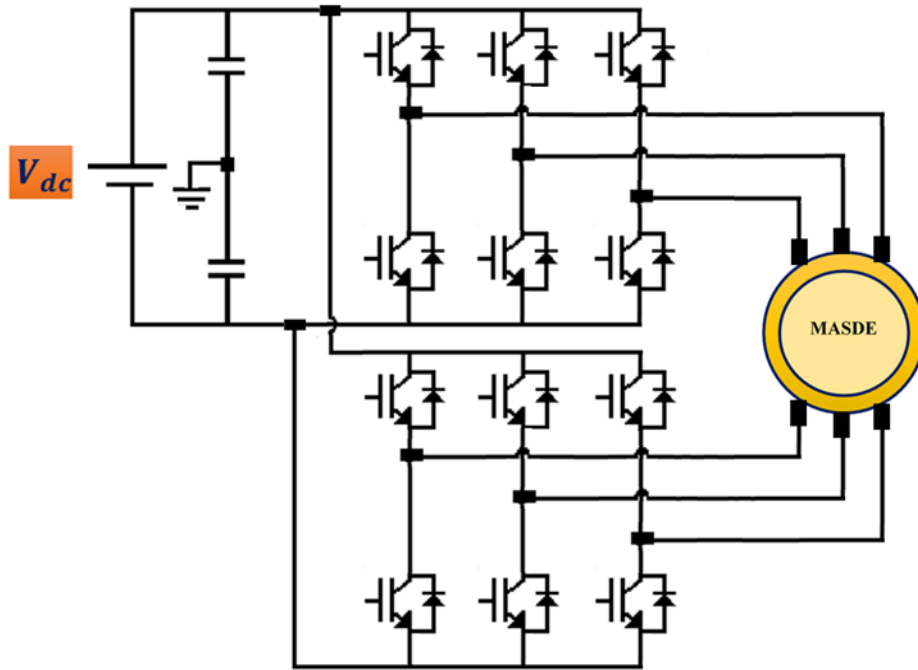


Figure 1-3 Schéma d'alimentation d'une machine hexaphasée double étoile.

b. Machines à grand nombre de phases : Les machines asynchrones à grand nombre de phases sont les machines dont le nombre de phases statoriques q est un nombre impair avec un décalage angulaire régulier égal à $2\pi/q$. En effet, ces machines sont aussi appelées machines polyphasées de Type 2 [7][10].

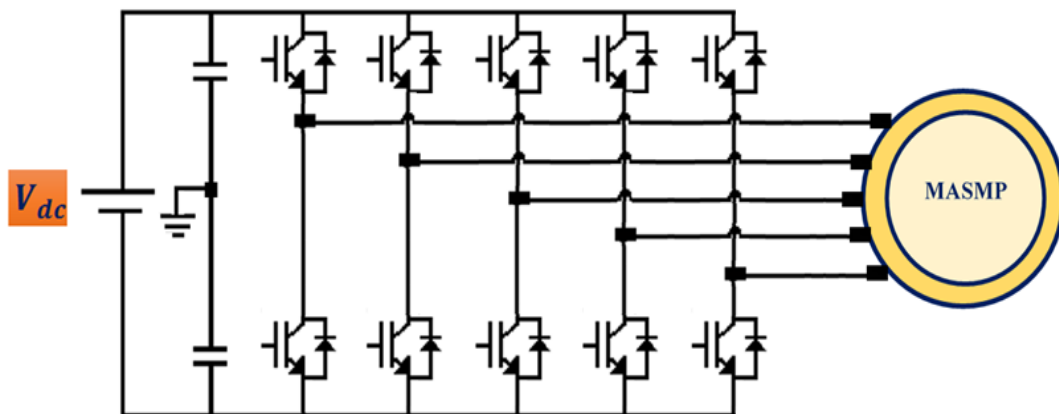


Figure 1-4 Schéma d'alimentation d'une machine asynchrone penta-phases.

c. Avantage [7][10] :

- Segmentation de puissance ;
- Plus grande tolérance aux défauts ;
- Réduction des ondulations du couple et des pertes rotoriques ;
- L'amélioration de la production de couple.

d. Inconvénients [7][10]:

- Certains THD du temps ne contribuent pas à la création d'onde de F.m.m ;
- Courant de circulation entre les phases ;
- Coût de l'ensemble du système pourrait être plus élevé dans ce cas ;
- Multiplication du nombre de semi-conducteurs complique évidemment le système de commande.

1.3 Généralités sur l'onduleur de tension

Les onduleurs de tension sont des convertisseurs statiques assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). Cette conversion d'énergie électrique permet de réguler la transmission d'énergie électrique entre les deux sources (DC-AC), ainsi, ce dernier est satisfait au moyen d'un dispositif de commande (IGBT, MOSFT). En effet, l'onduleur peut être utilisé comme matériel indépendant pour des applications, telles que : l'alimentation basée sur la lumière du soleil, ou pour remplir une alimentation de renforcement à partir de batteries chargées indépendamment. De plus, la Figure 1.1 montre le schéma de principe de l'onduleur de tension.

1.4. Différentes topologies des onduleurs multi niveaux

Actuellement, un certain nombre des topologies des onduleurs à plusieurs niveaux ont été introduits dans les différents domaines, telle que ; les secteurs industrielles et les secteurs des santé, mais trois de ces topologies qui sont appelés célèbres topologies traditionnels sont plus fréquents dans les secteurs industrielles [11-17].

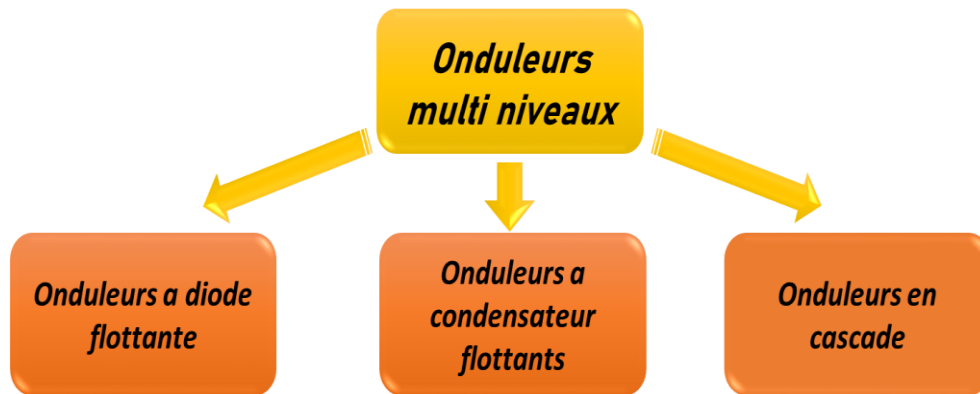


Figure 1-5 Les différents structure des onduleurs multi-niveaux.

1.5.1 Onduleur a diode de bouclage NPC

La construction la plus conjoint pour les onduleurs à tension multi niveaux est le NPC (Neutral Point Clamped), comme le montre sur la Figure 1.6 [13-15][17].

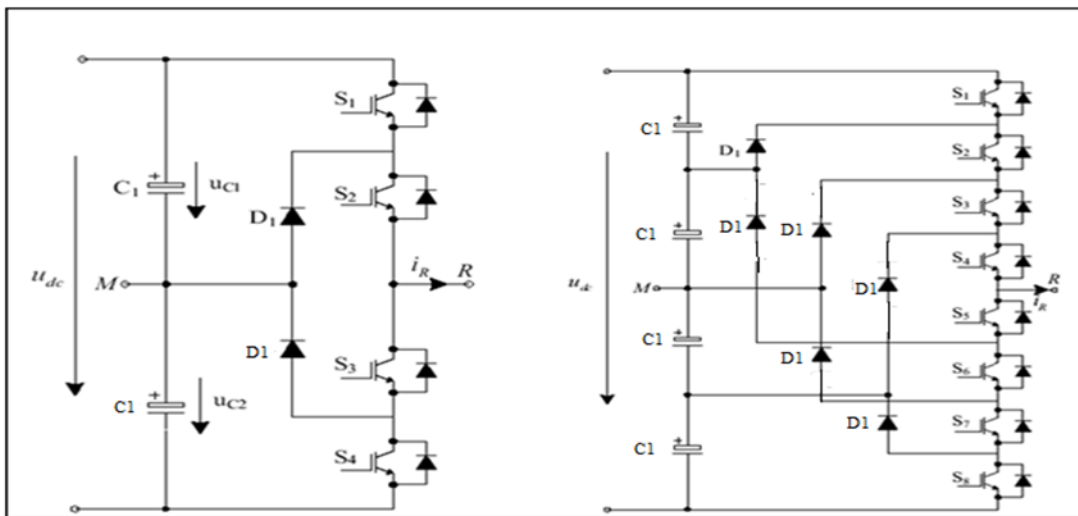


Figure 1-6 Onduleurs multi-niveaux de type NPC à trois et cinq niveaux.

La Figure 1.6 représente la structure d'un onduleur de tensions triphasé à potentiel distribué, dans lequel des diodes sont utilisées pour se connecter au point de référence 0 et obtenir une tension de la valeur 220V. En effet, ces diodes augmentent non seulement le coût de cette topologie, mais elles créent également un problème d'encombrement. Pour obtenir une tension avec plusieurs niveaux, il est nécessaire d'utiliser $N-1$ condensateurs. De plus, les tensions aux bornes de ces condensateurs sont toutes égales à $E/(N-1)$, où E est la tension totale du bus continu. Chaque couple d'interrupteurs occupé une forme d'une cellule de commutation, et les deux interrupteurs sont commandés de manière complémentaire [14-17].

a. Avantages de l'onduleur étagé à diodes :

- ✚ Capacité minimale requise de l'onduleur en raison du partage d'une tension DC de transport typique par chacune des trois étapes. Par conséquent, cette géographie est appropriée pour les interconnexions consécutives à haute tension et les entraînements de vitesse flexibles ;
- ✚ Condensateurs peuvent être pré-chargés collectivement ;
- ✚ Au cas où l'échange serait effectué à une récurrence cruciale, l'efficacité de l'onduleur est élevée ;
- ✚ Il faut moins de gadgets par rapport à la géographie du pont H.

1.5.2 Onduleur a condensateur flottant

L'onduleur à condensateurs flottants (FC) ou onduleur multi-cellulaire est une topologie de conversion d'énergie qui repose sur la mise en série d'interrupteurs commandés, est une alternative intéressante pour les applications moyenne tension (Figure 1.7) [11-13]. L'avantage principal d'un onduleur multi-niveaux à FC est l'absence des diodes de bouclage propres aux topologies des convertisseurs de type NPC et MPC. De plus, les contraintes en tension imposées aux composants de puissance sont naturellement limitées. Effectivement, Des redondances de commutation dans les séquences de fonctionnement introduisent des états qui peuvent être utilisés pour le maintien de l'équilibre des charges des condensateurs. Outre coute, le FC à quelques inconvénients, tel que le contrôleur de la charge du condensateur augmente la complexité du contrôle du circuit entier, il exige des condensateurs mis en parallèle dont les forts courants pourront circuler à travers ces condensateurs, aussi le FC sont des systèmes complexes en raison du nombre élevé de semi-conducteurs [11][15-17].

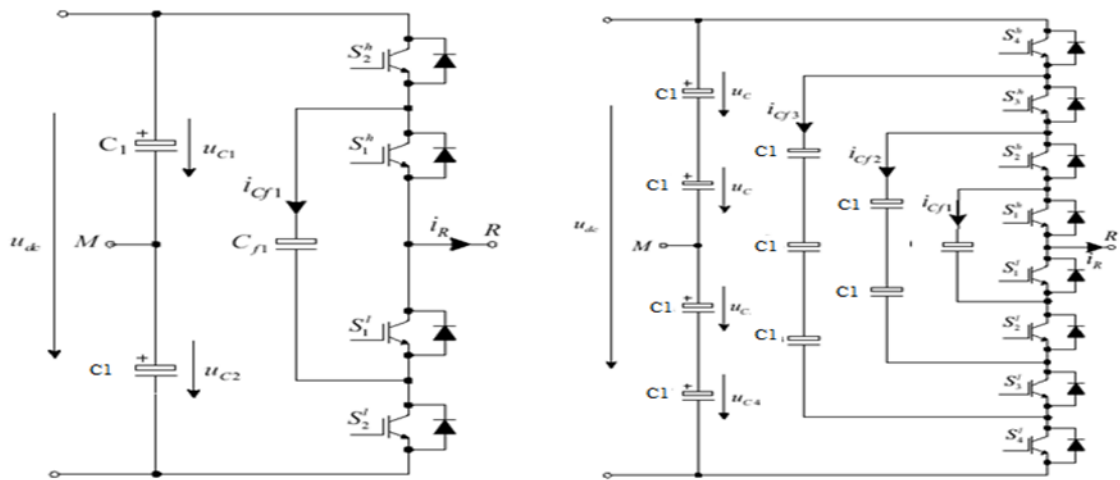


Figure 1-7 Onduleurs NPC à condensateur Flottant.

1.5.3 Onduleur Pont H en cascade

La configuration du circuit fondamental de la géographie H-Bridge (CHB) en flux de MLI est montrée sur la Figure 1.8 [11][13-15].

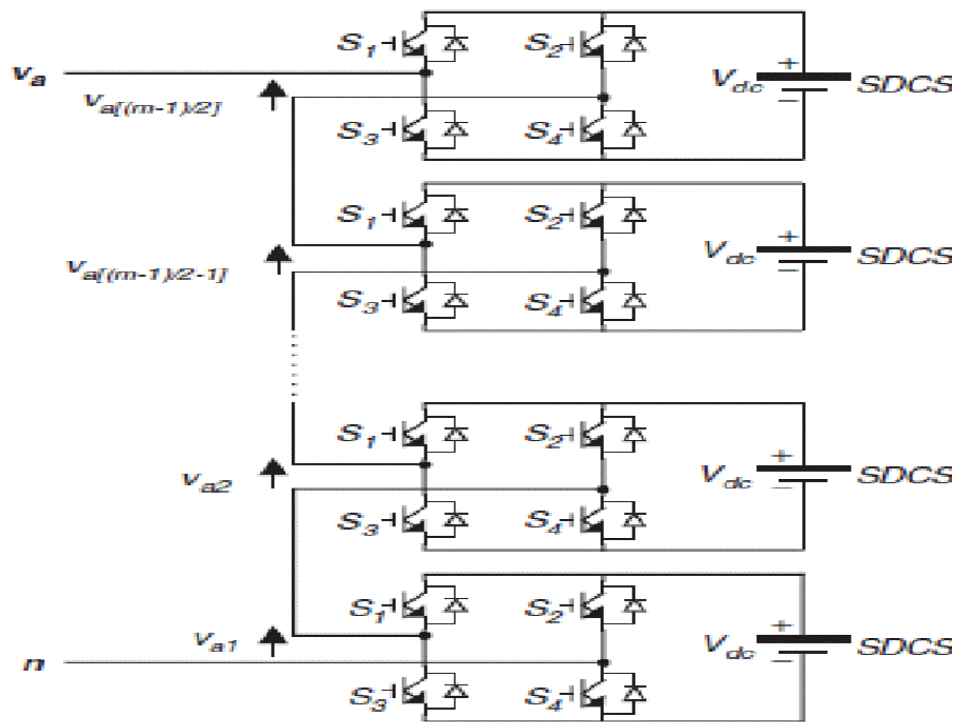


Figure 1-8 Onduleur multi-niveau H Bridge monophasé de niveau m en cascade.

Cette Figure et illustré la CHB qui comprend quelques modules d'onduleur à un étage qui sont associés dans séries et par la suite leur résultat obtient équivalait à façonner un rendement échelonné. Le côté information de chaque module est associé à des sources DC indépendantes. Chaque module de convertisseur peut produire trois niveaux de tension distincts, soit $+V_{dc}$, 0 et $-V_{dc}$. Ces niveaux de tension sont obtenus en associant la source DC d'entrée au côté AC en activant et en désactivant différents mélanges de commutateurs S1, S2, S3 et S4 [12-13][16-17].

a. Avantage des convertisseurs de type H-Bridge :

- Nombre total de niveaux de tensions résultantes est supérieur à deux fois celui du nombre de sources AC accessibles ;
- L'utilisation de sources de courant continu indépendantes permet la déconnexion entre les ressorts de puits de chaque module ;
- Depuis les résultats de la multitude relative de modules est ajouté de sorte que la tension nominale du module individuel est faible et donc le poids sur les gadgets individuels obtient également diminuer.

