

**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES**

**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Commande électrique**

**THÈME**

**Étude et simulation d'un moteur asynchrone alimenté  
par un onduleur de tension multi niveaux**

Réalisé par : **GUELLOULA Manel**

**FAREZ Hanane**

**Devant le Jury :**

**Nom et Prénom**

**Grade**

**Qualité**

*Pr. LRBI Mhamed*

*Pr*

*Président*

*Pr. LARIBI Souad*

*Pr*

*Examinatrice*

*Dr. OGAB Chahrazed*

*MCB*

*Examinatrice*

*Dr. MARIH Salah*

*MCB*

*Encadrant*

*Dr. CHEHDA Rabeh*

*MCB*

*Co-encadrant*

**PROMOTION 2024/2025**

## *DEDICACE*

*Je souhaite dédier humblement ce travail à mes chers parents, qui ont toujours été une source de soutien et d'inspiration pour toutes mes études. Votre amour inconditionnel, votre confiance et vos encouragements ont été la clé de ma réussite dans la réalisation de mes rêves et l'atteinte de mes objectifs.*

*Cette réalisation de mon projet de fin d'étude est largement due à votre apport et à votre soutien indéfectible.*

*À mes amis et collègues, pour les moments de partage et de collaboration qui ont rendu mon parcours académique plus agréable et enrichissant. Merci de faire partie de mon parcours académique et de ma vie.*

*Manel & Hanane*

## REMERCIEMENTS

*Nous souhaitons exprimer notre reconnaissance envers nos encadrants, **Dr.Salah.Marih & Dr.Rabeh Chehda**, pour leur précieux soutien et leur expertise tout au long de la réalisation de notre **Projet de Fin d'étude (PFE)** à l'université Ibn Khaldoun de Tiaret.*

*Les conseils précieux que vous nous avez prodigués, votre disponibilité constante et votre patience ont été des éléments clés dans la réussite de notre travail.*

*Nous sommes extrêmement reconnaissantes de l'opportunité qui nous a été donnée de travailler sous votre encadrement et d'apprendre de votre expertise.*

*Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance envers tous l'ensemble du staff de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret pour leur assistance tout au long de notre parcours académique.*

*Enfin, nous tenons à remercier tous les enseignants de département de génie électrique de l'université Ibn Khaldoun de Tiaret pour leurs conseils et orientations qui ont contribué à l'amélioration de nos performances scientifiques dans la spécialité de Master la Commande électrique .*

## SOMMAIRE

Dédicace .....	1
Remerciements.....	2
Sommaire.....	3
Liste des Tableaux et des Figures.....	6
Notations.....	9
Résumé.....	11
Introduction générale.....	14
Chapitre I: Généralités sur les machines asynchrones.....	16
I.1 Introduction.....	17
I 2 Généralités sur les machines asynchrones.....	17
I 2 1 Définition d'un moteur asynchrone.....	17
I 2 2 Plaque signalétique.....	18
I 2 3 Le bobinage d'un moteur asynchrone.....	18
I 3 Les avantages et les inconvénients d'un MAS .....	19
I 4 Application d'un MAS.....	20
I 5 Constitution d'une machine asynchrone .....	20
I 5 1 Stator.....	20
I 5 2 Rotor.....	21
I 6 Principe de fonctionnement.....	22
Conclusion.....	23
Chapitre II : Modélisation de la machine asynchrone .....	24
II 1 Introduction.....	25
II 2 Model de MAS triphasée .....	25
II 3 Model Mathématique du MAS triphasée.....	26
II 3 1 Au stator.....	26
II 3 1 1 Equation électrique .....	27
II 3 1 2 Equation magnétique.....	27
II 3 2 Au rotor.....	27
II 3 2 1 Equation électrique .....	27
II 3 2 2 Equation magnétique.....	27
II 3 2 3 Equation mécanique.....	28
II 3 Model Park.....	28
II 4 Transformation de Park.....	29
Conclusion.....	30
Chapitre III : Généralités sur les onduleurs .....	31
III 1 Introduction.....	32
III 2 Généralités sur les onduleurs .....	32
III 2 1 Définition de l'onduleur.....	32
III 2 2 Principe de fonction de l'onduleur .....	33
III.2.2. Classifications des onduleurs.....	33
III.2.2.2. Onduleur non autonome .....	33
III.2.2.3. Onduleur hybride ou intelligent.....	33
III.3. Définition de l'Onduleur à Deux Niveaux de Tension .....	34
III.3.1. Avantages .....	34
III.3.2. Inconvénients.....	34
III.4. Les convertisseurs multi-niveaux .....	34
III.4.1. Intérêt des onduleurs multi-niveaux .....	34
III.4.2. Définition de l'Onduleur à Trois Niveaux de Tension.....	35
III.4.2. Avantages .....	36
III.4.2. Inconvénients.....	36
III.4.3. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux .....	36
III.4.3.1. Onduleurs à diode de bouclage (NPC) .....	36
III.4.3.1.1. Principe de fonctionnement .....	37