1.5 Choix du système d'entraînement électrique

Nous choisirons ce mémoire car elle permettra de développer des compétences en électronique de puissance, en contrôle de machines asynchrones et en analyse de performances de systèmes électriques. Elle offrira également l'opportunité de contribuer à l'avancement de la recherche dans ce domaine et de répondre aux défis actuels de l'industrie en matière d'efficacité énergétique, de qualité de l'énergie et de réduction des coûts. En outre, ce mémoire offre également l'opportunité de comparer les performances d'un onduleur multiniveau à celles d'un onduleur à deux niveaux, qui sont une technologie plus ancienne mais toujours largement utilisée dans l'industrie. Une telle comparaison peut fournir des informations utiles sur les avantages et les limites de chaque technologie en termes d'efficacité énergétique, de qualité de l'alimentation électrique et de coût, ce qui peut aider les concepteurs de systèmes à prendre des décisions éclairées en fonction de leurs besoins spécifiques.

1.6 Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation d'un état de l'art sur les machines électriques et les onduleurs de tension triphasés à multi niveaux. En effet, un intérêt particulier a été accordé aux systèmes des onduleurs statiques multi niveaux qui présentent une architecture de segmentation de la puissance avec une tolérance aux défauts. Les onduleurs multi-niveaux est une solution intéressante dans les applications des moyennes et des fortes puissances, par conséquent, des mesures doivent être respectées afin de garantir un fonctionnement sain du système. Les mesures les plus importantes sont les suivantes :

- Synchronisation du module ;
- Protection contre les défauts ;
- Redondance maximisée.

Le prochain chapitre est dédié à la présentation du modèle mathématique de l'association machine asynchrone/onduleur multi-niveaux.

Référence chapitre 1

- [1] P. E. Vidal, “*Commande non-linéaire d'une machine asynchrone a doublé alimentation*”, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Frances, 2004.
- [2] M. Bouharkat, “*Etude de l'évolution des courants rotoriques d'une machine asynchrone à cage en régime dynamique*”, Thèse de Doctorat d'état de l'Université de Batna, Algérie, 2006.
- [3] A. Saibi, “*Commande par Régulateurs IP et par Mode de Glissement d'une Machine Synchrone à Double Etoile*”, Mémoire de Magistère de l'école nationale polytechnique d'El-Harrach, Algérie, 2006.
- [4] A. Kerboua, “*Commandes et observateur par mode de glissement : Application à une machine asynchrone alimentée en tension*”, Mémoire de Magistère de l'école nationale polytechnique d'El-Harrach, Algérie, 1999.
- [5] B. Benazza, “*Commande par mode glissant d'une machine asynchrone sans capteur de vitesse*”, Mémoire de Magistère de l'Université Djillali Liabes De Sidi Bel-Abbès, Algérie, 2008.
- [6] F. Poitiers, “*Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau*”, Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, France, 2003.
- [7] E. Zaidi, “*Etude de la commande d'un entraînement électrique de puissance à base d'une architecture segmentée*”, Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2021.
- [8] S. K. El Khil, “*Commande vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)*”, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse & école Nationale d'ingénieurs de Tunis, 2006.
- [9] G. Salloum, “*Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation*”, Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [10] K. Marouani, “*Contribution à la commande d'un entraînement électrique à base de moteur asynchrone double étoile*”, Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2010.

- [11] A. Martin, “ *Evaluation et Optimisation de la Bande Passante des Convertisseurs Statiques (Application aux Nouvelles Structures Multicellulaires,*” *Thèse de Doctorat de Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2003.*
- [12] N. Celanovic, and D. Boroyevich, “*A Fast Space Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three Phase Converters,*” *IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, March/April. 2001.*
- [13] K.V. Patil, R.M. Mathur, J. Jiang, S.H. Hosseini, “*Distribution System Compensation Using a New Binary Multilevel Voltage Source Inverter,*” *IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 459-464, April. 1999.*
- [14] R. Kraus, “*Status and Trends of Power Semiconductor Device Models for Circuit Simulation*”, *IEEE Trans. Power Electronics, Vol. 13, pp. 452-465, May. 1998.*
- [15] L. M. Tolbert, “*Multilevel Converters for Large Electric Drives*”, *IEEE Transaction on Industry Applications, Vol.35, pp. 36-44, January/February. 1999.*
- [16] A. Nabae, I. Takahashi and H. Akagi, “*A New Neutral-Point-Clamped PWM Inverter*”, *Transaction on Industry Applications, Vol. IA-17, pp. 518-523, September/ October. 1981.*
- [17] T.A. Meynard, H. Foch, “*Multi-level Conversion: High Voltage Choppers and Voltage-source Inverters,*” *In Proc, IEEE Power Electronics Specialist Conference, pages 397-403, 1992.*

Chapitre 2 :

Modélisation et commande de l'association onduleur à trois niveau-Machine asynchrone

Chapitre 2: Modélisation et commande de l'association onduleur à trois niveaux-machine asynchrone

2.1 Introduction

La modélisation est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes. Le modèle mathématique d'une machine électrique est un modèle de représentation de la machine réelle permettent de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement, elle apporte un aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques.

Dans ce chapitre, nous allons aborder la modélisation du système d'association d'une machine asynchrone et d'un onduleur trois niveaux. Pour faciliter l'étude, nous allons diviser le système en deux parties distinctes. Tout d'abord, nous allons présenter la modélisation de la machine asynchrone triphasée, puis nous aborderons la modélisation de l'onduleur trois niveaux. Enfin, nous présenterons les résultats de simulation obtenus à l'aide de techniques de commande [MLI -Sinus Triangle](#) pour l'ensemble du système.

2.2 Modélisation de la machine asynchrone

Il est essentiel de démontrer le caractère non convergent de la machine pour pouvoir décomposer et comprendre les différents aspects électromécaniques, électriques et magnétiques impliqués dans son fonctionnement. Cela permettra ensuite de concevoir un système de contrôle adapté. Pour ce faire, nous allons utiliser un modèle de machine décalée qui permettra de décrire de manière efficace le comportement des différents composants impliqués dans la régulation des grandeurs mécaniques de la machine [1].

Cependant, pour simplifier l'étude, nous devons faire certaines hypothèses simplificatrices. Ces hypothèses seront prises en compte pour analyser le comportement de la machine, mais il est important de noter que ces hypothèses pourraient ne pas être exactes dans tous les cas. Nous devons donc prendre en compte les limites de notre modèle et veiller ce qu'il reste suffisamment précis pour permettre une compréhension adéquate du comportement de la machine.

2.3 Modelé de la machine asynchrone

La Figure 2-1 représente schématiquement la machine asynchrone en trois phases. Cette machine comporte six enroulements : trois sur le stator et trois sur le rotor. Les enroulements du stator sont fixes et sont décalés de 120° les uns par rapport aux autres dans l'espace. Ils sont traversés par trois flux magnétiques variables. Le rotor, quant à lui, est constitué de trois enroulements identiques décalés de 120° dans l'espace [2].

Il est important de noter que ces enroulements sont en coupe, ce qui signifie que la tension à leurs bornes est nulle. Cela permet de réduire les pertes dans la machine et de maintenir une tension équilibrée sur l'ensemble des enroulements. Cette configuration en trois phases permet à la MAS de fonctionner de manière efficace et de générer un champ magnétique tournant qui entraîne la rotation du rotor [2].

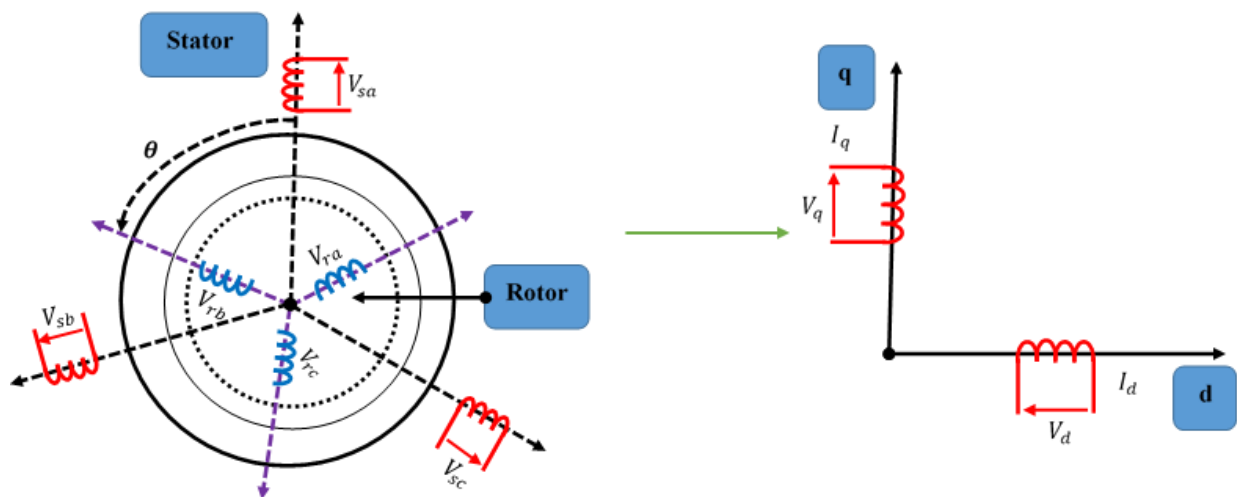


Figure 2-1 Représentation schématique d'une MAS triphasée.

2.4. Equation générale de la machine asynchrone

Les trois types de conditions reflétant le comportement de la machine asynchrone triphasée sont les suivants [3]:

2.4.1 Équations électriques

En appliquant la loi d'Ohm à chaque phase de la machine asynchrone triphasée (comme représenté sur la Figure 2.1, les deux conditions statoriques et rotoriques peuvent être exprimées comme suit [2-4]:

Pour toutes les phases statoriques :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

En structure consolidée :

$$[Vsabc] = [Rs]. [Isabc] + \frac{d}{dt} [\phi_sabc] \quad (2.2)$$

Pour toutes les phases rotoriques ;

Les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

En structure consolidée

$$[0] = [Rrabc]. [I_rabc] + \frac{d}{dt} [\phi_rabc] \quad (2.4)$$

avec :

- **Rs et Rr** : Résistances par phase respectivement du stator, et du rotor.

2.4.2 Equations magnétiques

Les hypothèses simplificatrices de la MAS d'obtenir des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone triphasée, qui peuvent être écrites sous forme matricielle [2-4] :

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + M_0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

En structure consolidée :

$$[\phi_{sabc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (2.7)$$

Tel que :

$$[\phi_{rabc}] = [L_{rr}][I_{rabc}] + [M_{sr}]^t [I_{sabc}] \quad (2.8)$$

On obtient donc :

$$[M_{sr}] = M0 \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

La substitution des équations (2.7) et (2.8) dans les deux équations (2.3) et (2.4), respectivement, nous obtenons les deux expressions suivantes [2-4] :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + [L_{ss}] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (2.10)$$

$$[V_r] = [0] = [R_r] \cdot [I_r] + [L_{rr}] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [I_s]) \quad (2.11)$$

2.4.3 Équations mécaniques

L'analyse des caractéristiques de la machine asynchrone non convergente met en évidence non seulement les limites électriques (*Tension, flux et courant*), mais également les limites mécaniques (couple, vitesse) [2-4] :

$$C_{em} = p [I_{sabc}]^T \frac{d}{dt} [M_{sr}] [I_{rabc}] \quad (2.12)$$

L'équation du mouvement de la machine est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (2.13)$$

Ou : $\Omega = \frac{\omega}{p}$

Avec :

- J : Moment d'inertie du rotor ;
- Ω : Vitesse angulaire mécanique du rotor;
- f : Coefficient de frottement visqueux;
- C_{em} : Couple électromagnétique délivré par le moteur ;
- C_r : Couple résistant, ou de charge ;
- ω : Vitesse angulaire électrique du rotor.

La disposition des conditions (2.10) et (2.11) est effectivement gênante car les détails du réseau d'inductances $[Msr]$ et $[Msr]^T$ varient en fonction de la position relative du rotor et du stator angle θ ce qui nécessite leur recalculations à chaque étape de simulation. Pour pallier ce problème, on utilise des transformations numériques pour décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles avec des coefficients constants. Ces transformations doivent être rapides et prendre en compte les inductances partagées pour permettre une modélisation précise de l'interaction électromagnétique entre le stator et le rotor. Les transformations de *Park* sont l'une des méthodes couramment utilisées pour cela (*voir l'Annexe A*) [2-3][5] :

2.5 Modélisation de l'onduleur de tension

Les caractéristiques des composants de puissance ne sont pas déterminées uniquement par leur niveau de puissance et leur fréquence d'échange. En général, les composants plus rapides sont capables d'échanger de l'énergie à des niveaux de puissance plus faibles, et vice versa. Par exemple, les MOSFT sont des composants très rapides mais de puissance modérée. Les bipolaires sont plus lents que les MOSFT mais sont plus adaptés aux niveaux de puissance moyens (jusqu'à environ 10 kW à une fréquence de 20 kHz). Les IGBT sont des composants de puissance standard pouvant être utilisés jusqu'à environ 20kHz et pour plusieurs kW de puissance. Les thyristors GTO sont adaptés pour les applications haute puissance et permettent un contrôle progressif de l'ouverture et de la fermeture, contrairement au thyristor classique. [4].

Dans cette étude, l'onduleur de tension choisi est un onduleur à trois niveaux avec transmission de trois niveaux de tension ($+U_{c1}$, 0 , $-U_{c2}$). Plus précisément, il s'agit d'un onduleur de tension à trois niveaux avec serrage par point neutre (NPC), tel que présenté dans (Figure 2.2) [5-6].

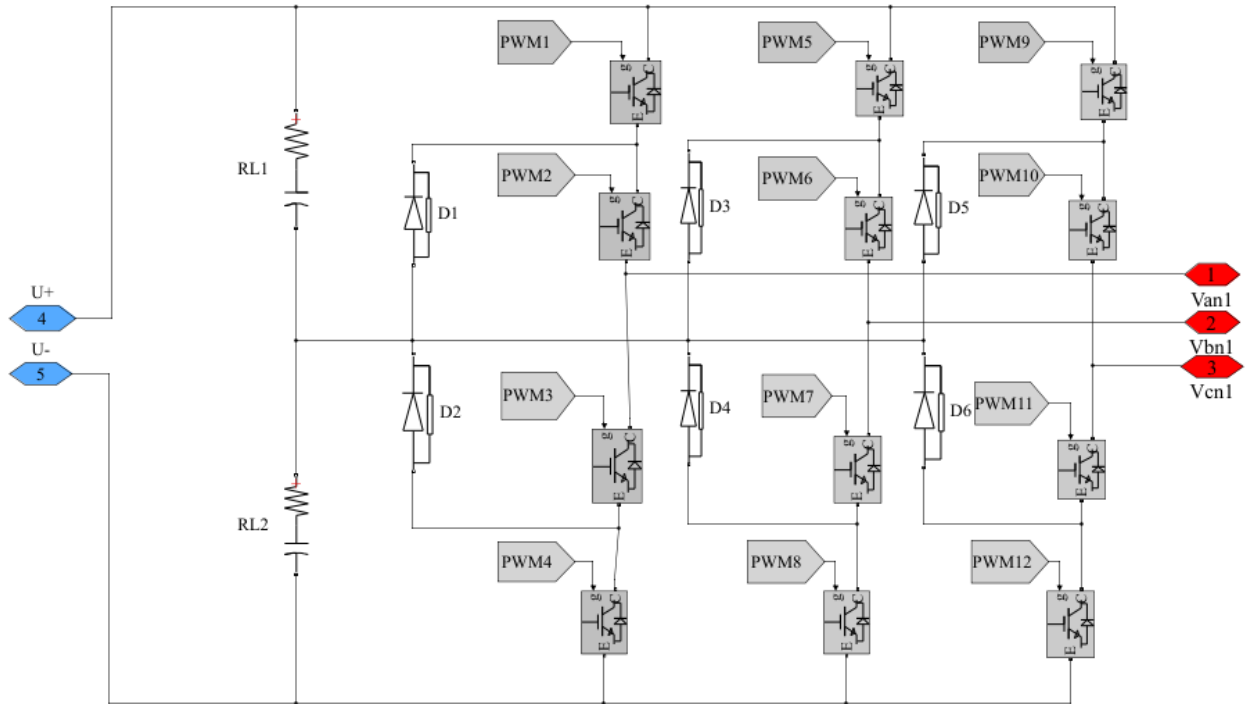


Figure 2-2 Structure de l'onduleur triphasé à trois niveaux.

Les capacités de commutation de l'onduleur sont supposées être élevées. Par conséquent, quelle que soit l'intensité de courant circulant dans l'alimentation, la tension aux bornes reste constante. $U_{c1} = U_{c2} = U_{c3}$ La chute de tension aux bornes des semi-conducteurs est négligeable en dessous de la tension de claquage qui est d'environ quelques centaines de volts [7].

Pour éviter tout court-circuit des sources de tension causé par la conduction de certains commutateurs et pour assurer une maîtrise totale du convertisseur, une commande supplémentaire est mise en place [8].

$$\begin{cases} B_{x1} = \overline{B_{x4}} \\ B_{x2} = \overline{B_{x3}} \end{cases} \quad (2.14)$$

Avec:

✚ B_{xi} : Commande de base du transistor S_{xi} d'un bras x , $x = a, b, c$ et $i = 1, 2, 3$ et 4.

Les fonctions de connexion des bras de l'onduleur à trois sont donné par :

$$\begin{cases} F_{X1}^b = F_{x1} \cdot F_{x2} \\ F_{X0}^b = F_{x3} \cdot F_{x4} \end{cases} \quad (2.15)$$

Avec :

✚ X : Numéro du bras et $x = a, b$ et c .

Les potentiels des nœuds **a**, **b** et **c** de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point **N** de la source de tension d'entrée, sont donnés par le système suivant :

$$\begin{cases} V_{an} = F_{11} \cdot F_{12} U_{c1} - F_{13} F_{14} \cdot U_{c2} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{13} F_{14}) U_c \\ V_{bn} = F_{21} \cdot F_{22} U_{c1} - F_{23} F_{24} \cdot U_{c2} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{23} F_{24}) U_c \\ V_{cn} = F_{31} \cdot F_{32} U_{c1} - F_{33} F_{34} \cdot U_{c2} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{33} F_{34}) U_c \end{cases} \quad (2.16)$$

L'onduleur de tension à trois niveaux est équivalent à deux onduleurs à deux niveaux en série.

$$\begin{cases} F_{11}^b = F_{11} \cdot F_{12} \\ F_{10}^b = F_{13} \cdot F_{14} \\ F_{21}^b = F_{21} \cdot F_{22} \\ F_{20}^b = F_{23} \cdot F_{24} \\ F_{31}^b = F_{31} \cdot F_{32} \\ F_{30}^b = F_{33} \cdot F_{34} \end{cases} \quad (2.17)$$

En introduisant L'expression de ces dernières dans les tensions d'entrée on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{an} = F_{11}^b U_{c1} - F_{10}^b U_{c2} = (F_{11}^b - F_{10}^b) U_c \\ V_{bn} = F_{21}^b U_{c1} - F_{20}^b U_{c2} = (F_{21}^b - F_{20}^b) U_c \\ V_{cn} = F_{31}^b U_{c1} - F_{30}^b U_{c2} = (F_{31}^b - F_{30}^b) U_c \end{cases} \quad (2.18)$$

Les tensions composées sont donnés par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = (F_{11} \cdot F_{12} - F_{21} \cdot F_{22}) U_{c1} - (F_{13} F_{14} - F_{23} F_{24}) \cdot U_{c2} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = (F_{21} \cdot F_{22} - F_{31} \cdot F_{32}) U_{c1} - (F_{23} F_{24} - F_{33} F_{34}) \cdot U_{c2} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = (F_{31} \cdot F_{32} - F_{11} \cdot F_{12}) U_{c1} - (F_{33} F_{34} - F_{13} F_{14}) \cdot U_{c2} \end{cases} \quad (2.19)$$

Si on admet que les tensions simples du récepteur forment un système triphasé équilibré, on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{V_{ab} - V_{ca}}{3} \\ V_{bn} = \frac{V_{bc} - V_{ab}}{3} \\ V_{cn} = \frac{V_{ca} - V_{bc}}{3} \end{cases} \quad (2.20)$$

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

$$\begin{bmatrix} U_{ab} \\ U_{bc} \\ U_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{210}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \quad (2.21)$$

Les tensions simples sont données comme suite [5]:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} U_c \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

2.6 Stratégie de commande MLI-ST

La technique de modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle consiste (MLI-ST) à comparer une onde modulante basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. De plus, les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante, la fréquence de commutation des interrupteurs étant fixée par la fréquence de la porteuse [9] :

$$\begin{cases} V_{p1}(t) = \frac{2}{\pi} V_{mp} \cdot \text{arc. sin.} \cos(2\pi f_p \cdot t) \\ V_{p2}(t) = \frac{2}{\pi} V_{mp} \cdot \text{arc. sin}(\cos(2\pi f_p \cdot t) - \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (2.23)$$

Le fonctionnement de la commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) à trois niveaux est illustré ci-dessous.

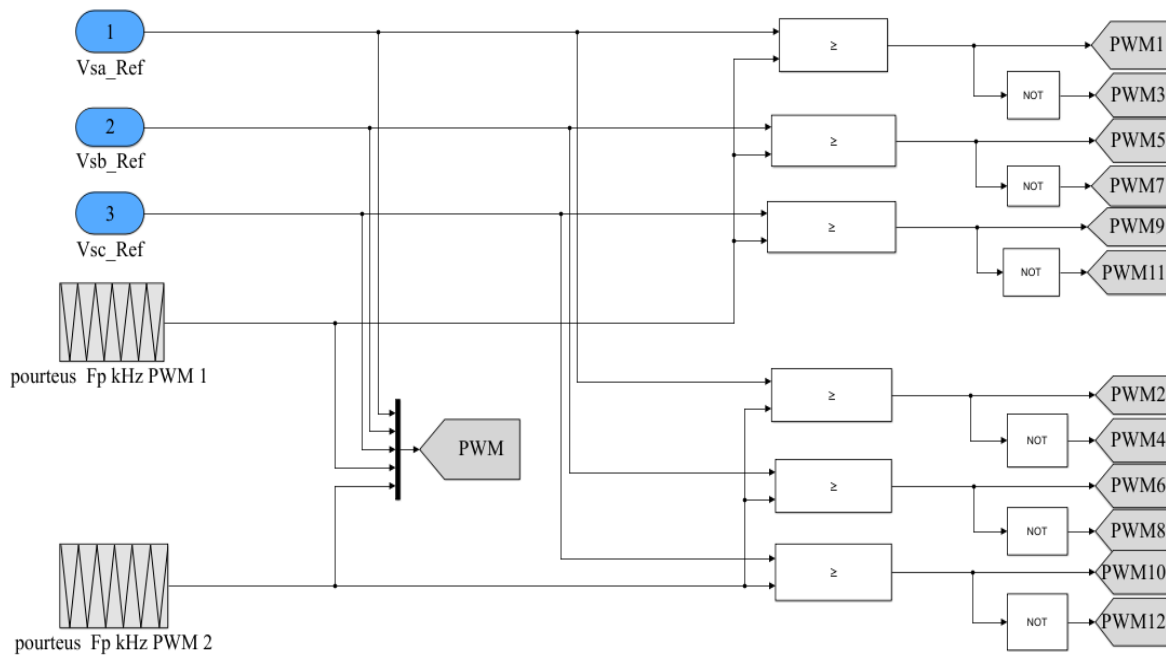


Figure 2-3 Principe de la commande MLI-ST à trois niveaux.

Pour générer les impulsions de commande **MLI-ST** du convertisseur à trois niveaux de tensions, il est nécessaire d'avoir deux porteuses triangulaires de même amplitude et fréquence (comme le montré sur la Figure 2.3). Ces porteuses sont ensuite comparées au signal de référence (**sinusoïdal**) d'amplitude et de fréquence. Chaque comparaison renvoie 1 si la porteuse est supérieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire [9] :

Après avoir simulé la commande **MLI-ST** de l'onduleur de tension à trois niveaux, les formes d'ondes obtenues sont présentées sur la Figure 2.4.

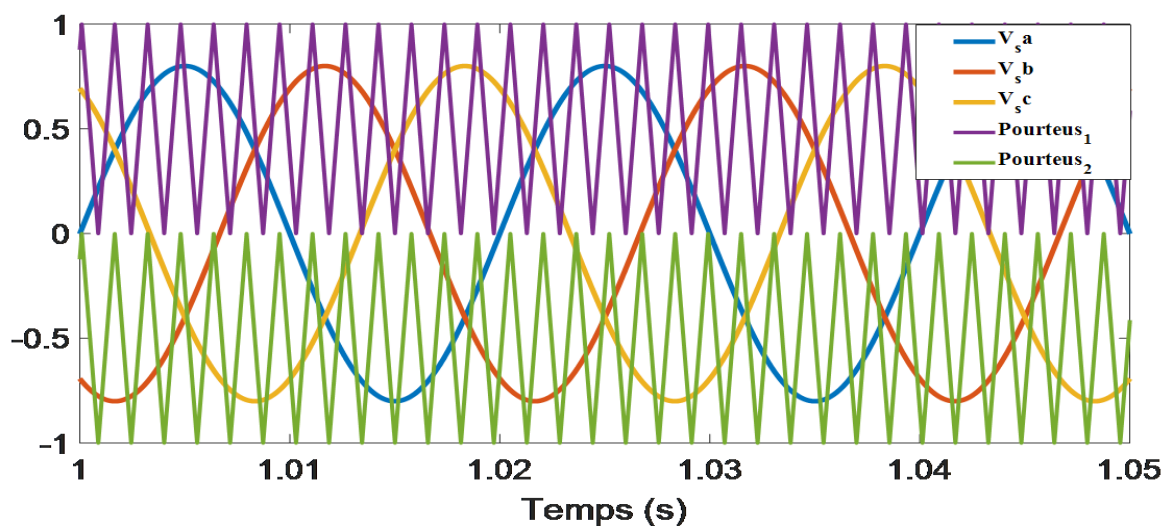


Figure 2-4 Les tensions de référence avec les signaux porteuses de l'onduleur à trois niveaux.

2.7 Simulation de l'association machine-onduleur sans commande

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation de la MAS triphasée alimentée par un onduleur de tension à trois niveaux commandés par la technique MLI-ST, sans aucune commande appliquée. Nous nous concentrons uniquement sur les résultats correspondant à la MLI-ST. Afin de simuler le comportement du système réel, nous avons développé un modèle de commande de la MAS triphasée alimentée par un onduleur de tension à trois niveaux sous forme de schéma-blocs (Figure 2.5), en se basant sur le modèle du système d'entraînement présenté précédemment. Ce modèle est implémenté dans l'environnement de simulation *Matlab/Simulink*.

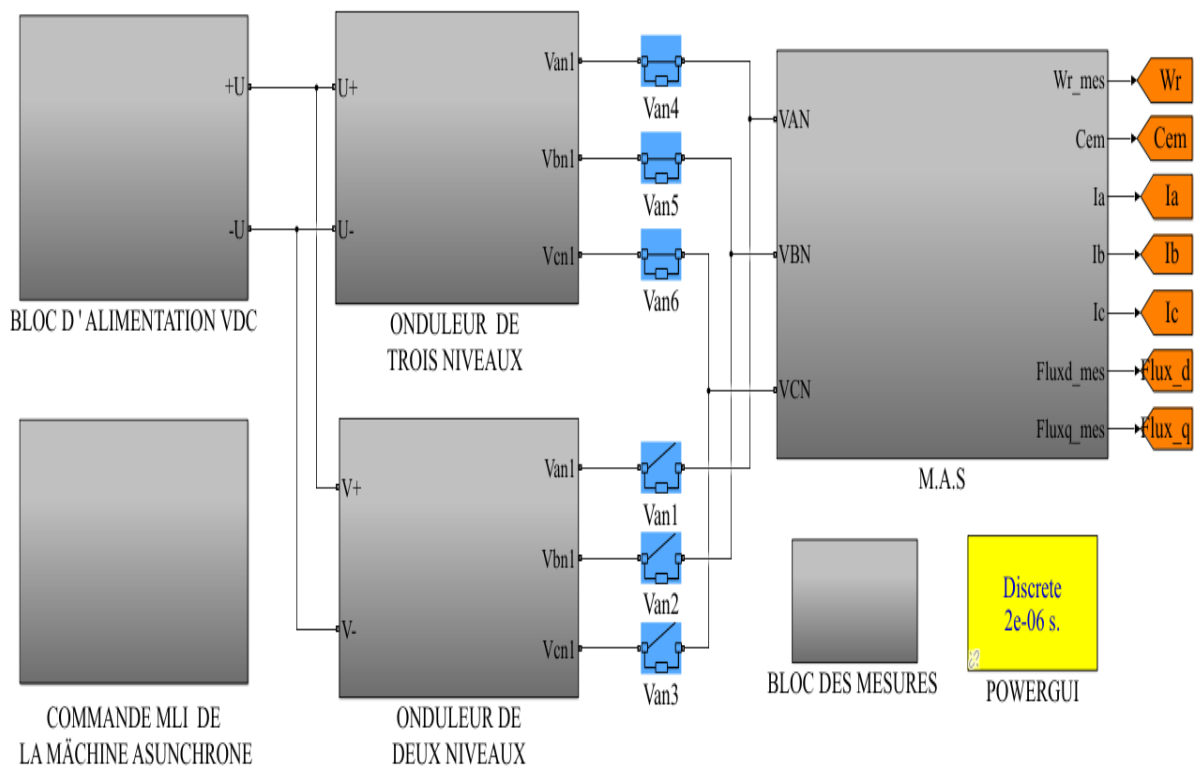


Figure 2-5 Modèle de simulation sous *Matlab/Simulink* de l'association machine-onduleur Trois niveaux.

2.7.1 Résultats de simulation

L'entraînement électrique basé sur une MAS triphasée alimentée par un onduleur de tension à trois niveaux sans contrôle est démarré à une vitesse de $W_m=104.7 \text{ rad/s}$. Ensuite, un couple de charge $C_r=10 \text{ N.m}$ est appliqué à l'instant $t=2\text{s}$. Les résultats de simulation de fonctionnement (sans commande) sont présentés par les courbes suivantes:

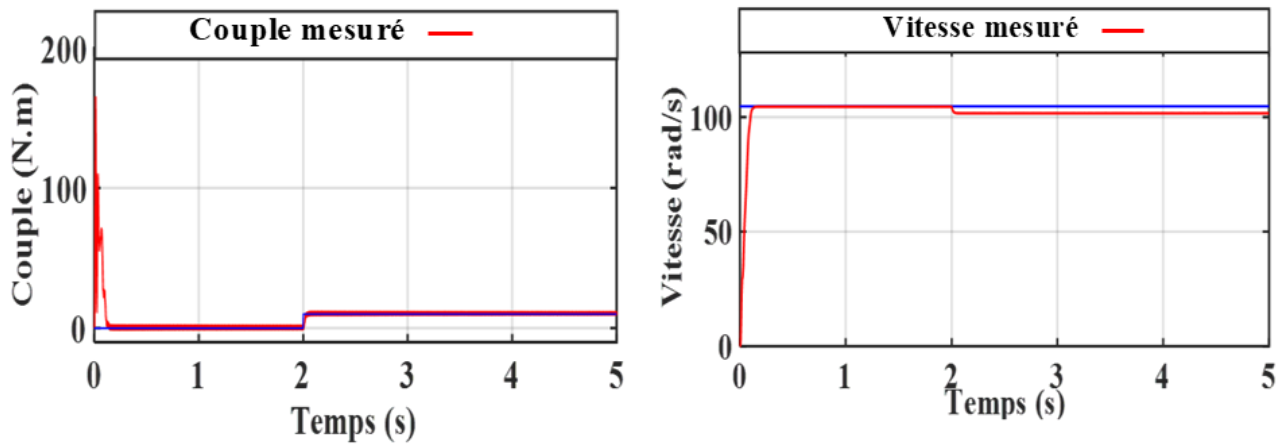


Figure 2-6 Allures des grandeurs mécaniques de la MAS sans commande.