III.4.3.2. Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants (cellule imbriquées).....	39
III.4.3.3. Onduleur à Cellules Imbriquées .....	39
III.5. Techniques de commande de l'onduleur de tension triphasée.....	40
III.5.1. Commande à 120° .....	41
III.5.2. Commande à 180°.....	41
III.5.3. Commande par modulation de largeur d'impulsion.....	43
III.5.3.1. Les paramètres essentiels de la MLI.....	43
III.5.3.2. Les différentes techniques MLI (PWM).....	45
III.5.3.2.1. La MLI Sinus-Triangle ou MLI sinusoïdal (STPWM),.....	45
III.5.3.2.2. Modulation sinus-triangle.....	46
III.5.3.2.3. La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM).....	46
III.5.3.2.4. Commande en MLI intersective .....	47
III.5.3.2.5. La modulation linéaire multiple (UPWM). .....	48
III.5.3.2.6. La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM).....	49
III.6. Facteur de distorsion harmonique (THD).....	49
III.7. Utilisation des onduleurs. ....	49
III.8. Applications. ....	50
III.8.1. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone .....	50
III.8.2. Alimentation de secours. ....	50
III.9. Association de l'onduleur a la machine asynchrone.....	51
III.10. Les avantages et les inconvénients .....	52
III.10.1. Les avantages des onduleurs.....	52
III.10.2. Les inconvénients des onduleurs. ....	52
Conclusion. ....	53
Chapitre IV: Résultats de Simulation. ....	54
Simulation de MAS alimentée par onduleur 2 et 3 Niveaux. ....	55
IV.1 Discussions des Résultats. ....	55
IV.2 Résultats obtenus de simulation avec un onduleur à 2 niveaux .....	55
IV.2.1. Signaux de références Va,Vb,Vc et la porteur_ond 2 niveaux. ....	56
IV.2.2. La Tension.....	57
IV.2.3. Le Couple Electromagnétique .....	58
IV.2.4. Le Flux. ....	59
IV.2.5. La Vitesse Mécanique. ....	60
IV.2.6. Le courant Is.....	61
IV.2.7. THD Tension pour Onduleur 2 Niveaux. ....	62
IV.2.8. THD Courant pour Onduleur 2 Niveaux. ....	63
IV.2.9. Comparaison Courant vs Tension .....	64
IV.3. Résultats obtenus de simulation avec un onduleur à 3 niveaux .....	65
IV.3.1. Signaux de références Va,Vb,Vc et la porteuse pour onduleur 2 niveaux .....	65
IV.3.2. La Tension.....	67
IV.3.3. Le Couple Electromagnétique .....	68
IV.3.4. Le Flux. ....	69
IV.3.5. La Vitesse Mécanique .....	70
IV.3.6. Le courant Is.....	71
IV.3.7. THD tension pour onduleur 3 niveaux. ....	72
IV.3.8. THD courant pour onduleur 3 niveaux.....	73
IV.3.9. Comparaison des résultats de simulation.....	75
Conclusion. ....	76
Conclusion générale .....	77
Références .....	78