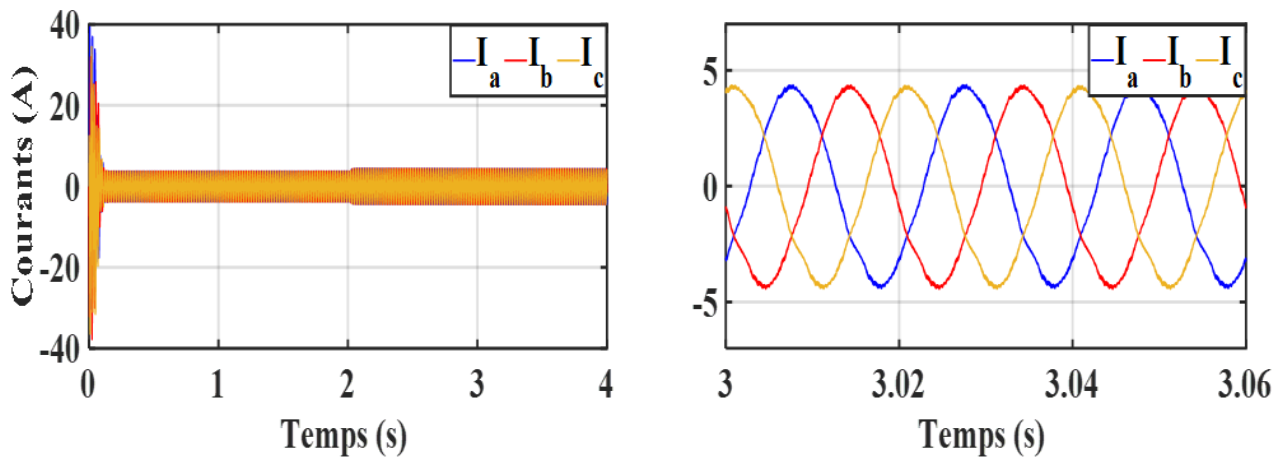


Figure 2-7 Allures des courants des phases de la MAS sans commande.

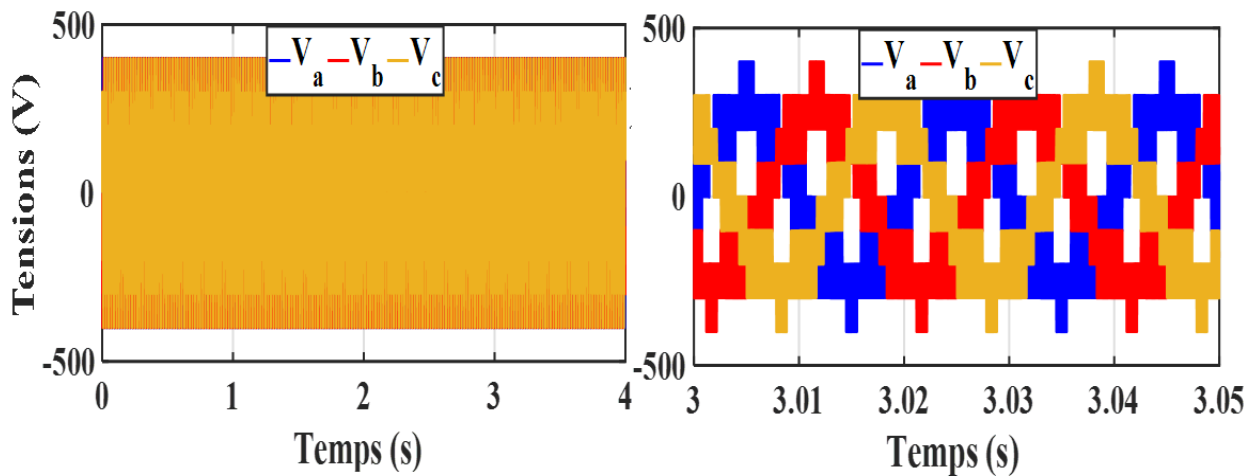


Figure 2-8 Allure des tensions aux bornes de la MAS sans commande.

Au démarrage et pendant le régime transitoire, la vitesse de la MAS augmente de manière presque linéaire pour atteindre $W_m=104.7 \text{ rad/s}$ à $t=0.52\text{s}$ (Figure 2.6). Les courants des phases statoriques de la MAS présentent des dépassements excessifs qui entraînent une forte demande de courant (Figure 2.7). Cependant, le glissement de la machine devient un peu plus important qu'à vide, la tension d'alimentation et les courants des phases statoriques sont presque en phase et de même signe.

Après 2 secondes, lorsque le couple de charge est ajouté, la vitesse diminue légèrement en raison d'augmentation de la charge et fixé dans la nouvelle valeur 101.7 rad/s avec un couple moteur de $Cr=10\text{N.m}$. Les courants augmentent davantage pour compenser la demande de puissance supplémentaire nécessaire pour générer le couple de charge.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné la modélisation de la machine asynchrone triphasée ainsi que celle de l'onduleur à trois niveaux. Ces modélisations nous ont permis de développer un modèle mathématique de la machine ainsi que de l'alimentation par l'onduleur de tension à trois niveaux, commandé par la stratégie de MLI-ST. Nous avons utilisé la transformation de Park le système d'équations d'état de la machine, que nous avons validée à travers une simulation numérique sous Matlab/Simulink. Enfin, nous avons interprété les résultats de simulation obtenus.

Dans le prochain chapitre, nous présentons la commande vectorielle de la machine asynchrone triphasée alimentée par un onduleur de tension à trois niveaux.

Référence bibliographique

- [1] E. Zaidi, K. Marouani, H. Bouadi, K. Nounou, and M. Becherif, "Circulating current reduction-based hybrid controller of an electrical drive system fed by two parallel inverters", *Electrical Engineering*, vol. 103, no. 1, pp. 205-216, April 2021.
- [2] E. Zaidi "Etude de la commande d'un entraînement électrique de puissance à base d'une architecture segmentée, Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2021.
- [3] K. Marouani, "Contribution à la commande d'un entraînement électrique à base de moteur asynchrone double étoile ", Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2010.
- [4] R. Casimir, "Diagnostic des défauts des machines asynchrones par reconnaissance des formes," Thèse de Doctorat de l'Ecole Doctorale d'Electronique, D'Électrotechnique, et D'Automatique à l'Université de Lyon, France, 2003.
- [5] E. Schaeffer, "Diagnostic des machines asynchrones modèle et outils paramétriques dédiés à la simulation et la détection des défauts," Thèse de Doctorat de l'Ecole Générale de Nantes, France, 1999.
- [6] L. Baghli, "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques," Thèse de Doctorat de l'Université Henri Point cary, Nancy I, France. 1999.
- [7] T. Boumegoura, " Recherche de signature électromagnétique des défauts dans une machine asynchrone et synthèse d'observateurs en vue du diagnostic," Thèse de Doctorat de l'Ecole Centrale de Lyon Ecully, France, 2001.
- [8] E. Zaidi, K. Marouani, H. Bouadi, L. Bentouhami, and E. Merabet, "Fuzzy Sliding Mode Method for Speed regulation of a Dual Star Induction Machine Drive fed by Multi-level Inverters", In *IEEE 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS2018)*, 24-25 November 2018, Médéa, Algiers, Algeria, 2018
- [9] E. Zaidi, K. Marouani, A. E Mabrek, E. Merabet and L. Bentouhami, "Fuzzy Logic Control of Multi-Phase Induction Machine Drives Based on Cascaded Hybrid Multi-level Inverters," In *IEEE the International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb CISTEM 2018, USTHB-Algiers, Algeria, 29-31 October 2018.*

Chapitre 3 :

Commande vectorielle de la MAS alimentée par un onduleur de tension à multi-niveaux

Chapitre 3: Commande vectorielle de la MAS alimentée par un onduleur de tension à multi-niveaux

3.1 Introduction

La commande de la machine asynchrone est complexe car le couple et le flux sont intimement liés, de sorte que toute modification apportée à l'un peut affecter l'autre. Toutefois, dans le cas de la machine à courant continu à excitation différenciée, ces deux facteurs sont généralement découplés, ce qui facilite leur commande.

Dans cette section, nous souhaitons introduire la commande d'orientation de flux dans une machine à trois phases alimentée par une tension non sinusoïdale commandée. Nous avons réalisé une reproduction pour la commande du flux rotorique sur une machine alimentée par un onduleur de tension à trois niveaux, dans le but de mieux comprendre cette technique [1-2].

Au cours de ce chapitre, nous proposons la commande vectorielle pour la machine asynchrone. Nous commençons par fournir la modélisation de la machine, puis nous comparons les réponses de l'onduleur à deux niveaux et à trois niveaux en mode normal et en mode dégradé.

3.2 Principe de la commande vectorielle

La complexité de la commande des systèmes d'entraînement électrique, tels que les machines à induction, réside dans la non-linéarité du système et dans l'effet de couplage intrinsèque entre le couple électromagnétique et le flux. Dans ce dernier cas, le couple électromagnétique est déterminé par la combinaison vectorielle du courant induit et du flux inducteur [1-4].

En revanche, dans les machines à courant continu, le champ inducteur et le courant induit sont généralement orthogonaux, ce qui facilite leur commande.

Le principe de la commande vectorielle (FOC) consiste à projeter les trois composantes du flux (statorique, rotorique ou entrefer) sur un axe de référence tournant à la vitesse ω_s [3] [4]. L'orientation de l'un de ces trois flux le long de l'axe “*d*” du référentiel est le principe fondamental de la commande par orientation du flux (commande vectorielle). Cette direction détermine la production du couple électromagnétique, similaire à celui de la machine à courant continu à excitation différente, où le développement du couple électromagnétique et la production de flux sont découplés. Il y a donc un découplage caractéristique entre la grandeur

commandant le flux (courant d'excitation) et celle liée au couple électromagnétique (le courant induit).

L'objectif de la commande vectorielle des machines asynchrones est de maîtriser leur comportement dynamique et statique en leur offrant une structure de contrôle similaire à celle d'une machine à courant continu à excitation différente. Cette approche permet de découpler le flux et le couple électromagnétique de la machine [3-6].

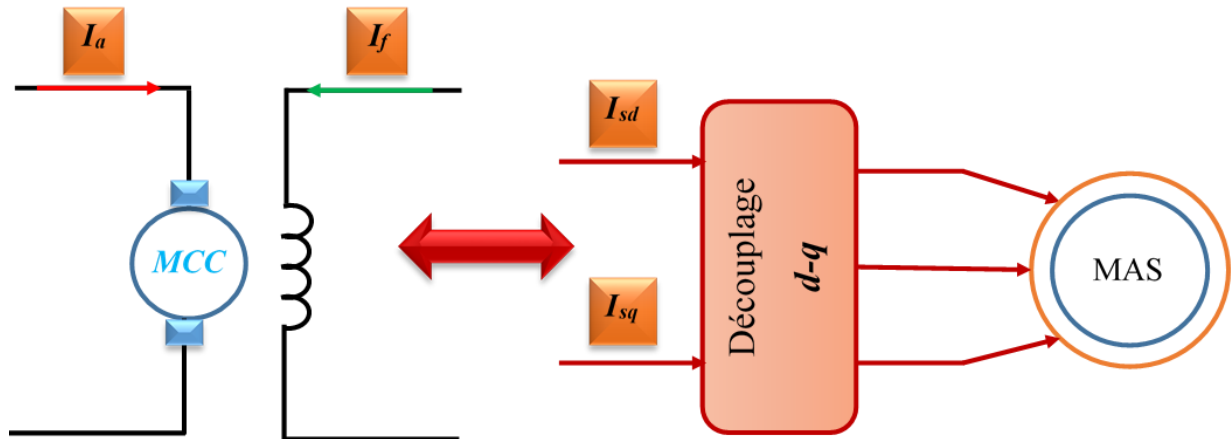


Figure 3-1 Principe de pilotage vectoriel de la machine à courant continu et de la machine asynchrone triphasé

La relation suivante décrit le couple électromagnétique de la machine à courant continu excitation séparée:

$$\begin{cases} C_{em} = K_a \phi_a I_a \\ \phi_a = K_f I_f \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec :

- I_a : Courant d'induit ;
- ϕ_a : Flux imposé par le courant d'excitation ;
- I_f : Courant d'excitation ;
- K_a et K_f : Constante.

L'équation suivante décrit le couple électromagnétique de la machine asynchrone triphasée:

$$C_{em} = K_m I_{sd} I_{sq} \quad (3.2)$$

3.2.1 Commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté

Dans le cadre de notre travail, nous optons pour la commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté. Cette méthode ne requiert pas l'estimation de l'amplitude du flux rotorique, mais utilise directement l'amplitude de référence ϕ_{rd}^* . Néanmoins, la commande vectorielle indirecte nécessite la présence de trois capteurs : un capteur de vitesse (position) du rotor et deux capteurs de courant statorique [3-4][7-8].

La commande par orientation du flux rotorique nécessite une connaissance précise de la position du flux à orienter en tout temps et de le faire coïncider avec l'axe direct "d" afin de garantir un découplage correct entre le flux et le couple électromagnétique, quel que soit le point de fonctionnement [7-8]. On peut choisir d'orienter le repère de manière à ce que l'axe "d" porte entièrement le flux statorique, le flux rotorique ou le flux d'entrefer, ce qui permet d'obtenir un variateur de vitesse où le flux et le couple électromagnétique sont commandés indépendamment à travers les courants statoriques.

Sachant que la commande vectorielle avec orientation du flux rotorique nécessite les deux conditions suivant :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \phi_r^* \\ \phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Les équations de la machine asynchrone triphasée (2.12) et (2.13) Peuvent être transformées dans un référentiel lié aux champs tournants (d-q) comme suit :

Le couple de la machine dépend uniquement de la composante en quadrature du courant statorique I_{sq} :

$$C_{em}^* = p \frac{M}{L_r} \phi_r^* I_{sq} \quad (3.4)$$

Le flux rotorique ne dépend que le courant statorique I_{sd} :

$$\phi_r^* + T_r \frac{d\phi_r^*}{dt} = M I_{sd} \quad (3.5)$$

L'angle d'orientation est donné comme suit :

$$\theta_s = \int \theta_s + p\Omega_m \quad (3.6)$$

La pulsation rotorique peut être exprimée par :

$$\omega_r = \frac{M I_{sq}}{T_r \phi_r^*} \quad (3.7)$$

En régime permanent :

$$\phi_r^* = M I_{sd} \quad (3.8)$$

On obtient les équations de tension de référence sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd}^* = R_s I_{sd} + \sigma L_s \frac{dI_{sd}}{dt} + \frac{M}{L_r} \frac{d\phi_r}{dt} - \omega_s \sigma L_s I_{sq} \\ V_{sq}^* = R_s I_{sq} + \sigma L_s \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_s \frac{M}{L_r} \phi_r + \omega_s \sigma L_s I_{sd} \end{cases} \quad (3.9)$$

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (3.10)$$

Les éléments T_r et σ est écrite comme suit :

$$\begin{cases} T_r = \frac{L_r}{R_r} \\ \sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \end{cases} \quad (3.11)$$

avec :

- ✚ T_r : Constante de temps rotorique ;
- ✚ σ : Coefficient de dispersion de Blondel.

3.2.2 Schéma de la commande vectorielle indirecte à flux rotorique orienté de la MAS

En utilisant les équations précédentes, on peut déduire le schéma bloc général de contrôle de la vitesse de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension à trois niveaux basé sur la commande vectorielle, comme le montré sur la Figure 3.2.

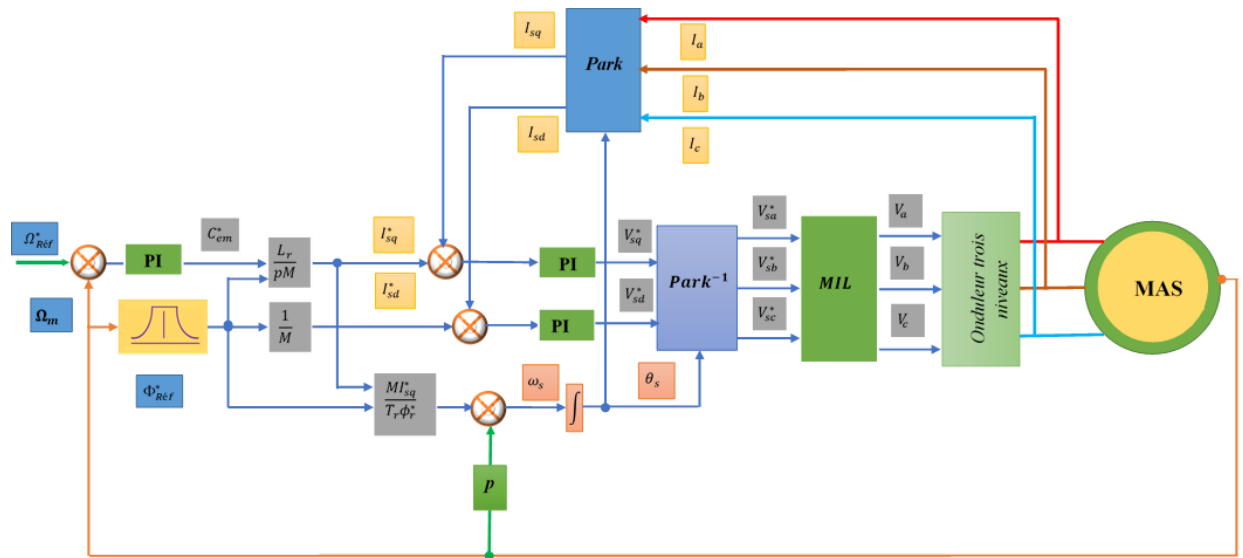


Figure 3-2 Schéma global de la commande vectorielle indirecte de la MAS.

Le schéma de commande de la vitesse pour la machine asynchrone triphasée basé sur la commande vectorielle est présenté sur la Figure 3.2. Il se compose de plusieurs boucles de régulation en cascade et d'un bloc de calcul de l'angle θ_s . Les régulateurs internes concernent les courants I_{sd} et I_{sq} , tandis que la régulation externe concerne la vitesse Ω . La sortie du régulateur de vitesse fournit la référence de couple électromagnétique (liée au courant I_{sq}), tandis que la référence de courant I_{sd} est liée au flux rotorique appliqué. Les tensions de référence V_{sd}^* et V_{sq}^* obtenues à la sortie des régulateurs de courant sont transformées en utilisant l'angle θ_s . Dans le repère lié au stator et servent de références pour le bloc MLI. Le calcul des différents régulateurs est expliqué en détail dans l'Annexe B.

3.2.3 Simulation de la commande vectorielle du système

Le système d'entraînement électrique fonctionne à une fréquence d'échantillonnage de 8 kHz, une tension du bus continue $V_{dc}=400V$. Le flux rotorique de référence (ϕ_r^*) est fixé à 0,8Wb. La vitesse de référence imposée est de $N_{Réf}=1000$ tr/min avec un couple de charge d'amplitude $Cr=10N.m$ appliqué à l'instant $t=1.5s$. Les constantes proportionnelles et intégrales des régulateurs traditionnels PI de la vitesse et des courants directs et quadrature sont calculées par la méthode présentée dans l'Annexe A. Les paramètres des grandeurs mécaniques et électriques de la MAS sont donnés dans le tableau C.1 de l'Annexe C.

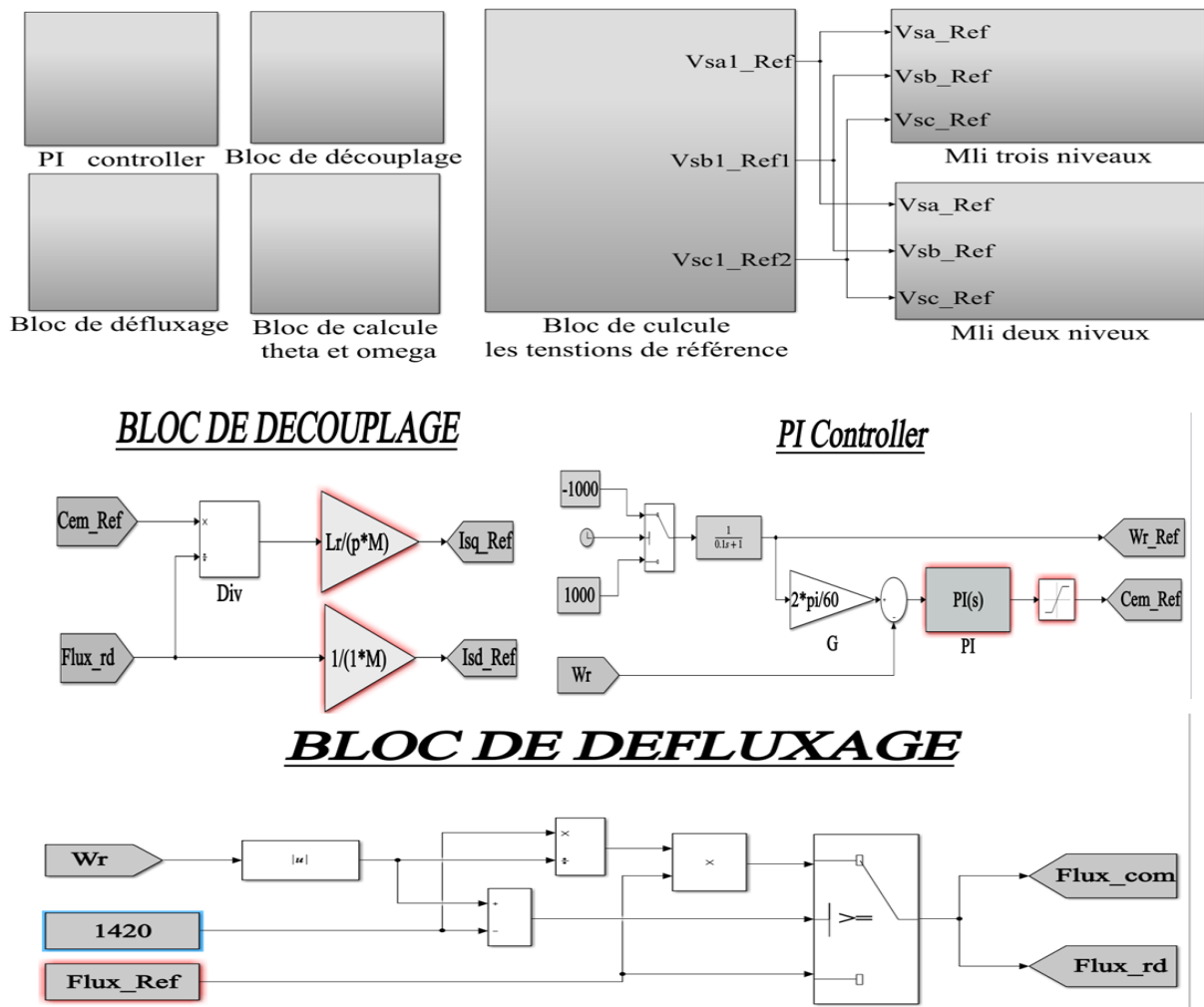


Figure 3-3 Schéma de la commande vectorielle indirecte du système sous *Matlab/Simulink*.

Dans cette partie, nous présentons l'ensemble des résultats de simulation de la commande vectorielle de la MAS triphasée alimentée par un onduleur de tension (deux niveaux ou trois niveaux) contrôlé par la technique MLI-Sinus tringle (MLI-ST). De plus, donc nous nous limitons aux résultats correspondes faite sous *Matlab/Simulink*.

3.3 Résultats de simulation

3.3.1 Changement du sens de rotation

Dans cette partie nous avons présenté les résultats de simulation de l'étude comparative entre les onduleurs des tensions de deux niveaux et à trois niveaux, est le système de commande à l'aide d'une commande vectorielle. Les tests de robustesse choisie vis-à-vis de notre système sont : Le changement de sens de rotation suivi par l'application d'un couple de charge.

Les résultats de simulation sont effectués dans les mêmes conditions : Initialement, une vitesse de référence de 1000 tr/min ($W_{Réf}=+104.7\text{rad/s}$) a été définie, accompagnée d'un couple de charge de 15 Nm après 2 secondes. Ensuite, à 2,5 secondes, la vitesse de référence a été modifiée pour être de -1000 tr/min ($W_{Réf}=-104.7\text{rad/s}$), tandis que le couple de charge est passé à -15 Nm. et le flux de référence est $\text{Flux}=0.8W_e$

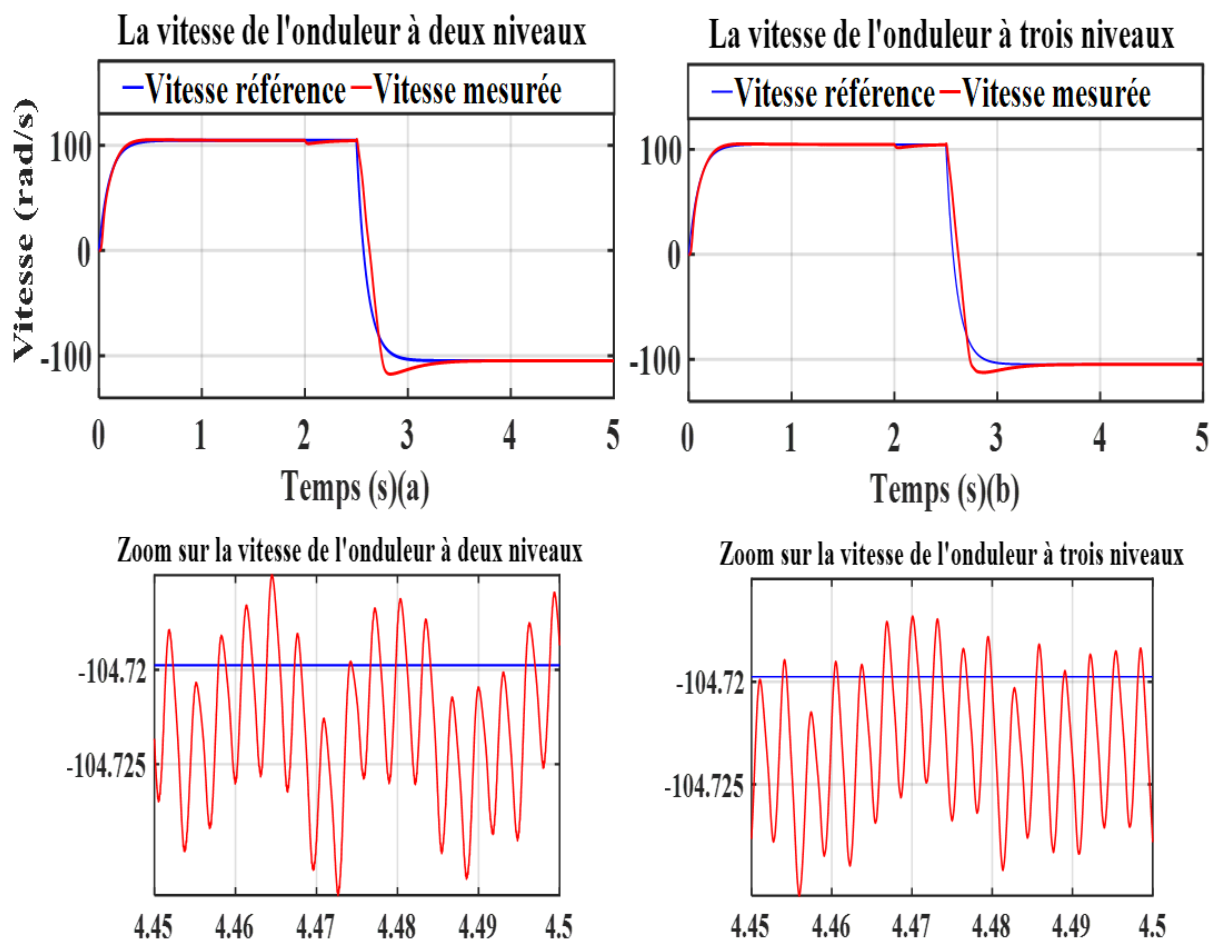


Figure 3-4 Allures des vitesses de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux.

Initialement, dans notre simulation, la vitesse de rotation est réglée sur une valeur de référence $N_{Réf}=1000 \text{ tr/min}$ ($W_{Réf}=104.7\text{rad/s}$) dans le sens positif, conformément à la consigne initiale. Lorsque l'onduleur est activé en utilisant la commande vectorielle indirecte IFOC, il ajuste les courants statoriques pour contrôler la vitesse du moteur. À partir de l'instant $t = 1,5 \text{ s}$, un couple de charge est ajouté, ce qui peut entraîner une décélération de la vitesse de rotation du moteur. L'effet du couple de charge peut causer une diminution de la vitesse par rapport à la vitesse de référence initiale. Ensuite, à l'instant $t = 2,5 \text{ s}$, la vitesse continue de diminuer jusqu'à atteindre $N_{Réf} = -1000 \text{ tr/min}$ ($W_{Réf} = -104,7 \text{ rad/s}$) dans le sens négatif. Ce

changement de vitesse est dû à une modification de la consigne de vitesse. Le système ajuste les courants statoriques pour inverser le sens de rotation du moteur et atteindre la nouvelle vitesse de référence négative.

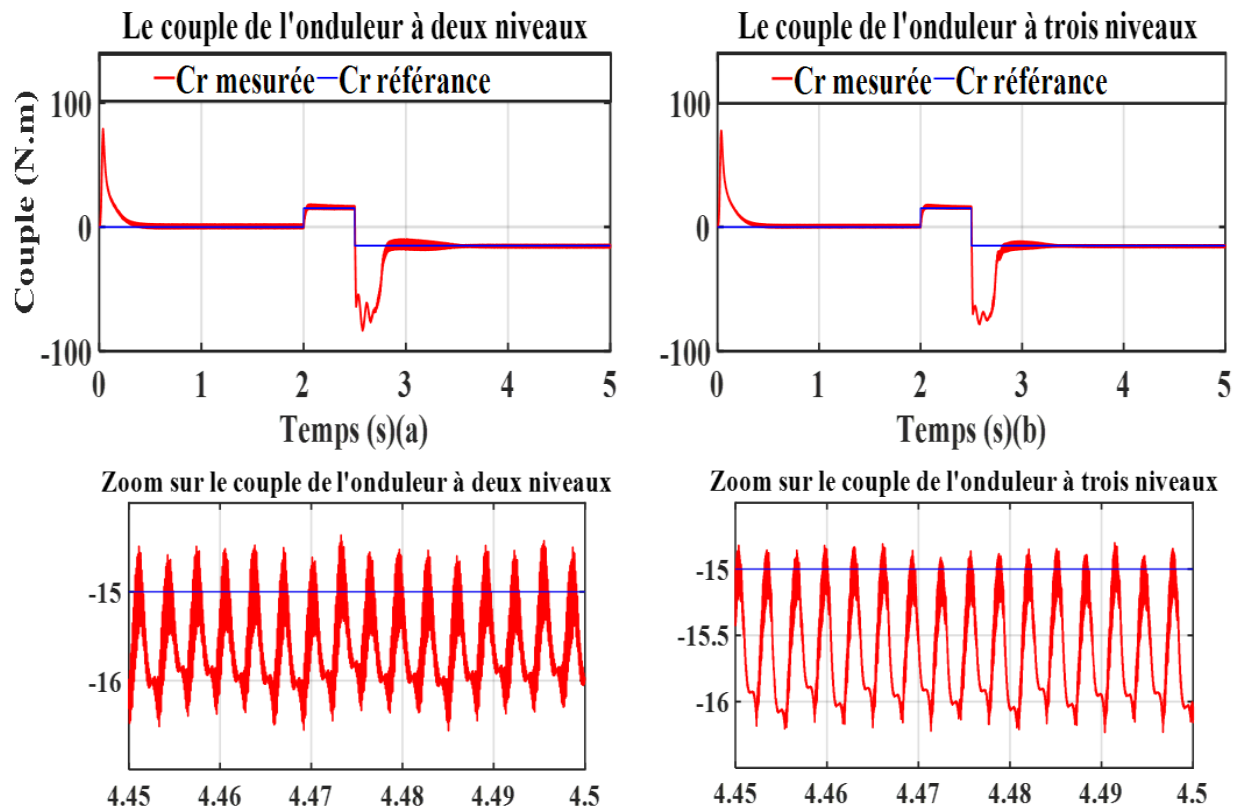


Figure 3-5 Allures des couples de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux , (b) : Onduleur trois niveaux.

Au début de la simulation, les deux types d'onduleurs (**deux niveaux et trois niveaux**) chercheront à ajuster le couple moteur pour compenser le couple de charge supplémentaire le couple moteur est ajusté en fonction de la consigne de vitesse pour maintenir la vitesse souhaitée. Initialement, le moteur fonctionne sans charge et le couple est nul. Cependant, à l'instant $t = 2 \text{ s}$, un couple de charge de **15 Nm** est appliqué au moteur. Ce couple de charge représente une résistance externe exercée sur le moteur, ce qui entraîne une augmentation du couple nécessaire pour maintenir la vitesse de rotation du moteur. Ensuite, à l'instant $t = 2,5 \text{ s}$, le couple de charge est modifié pour être de **-15 Nm**. Ce changement de signe indique un changement de sens du couple de charge, ce qui exige un couple de réaction opposé pour maintenir la vitesse de rotation dans le sens inverse.

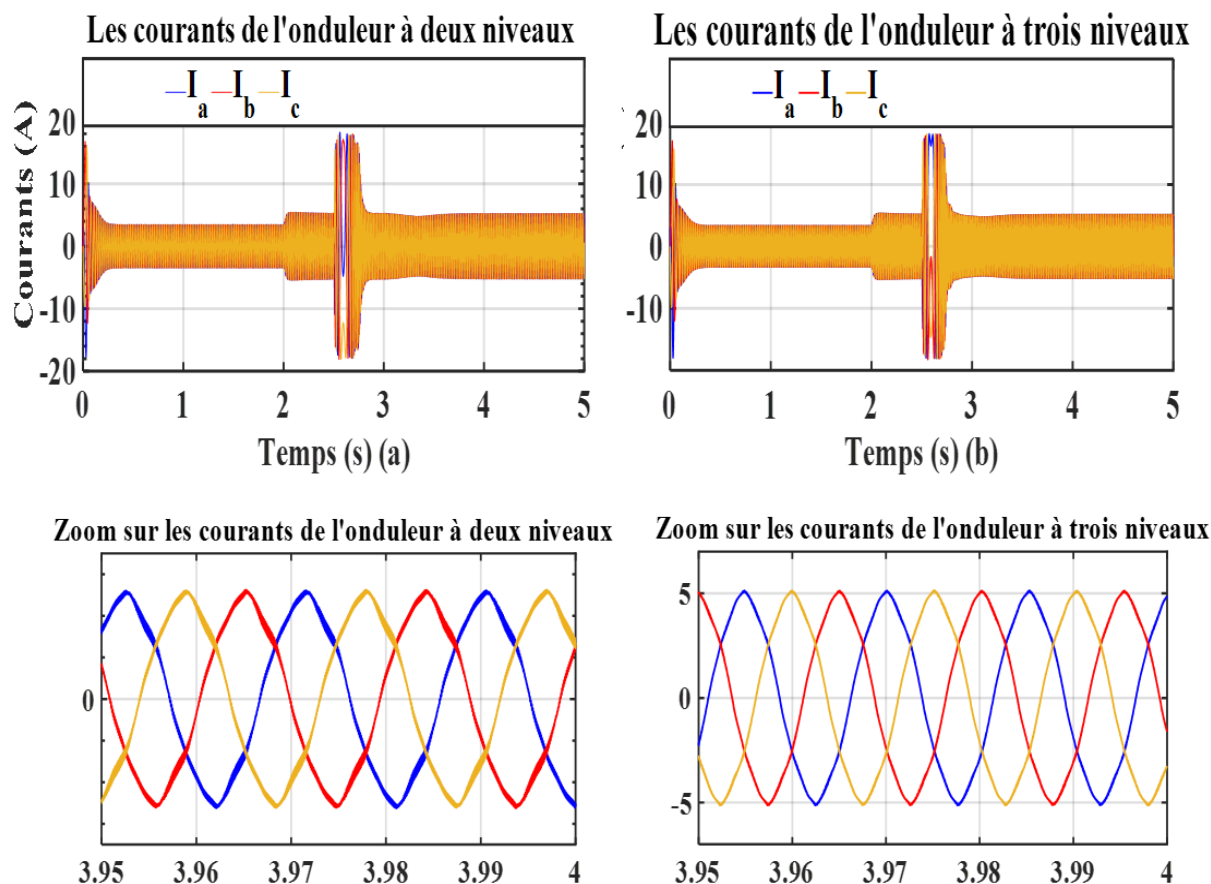


Figure 3-6 Allures des courants des phases de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux .

Initialement, lorsque la vitesse de référence est de **1000 tr/min**, les courants statoriques sont réglés pour atteindre les valeurs nécessaires afin de maintenir cette vitesse de référence. À l'instant $t = 2 \text{ s}$, lorsque le couple de charge de **15 Nm** est ajouté, les courants statoriques sont ajustés en conséquence pour compenser l'effet de ce couple de charge sur la vitesse du moteur. Ensuite, à l'instant $t = 2,5 \text{ s}$, lorsque la vitesse de référence est modifiée pour être de **-1000 tr/min**, les courants statoriques sont adaptés pour inverser le sens de rotation du moteur, en réponse à cette nouvelle référence de vitesse.

La variation des courants statoriques au fil du temps permet de visualiser l'adaptation du système de commande pour maintenir la vitesse et le couple du moteur conformes aux consignes. Cette analyse des courants statoriques nous permet de comprendre comment la commande vectorielle indirecte **IFOC** régule les courants pour contrôler le fonctionnement du moteur et assurer son bon fonctionnement malgré les changements de référence et de charge.

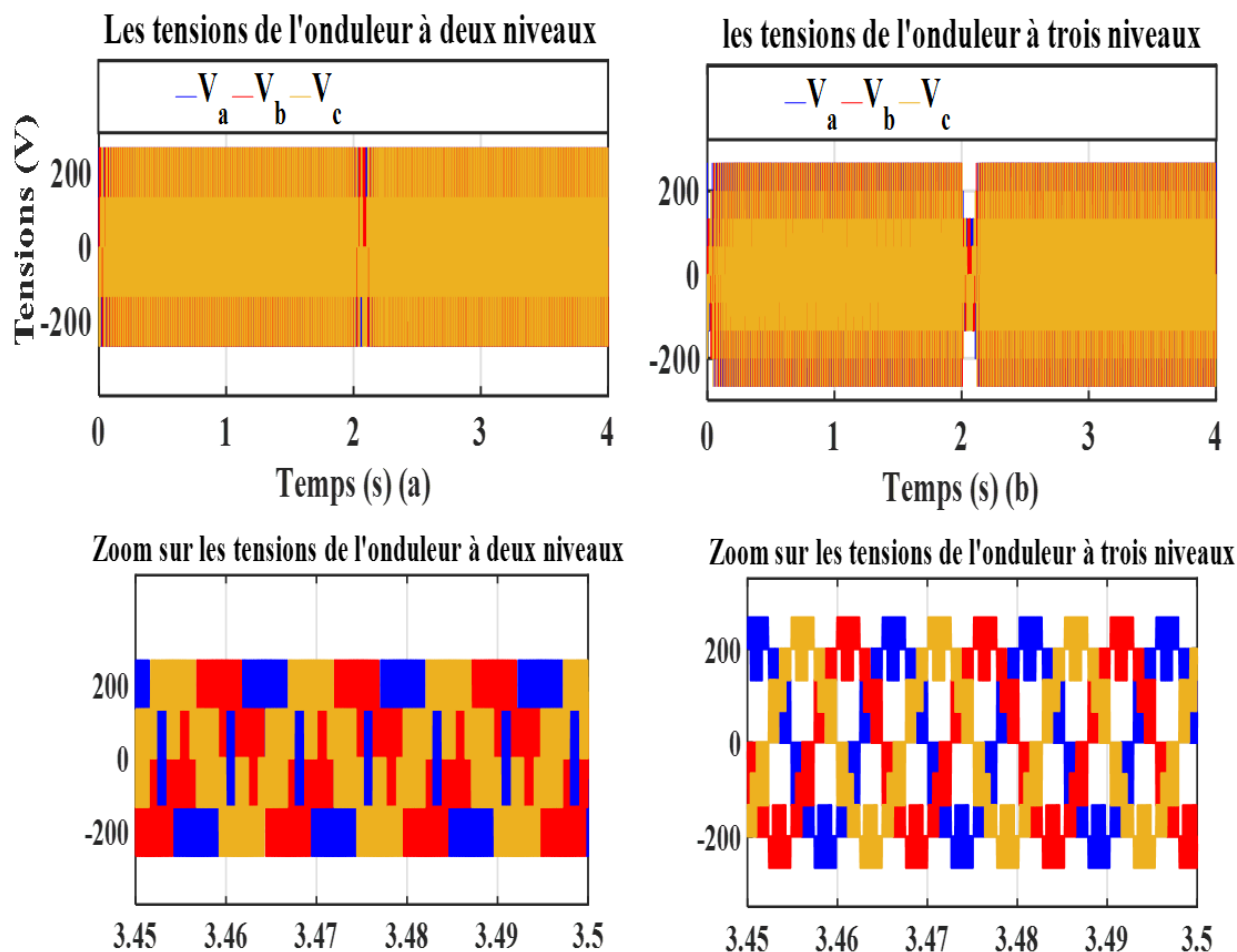


Figure 3-7 Allures des tensions aux bornes de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux

La tension de sortie de l'onduleur est également un paramètre important à analyser. Initialement, la tension de sortie de l'onduleur est ajustée pour atteindre la valeur nécessaire afin de maintenir la vitesse de référence de 1000 tr/min du moteur. Lorsque le couple de charge de 15 Nm est ajouté à l'instant $t = 2 \text{ s}$, l'onduleur ajuste les tensions de sortie pour compenser l'effet de ce couple de charge sur le moteur et maintenir la vitesse de rotation désirée. Ensuite, à l'instant $t = 2,5 \text{ s}$, lorsque la vitesse de référence est modifiée pour être de -1000 tr/min , les tensions de sortie de l'onduleur sont adaptées pour inverser le sens de rotation du moteur en réponse à cette nouvelle référence de vitesse.

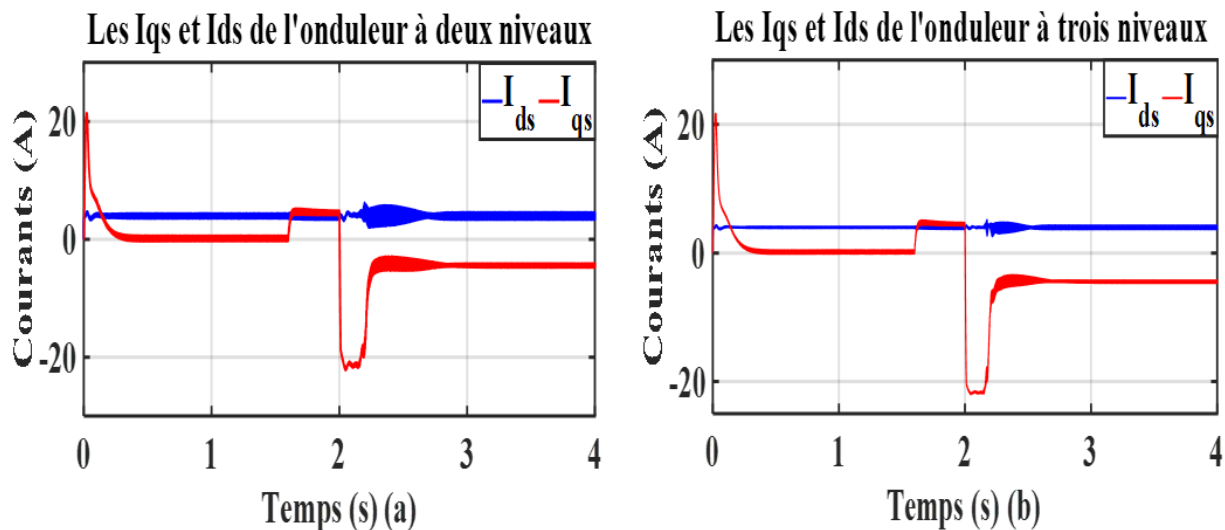


Figure 3-8 Allures des flux de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux

Nous avons observé des variations dans les courants I_{ds} (courant statorique direct) et I_{qs} (courant statorique en quadrature) lors du changement de vitesse à l'instant $t = 2,5$ s. Ces variations peuvent être attribuées aux ajustements effectués par la commande vectorielle indirecte (IFOC) pour maintenir le couple moteur requis à la nouvelle vitesse cible

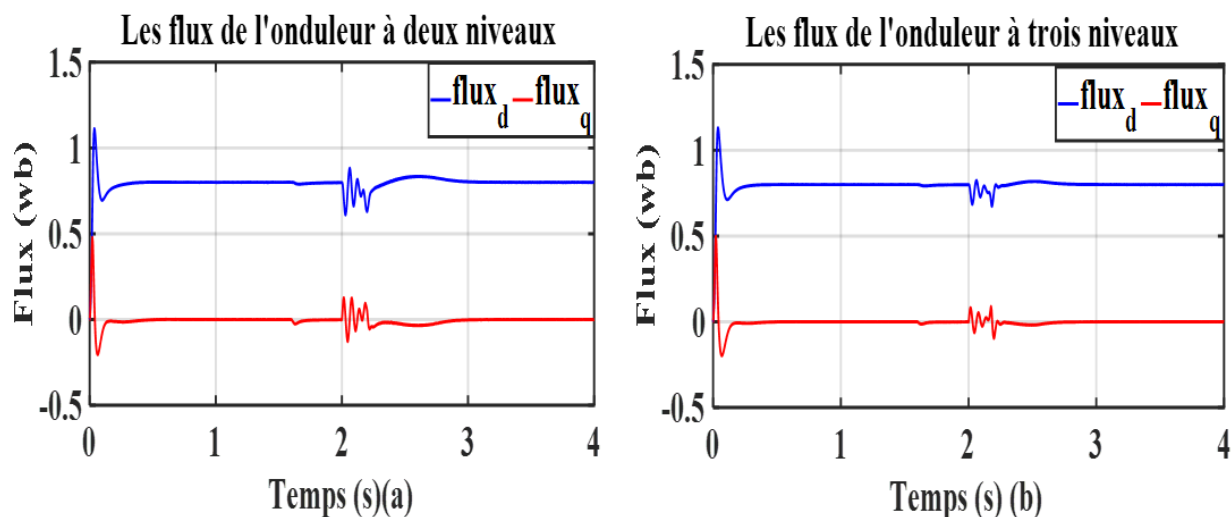


Figure 3-9 Allures des courants direct et quadratique de la MAS, (a) onduleur deux niveaux (b) onduleur trois niveaux

Dans notre simulation, nous avons observé des variations dans les flux magnétiques en fonction des ajustements effectués par la commande vectorielle indirecte (IFOC) lors du changement de vitesse à l'instant $t = 2,5$ s. Ces ajustements visent à maintenir le couple moteur requis à la nouvelle vitesse cible. Les variations dans les flux magnétiques sont principalement causées par les ajustements de la tension d'alimentation et les réglages de la commande effectués par l'IFOC. Ces ajustements sont nécessaires pour compenser les changements de charge et maintenir le couple moteur souhaité malgré les variations de vitesse.

3.3.2 Test de robustesse paramétrique

Dans cette partie, nous avons présenté les résultats de simulation d'une étude comparative entre les onduleurs à deux niveaux et trois niveaux, ainsi que le système de commande utilisant la commande vectorielle. Les tests de robustesse appliqués pour notre système comprenaient sont :

- Résistance rotorique, Initialement, la résistance rotorique (R_r) est maintenue constante à une valeur donnée jusqu'à l'instant $t = 4$. À partir de ce point, la résistance rotorique est augmentée à 1,5 fois sa valeur initiale
- Le couple de charge, Au début de la simulation, le moteur fonctionne sans charge et le couple est nul ($C_r = 0$ Nm) jusqu'à l'instant $t = 1,5$. Après cet instant, un couple de charge constant de 15 Nm est appliqué, créant une résistance supplémentaire à la rotation du moteur.
- La vitesse, Au départ, la vitesse de rotation du moteur est fixée à 1000 tr/min ($\omega_s = 1000$ tr/min). Cependant, à l'instant $t = 2,5$, la vitesse de référence est modifiée, passant à une nouvelle valeur cible de 1500 tr/min ($\omega_s = 1500$ tr/min).

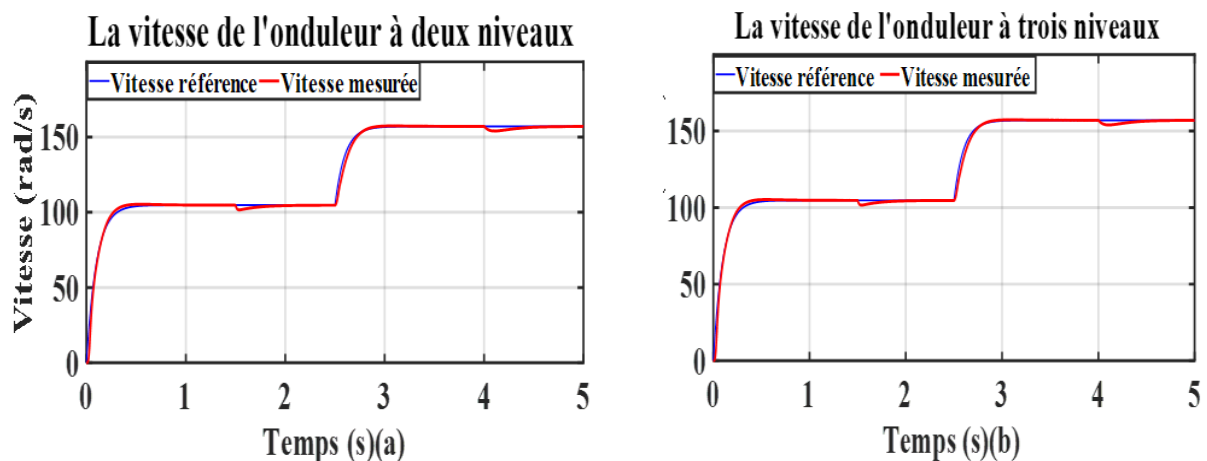


Figure 3-10. Allures des vitesses de la MAS , (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux

Initialement, la vitesse est maintenue constante à 1000 tr/min, reflétant la référence de vitesse initiale. À l'instant $t = 2,5$ s, la vitesse augmente progressivement pour atteindre une nouvelle référence de 1500 tr/min, indiquant que le système réagit et s'adapte à la modification de la consigne de vitesse. Cependant, la figure de la vitesse peut également montrer une brève chute à l'instant $t = 2,5$ s, car le système effectue des ajustements pour atteindre un nouvel équilibre avec la nouvelle référence de vitesse.

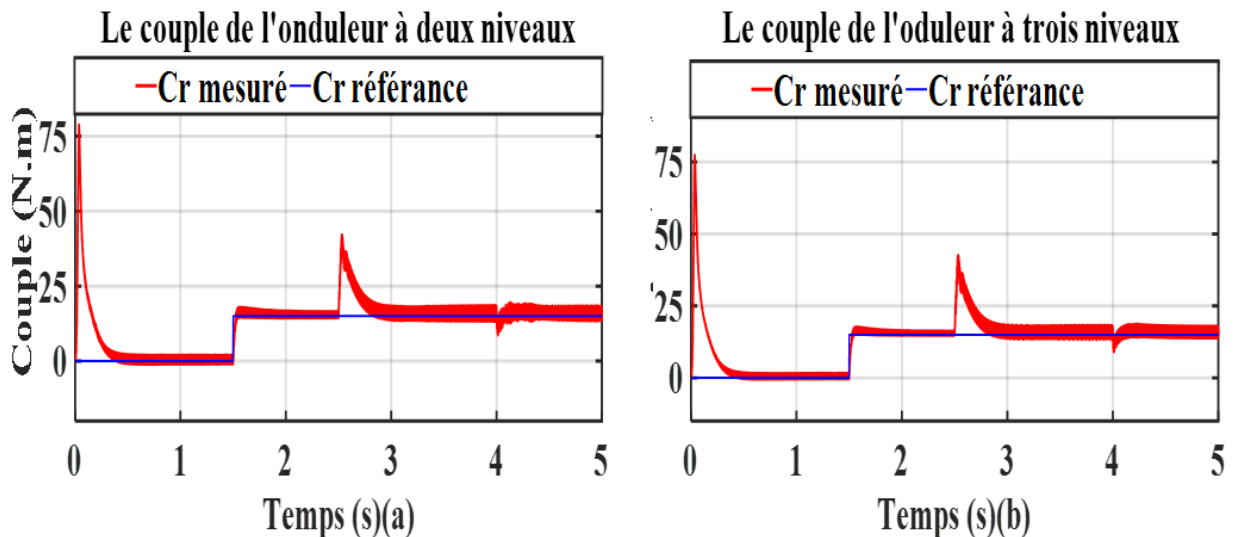


Figure 3-11 Allures du couple de la MAS (a) onduleur deux niveaux (b) onduleur trois niveaux

Lorsque la résistance rotorique est modifiée, cela peut provoquer des variations transitoires dans le système. Ces variations peuvent être causées par des ajustements nécessaires dans les paramètres de la commande IFOC pour s'adapter à la nouvelle résistance. Pendant cette transition, on a observé une chute temporaire du couple.

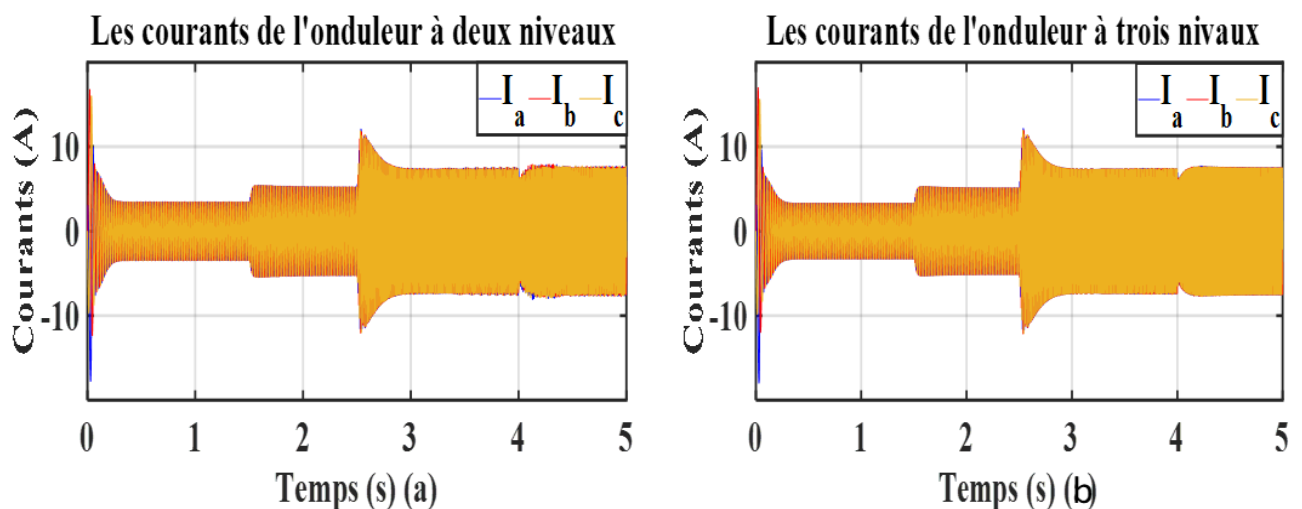


Figure 3-12 Allures des courants des phases de la MAS, (a) : Onduleur deux niveaux, (b) : Onduleur trois niveaux

Lorsque la résistance rotorique est modifiée, cela peut entraîner des variations transitoires dans le système. Ces variations peuvent être causées par des ajustements nécessaires dans les paramètres de la commande FOC pour s'adapter à la nouvelle résistance. Pendant cette transition, on a observé une perturbation temporaire dans le courant.

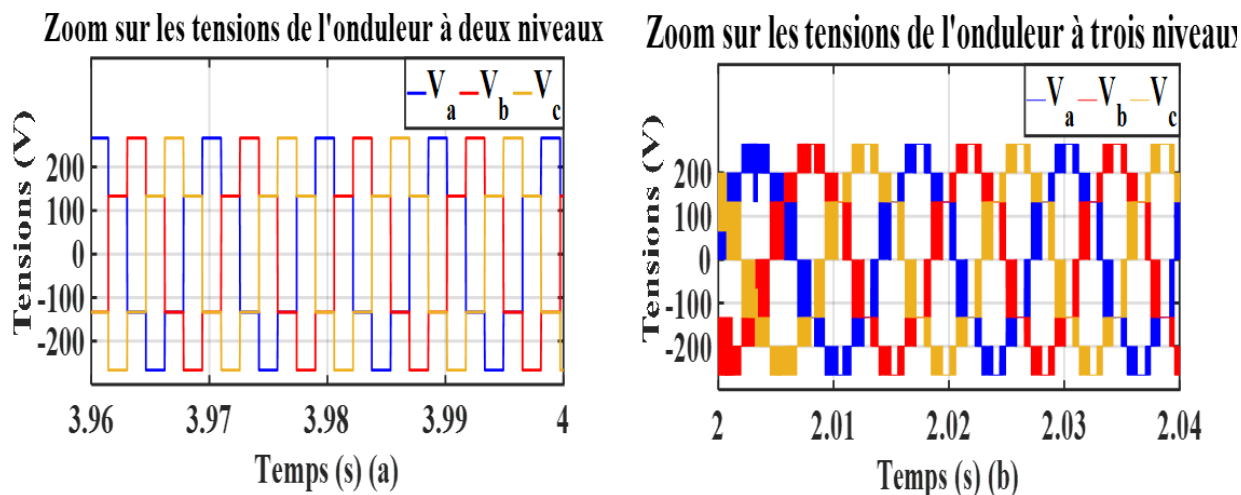


Figure 3-13 Allures des tensions aux bornes de la MAS(a) onduleur deux niveaux (b) onduleur trois niveaux

La figure de la tension de sortie de l'onduleur est d'une importance cruciale pour évaluer les performances du système. Elle illustre les tensions générées et appliquées aux phases du moteur par l'onduleur à deux et trois niveaux. Cette figure permet de vérifier si les niveaux de tension atteignent les valeurs requises pour assurer un fonctionnement optimal du moteur.

3.3.3 Distorsion harmonique totale

En général, la Distorsion harmonique totale (THD) mesure la distorsion harmonique totale présente dans le courant ou la tension. L'onduleur à trois niveaux présente une THD de 5.9%, ce qui est légèrement inférieur au THD de 6.4% de l'onduleur à deux niveaux. Cela suggère que l'onduleur à trois niveaux génère un courant de meilleure qualité avec moins de distorsion harmonique et plus propre et plus proche de la sinusoïde idéale.

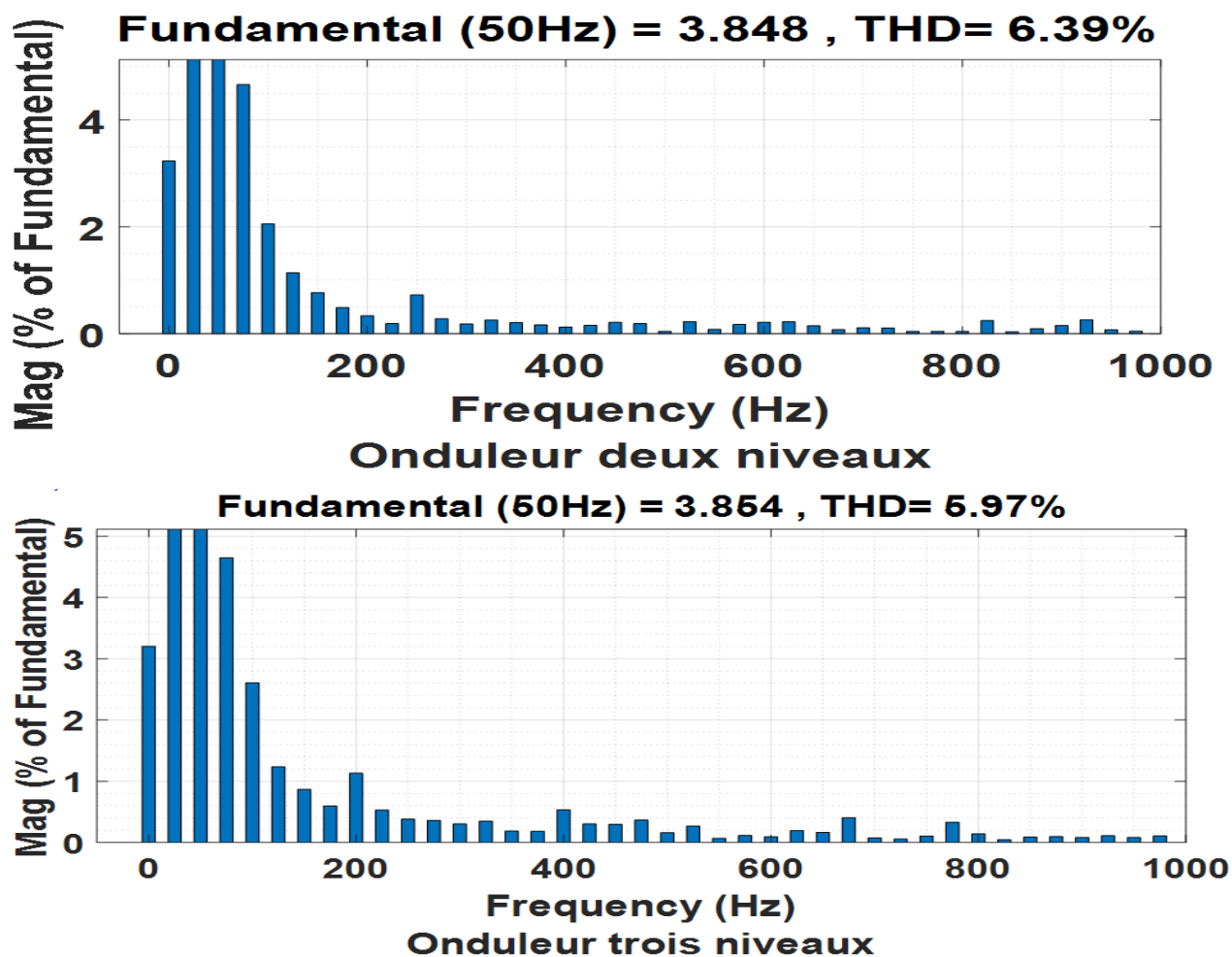


Figure 3-14 Allures des résultats obtenues avec les deux types des onduleurs THD

Les résultats de simulation présentés sur les Figures du 3.4 à 3.14 montrent que l'onduleur trois niveaux représenté les meilleurs résultats comparer avec l'onduleur à deux niveaux.

La comparaison entre les résultats obtenus avec les onduleurs à deux niveaux et à trois niveaux permettra de déterminer que le dernier présente des performances supérieures en termes de contrôle de la vitesse, du couple et du courant statorique. Cette comparaison peut inclure des mesures telles que la stabilité de la vitesse, la précision du couple, la distorsion du courant, l'efficacité énergétique, etc.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a permis la validation de la commande vectorielle indirecte du système, avec la présentation des principaux résultats obtenus. Les résultats de simulation ont concerné principalement les réponses des différents onduleurs (deux niveaux et trois niveaux) vis-à-vis la régulation de la vitesse et les courants direct et quadrature, pour notre cas d'étude en présence du défaut de coupure d'un bras d'onduleur, et a permis de vérifier la fiabilité d'onduleur de tension à trois niveaux jugé le meilleur, ensuite l'onduleur de tension à deux niveaux. Aussi, pour de meilleures performances de contrôle du système d'entraînement global, la reconfiguration de la commande de la machine, suite à un défaut, peut faire l'objet d'un autre travail.

Référence bibliographies

- [1] E. Merabet, '' *Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile*'', Mémoire de Magister de l'Université de Batna, Algérie 2008.
- [2] A. Yahdou, '' *commande et observation par mode glissants de machine asynchrone à double étoile sans capteur mécanique*'' Mémoire de Magister de l'Université de HB Chlef, Algérie 2011.
- [3] E. Merabet et A. Belayali, '' *Commande par logique floue d'une machine asynchrone à double stator*'', Mémoire d'Ingéniorat de l'Université de M'Sila, Algérie 2005.
- [4] H. Ben Abdelghani '' *Etude, Conception et Réalisation d'un convertisseur statique hybride multiniveaux tolérant au défaut* '' thèse de doctorat de l'université de Toulouse, 2016.
- [5] D. Beriber, '' *Machine asynchrone à double stator alimentée par onduleurs à trois niveaux a structure NPC*'', Thèse de magister de l'ENP, Algérie 2004.
- [6] E. Zaidi, K. Marouani, H. Bouadi1, K. Nounou, and M. Becherif, '' *Circulating current reduction-based hybrid controller of an electrical drive system fed by two parallel inverters*'', *Electrical Engineering*, vol. 103, no. 1, pp. 205-216, April 2021.
- [8] E. Zaidi, K. Marouani, H. Bouadi, L. Bentouhami, and E. Merabet, '' *Fuzzy Sliding Mode Method for Speed regulation of a Dual Star Induction Machine Drive fed by Multi-level Inverters*'', In *IEEE 2018 International Conference on Applied Smart Systems (ICASS2018)*, 24-25 November 2018, Médéa, Algiers, Algeria, 2018.

Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons réalisé une étude approfondie et une analyse des performances d'une machine asynchrone alimentée par un onduleur multiniveaux. Notre objectif principal était de comparer les performances d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur à deux niveaux avec un onduleur à trois niveaux, en effectuant des tests de robustesse. À travers nos travaux, nous avons pu tirer les conclusions suivantes :

L'utilisation d'un onduleur à trois niveaux présente des avantages significatifs par rapport à un onduleur à deux niveaux, notamment une meilleure qualité de l'onde de tension, une réduction des harmoniques et une meilleure efficacité énergétique.

Le test de robustesse vis-à-vis la variation du couple de charge a des effets importants sur les performances du moteur asynchrone, en termes de réponse dynamique, de régulation de vitesse et de stabilité du système.

La commande vectorielle de flux orienté rotorique s'est révélée efficace pour réguler les paramètres du moteur asynchrone, tels que la vitesse, le couple et le flux, quelle que soit la configuration de l'onduleur utilisée.

En conclusion, ce mémoire a apporté une étude significative et une analyse des performances d'un moteur asynchrone alimenté par un onduleur multiniveaux. Les résultats obtenus fournissent des informations précieuses pour les ingénieurs et les chercheurs travaillant dans le domaine de la conversion d'énergie et des systèmes de moteurs asynchrones. Les conclusions tirées de cette recherche peuvent être utilisées pour optimiser la conception et le fonctionnement des systèmes de commande des moteurs asynchrones en fonction des exigences spécifiques de chaque application.

Des travaux futurs pourraient inclure la mise en œuvre de l'onduleur et du contrôle sur un banc d'essai expérimental pour une validation plus poussée. De plus, l'étude pourrait être étendue pour comparer d'autres topologies d'onduleurs multi-niveaux ou explorer des techniques de contrôle avancées supplémentaires.

Annexe A : Modélisation de l'onduleur de deux niveaux et la transformation de Park

A.1 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} et V_{ca} sont calculées comme suit :

$$\begin{cases} V_{bc} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{cb} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

En se référant à un point milieu d'un diviseur fictif, les tensions d'entrée de l'onduleur sont notées V_{ao} , V_{bo} et V_{co} . En utilisant les relations de Charles, il est possible d'écrire:

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Comme la charge est équilibrée nous avons

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{A.3})$$

La somme des trois équations du système 1.2 et en tenant compte de la dernière égalité nous obtenons:

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{A.4})$$

En remplaçant V_{no} dans le système d'équation 1.25 et en calculant les tensions simples de sortie de l'onduleur nous aurons

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

A.2 La transformation de Park :

La transformation de Park est une technique permettant d'associer à un système triphasé un système biphasé équivalent tournant dans un référentiel donné. Cette transformation ne modifie en aucune façon les caractéristiques principales de la machine, telles que la force magnétomotrice (ou champ), la puissance, le couple et la vitesse. [Zai21]

$$[P] * [P]^{-1} = I \quad (\text{A.6})$$

Avec : I matrice identité

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

$$[P]^{-1} = [P]^t \quad (\text{A.8})$$

Est une matrice orthogonale .le coefficient $\sqrt{\frac{2}{3}}$ est choisi pour conserver la puissance.

A.3 Application de Park sur les équations électriques et magnétiques :

Le choix du référentiel est celui lié au champ tournant car il offre un modèle complet du moteur qui peut être utilisé pour le commander.

Ce choix permet également de faire correspondre des grandeurs continues aux grandeurs

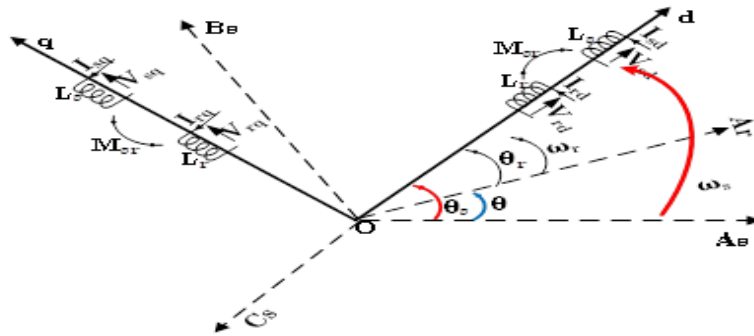


Figure A-14 Transformation de Park des bobinages du moteur sur deux axes tournant avec le champ

sinusoïdales en régime permanent. La conception du contrôle vectoriel par orientation du flux requiert ce choix et les modèles de commande dépendent de la position du repère par rapport aux différents axes de flux.

$$\text{Les équations des tensions : } [V_{dqo}] = [P][V_{abc}] \quad (\text{A.9})$$

$$\text{Les équations des courants : } [i_{dqo}] = [P][i_{abc}] \quad (\text{A.10})$$

$$[i_{abc}] = [P]^{-1}[i_{dqo}] \quad (\text{A.11})$$

$$\text{Les équations des flux: } [\Phi_{dqo}] = [P][\Phi_{abc}] \quad (\text{A.12})$$

$$[\Phi_{abc}] = [P]^{-1}[\Phi_{dqo}] \quad (\text{A.13})$$

En appliquant Park à l'équation suivante :

$$[V_{abc}] = [R_s][i_{abc}]_s + \frac{d}{dt}([\Phi_{abc}]_s) \quad (\text{A.14})$$

Nous aurons

$$[V_{dqo}] = [P][V_{abc}]_s = [P][R_s][i_{abc}]_s + [P] \frac{d}{dt} \left([P]^{-1} [\Phi_{dqo}]_s \right) \quad (\text{A.15})$$

Comme la matrice $[R_s]$ est le produit d'un scalaire avec la matrice identité $[I]$ et si on remplace les courants par ceux des axes d q nous obtenons :

$$[V_{dqo}]_s = [P][R_s][P]^{-1}[i_{dqo}]_s + [P] \frac{d}{dt} ([P]^{-1})[\Phi_{dqo}]_s + [P][P]^{-1} \frac{d}{dt} [\Phi_{dqo}]_s \quad (\text{A.16})$$

$$[V_{dqo}]_s = [R_s][i_{dqo}]_s + \frac{d}{dt} [\Phi_{dqo}]_s + [F][\Phi_{dqo}]_s \quad (\text{A.17})$$

Avec

$$[F] = [P] \frac{d}{dt} ([P]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_s & 0 \\ \omega_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.18})$$

Où ω_s : Vitesse de synchronisme est celle du repère lié au champ tournant.

Si nous appliquons la même transformation aux équations du rotor, nous obtenons les équations suivantes :

$$[V_{dqo}]_r = [R_r][i_{dqo}]_r + \frac{d}{dt} [\Phi_{dqo}]_r + [F'][\Phi_{dqo}]_r \quad (\text{A.19})$$

$$[F'] = [P] \frac{d}{dt} ([P]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{rl} & 0 \\ \omega_{rl} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.20})$$

Où

$$\omega_{rl} = \omega_s - p\Omega \quad (\text{A.21})$$

Est la vitesse de glissement est celle du repère lié au champ tournant, où p est le nombre de paires de pôle et Ω est la vitesse mécanique du moteur $\omega = p\Omega$ est la vitesse électrique.

Référence Biographique Annexe A

[Zai21] E. Zaidi "Etude de la commande d'un entraînement électrique de puissance à base d'une architecture segmentée, Thèse de Doctorat de l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2021.

Annexe B : Synthèse des régulateurs de la commande vectorielle

B.1 Régulation de vitesse

Le principe de cette méthode, consiste à déterminer directement la composante du flux rotorique à partir de la vitesse mécanique de rotation du rotor en utilisant un capteur de vitesse, cela réalisable par un bloc de défluxage défini par la fonction non linéaire suivante [Zai22]

$$\begin{cases} \varphi_r^* = \varphi_n \text{ si } |\Omega| \leq \Omega_n \\ \varphi_r^* = \frac{\varphi_n \Omega_n}{|\Omega|} \text{ si } |\Omega| > \Omega_n \end{cases} \quad (B.1)$$

Schématisé par la Figure B.1 :

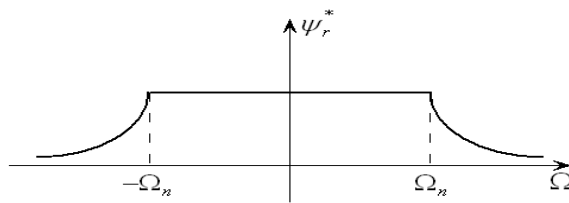


Figure B.1 Schéma de défluxage.

➤ Identification des paramètres de la régulation de vitesse

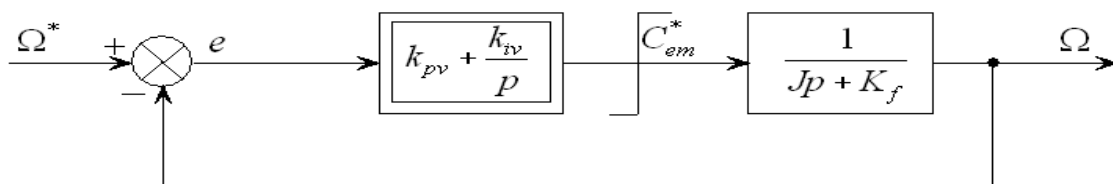


Figure B.2 Boucle de régulation de vitesse.

Identification de coefficients de k_{pv} et k_{iv} donné par : (On prend $T = T_r$)

$$\begin{cases} k_{pv} = \frac{J}{T} \\ k_{iv} = \frac{K_f}{T} \end{cases} \quad (B.2)$$

La commande doit être limitée par un dispositif de saturation défini par:

$$C_{em}^*(Lim) = \begin{cases} C_{em}^* \text{ si } |C_{em}^*| \leq C_{em}^{max} \\ C_{em}^{max} \text{ sign}(C_{em}^*) \text{ si } |C_{em}^*| \geq C_{em}^{max} \end{cases} \quad (B.3)$$

Référence Biographique B

[Zai22] E. Zaidi "Etude de la commande d'un entraînement électrique de puissance à base d'une architecture segmentée, Thèse de Doctorat en Electrotechnique à l'Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2021.

Annexe c : Paramètres du système .

Tableau 1 : Paramètres de la MAS.

<i>Désignation</i>	<i>Valeur</i>
<i>Puissance nominale</i>	5.5 kW
<i>Vitesse nominale</i>	10000 tr/min
<i>Fréquence nominale</i>	50 Hz
<i>Résistance statorique</i>	2,03 Ω
<i>Résistance rotorique</i>	3 Ω
<i>Inductance statorique</i>	0.207 H
<i>Inductance rotorique</i>	0.207 H
<i>Inductance mutuelle stator-rotor</i>	0.2 H
<i>Moment d'inertie</i>	0.06 Kg.m³
<i>Coefficient de frottement visqueux</i>	0.006 N.m.s/rd
<i>Nombre de paires de pôles</i>	3 poles
<i>Flux rotorique</i>	0.8 Wb
<i>Tension du bus continue</i>	400 V

ملخص:

تطورت تكنولوجيا إلكترونيات القدرة ودوائر التحكم و هذا ما سهل من استخدامها في بطاقات إلكترونية في مجالات متنوعة، بما في ذلك التحكم في الآلات الكهربائية غير المتزامنة. هذه البطاقات تعمل عن طريق توفير التغذية الكهربائية للآلات باستخدام عاكس متعددة المستويات، تم تطبيق تقنية التحكم الشعاعي على المحرك اللازامني في هذا البحث، وتم تغذيته بواسطة عاكسين للتوتر، أحدهما ذو مستويين والآخر ذو ثلاث مستويات في حالات التشغيل العادية. تمت دراسة ومحاكاة أداء الآلة باستخدام هذين النوعين من العاكسات. أظهرت نتائج المحاكاة فعالية ونجاعة العاكس ذو ثلاث مستويات بالمقارنة مع العاكس ذو مستويين. يعكس العاكس ذو ثلاث مستويات قدرة أفضل على توفير التحكم الدقيق والكفاءة العالية في تشغيل الآلات اللازامنية. وبالتالي يساهم هذا البحث في فهم أفضل لتأثير التطور التكنولوجي في مجال الإلكترونيات القدرة على أنظمة التحكم في الآلات الكهربائية. ويمكن استخدام النتائج المتحصل عليها لاختيار العاكس المناسب في تطبيقات محددة.

كلمات مفتاحية: التحكم الشعاعي، الآلات الكهربائية، العاكس ذو مستويين، العاكس ذو ثلاث مستويات.

Résumé :

La technologie des composants électroniques de puissance et des circuits de contrôle a évolué pour permettre l'utilisation de cartes électroniques dans divers domaines, y compris le contrôle des machines électriques asynchrones. Ces cartes fonctionnent en fournissant l'alimentation électrique aux machines à l'aide d'un onduleur multi-niveaux. Dans cette recherche, la technique de commande vectorielle a été appliquée à la machine asynchrone, alimenté par deux types d'onduleurs : un à deux niveaux et l'autre à trois niveaux, dans des conditions de fonctionnement normales. Les performances de la machine ont été étudiées et simulées en utilisant ces deux types d'onduleurs. Les résultats de la simulation ont montré l'efficacité et l'efficacité supérieures de l'onduleur à trois niveaux par rapport à l'onduleur à deux niveaux. L'onduleur à trois niveaux offre une meilleure capacité de contrôle précis et une efficacité élevée lors de l'exploitation de la machine asynchrone. Ainsi, cette recherche contribue à une meilleure compréhension de l'impact de l'évolution technologique dans le domaine des composants électroniques de puissance sur les systèmes de contrôle des machines électriques. Les résultats obtenus peuvent être utilisés pour sélectionner l'onduleur approprié dans des applications spécifiques.

Mots-clés : Commande vectorielle, machine électrique, onduleur à deux niveaux, onduleur à trois niveaux.

Abstract:

The technology of power electronics and control circuits has evolved to enable the use of electronic cards in various fields, including the control of asynchronous electrical machines. These cards operate by providing electrical power to the machines using a multi-level inverter.

In this research, the space vector control technique was applied to the asynchronous machine, which was powered by two types of inverters: a two-level inverter and a three-level inverter in normal operating conditions. The performance of the machine was studied and simulated using these two types of inverters. The simulation results showed the effectiveness and efficiency of the three-level inverter compared to the two-level inverter. The three-level inverter demonstrated better capability in providing precise control and high efficiency in operating asynchronous machines. Thus, this research contributes to a better understanding of the impact of technological advancements in the field of power electronics on control systems for electrical machines. The obtained results can be used to select the appropriate inverter for specific applications.

Keywords: Space vector control, electrical machines, two-level inverter, three-level inverter.