## **Liste des Tableaux**

**Tableau I.1:** Nombre de paires de pôles

**Tableau II.1:** Représentations des séquences qui sont à éviter

**Tableau II.2:** Etats possibles de l'onduleur NPC à trois niveaux

**Tableau III.1:** Représentations des séquences qui sont à éviter

**Tableau III.2:** Etats possibles de l'onduleur NPC à trois niveaux

**Tableau IV.1 :** Comparaison Courant vs Tension

**Tableau IV.2:** Comparaison des résultats de simulation

## **Liste des Figures**

### **Chapitre I Généralités sur les machines asynchrones**

**Figure I.1** Moteur asynchrone

**Figure I.2** Différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné

**Figure I.3** Plaque signalétique d'un moteur asynchrone

**Figure I.4** : Branchements des bobines internes de la machines asynchrone

**Figure I.5** : Les couplages des moteurs asynchrones (étoile et triangle)

**Figure I.6** Le stator de MAS

**Figure I.7** : Un rotor bobiné

**Figure I.8** Différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné

**Figure I.9** Schéma de principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.

### **Chapitre II Modélisation de la machine asynchrone**

**Figure II.3** Modèle de Park de la MAS

**Figure II.4** Modèle de Park de la MAS

### **Chapitre III Généralités sur L'onduleur**

**Figure III.1:** Schéma de principe de la conversion Continue-Alternative (DC– AC)

**Figure III.2** Structure générale de l'onduleur deux niveaux

**Figure III.3.** Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux

**Figure III.4:** Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

**Figure III.5** : Structure d'un onduleur NPC à trois niveaux

**Figure III.6** : Bras d'un onduleur à trois niveaux

**Figure III.7** : Allure de tension par bras d'un NPC trois niveaux

**Figure III.8:** structure d'un onduleur à cellules imbriquées à trois niveaux (Triphasé)

**Figure III.9:** schémas principaux d'un onduleur triphasé à trois niveaux

**Figure III.10** Onduleur de tension triphasée

**Figure III.11:** Commande 120°

**Figure III.12:** Commande 120°

**Figure III.13 :** Commande 180°

**Figure III.14 :** Forme d'onde de tension simple, tension composée et spectre d'harmonique pour une commande 180°

**Figure III.15:** Schéma synoptique de la commande en MLI (triphase).

**Figure III.16** Signal combiné Porteuse/Référence et leur résultats

**Figure III.17** Le signal de la MLI sinus-triangle

**Figure III.18** MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.

**Figure III.19** Principe de la MLI intersective

**Figure III.20** La modulation de largeur d'impulsions multiples.

**Figure III.21** La modulation sinusoïdale modifiée.

**Figure III.22 :** Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

**Figure III.23** Alimentation de secours

**Figure III.24:** Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

**Figure III.25 :** association Onduleur Machine asynchrone triphasées

## Chapitre IV : Résultats de Simulation

**Figure IV.1:** Schéma de simulation avec un onduleur à 2 niveaux

**Figure IV.2 :** signaux de référence  $V_a, V_b, V_c$  d'un onduleur à 2 niveaux.

**Figure IV.3 :** Les tensions  $V_{an}, V_{bn}$  et  $V_{cn}$  à la sortie d'un onduleur à 2 niveaux.

**Figure IV.4 :** Réponse du couple électromagnétique d'un onduleur à 2 niveaux.

**Figure IV.5 :** Le Flux d'un onduleur à 2 niveaux

**Figure IV.6 :** La Vitesse mécanique d'un onduleur à 2 niveaux.

**Figure IV.7 :** Le Courant de la MAS d'un onduleur à 2 niveaux.

**Figure IV.8 :** Le spectre d'harmonique de la tension d'un onduleur à 2 niveaux.

**Figure IV.9 :** Le spectre d'harmonique du Courant d'un onduleur à 2 niveaux.

**Figure IV.10 :** Schéma de simulation avec un onduleur à 3 niveaux

**Figure IV.11 :** signaux de référence  $V_a, V_b, V_c$  d'un onduleur à 3 niveaux.

**Figure IV.12 :** Les tensions  $V_{an}, V_{bn}$  et  $V_{cn}$  à la sortie d'un onduleur à 3niveaux.

**Figure IV.13 :** Réponse du couple électromagnétique d'un onduleur à 3 niveaux.

**Figure IV.14 :** Le Flux d'un onduleur à 3niveaux.

**Figure IV.15 :** La Vitesse mécanique d'un onduleur à 3 niveaux.

**Figure IV.16 :** Le Courant de la MAS d'un onduleur à 3 niveaux.

**Figure IV.17 :** Le spectre d'harmonique de le Tension d'un onduleur à 3 niveaux.

**Figure IV.18 :** Le spectre d'harmonique du Courant d'un onduleur à 3 niveaux.

## Nomenclature

s, r : Indice relatif au stator et rotor respectivement

d: Indice de l'axe direct

q : Indice de l'axe en quadrature

$[V_s]$  : Vecteur tension statorique

$[I_s]$  : Vecteur courant statorique

$[I_r]$  : Vecteur courant rotorique

$[\Phi_s]$  : Vecteur flux statorique

$[\Phi_r]$  : Vecteur flux rotorique

$[R_s]$  : Matrice résistance statorique

$[R_r]$  : Matrice résistance rotorique

$[L_{es}]$  : Matrice inductance statorique

$[L_{rr}]$  : Matrice inductance rotorique

$[M_{er}]$  : Matrice inductance mutuelle stator-rotor

$[P(\theta)]$ : Matrice de Park

P: Nombre de paires de pôles

$\theta_e$ : L'angle électrique entre l'axe as et l'axe d

$\theta_r$ : L'angle électrique entre l'axe ar et l'axe d

$\theta$ : La position angulaire du rotor par rapport au stator

$\omega_e$ : Pulsation électrique statorique

$\omega_r$ : Pulsation de glissement ( $\omega_s - \omega$ )

$\omega$  : Vitesse angulaire de rotation

$\Omega$  : Vitesse de rotation mécanique

$C_e$  : Couple électromagnétique

$C_r$ : Couple résistant

$R_e$  : Résistance statorique

$R_r$  : Résistance rotorique

$L_s$ : Inductance propre d'une phase statorique

$L_r$ : Inductance propre d'une phase rotorique

$M_s$  : Inductance mutuelle entre deux phase statorique

$M_r$  : Inductance mutuelle entre deux phase rotorique

$M_{sr}$  : Inductance mutuelle maximale lorsque l'axe as coïncide avec l'axe ar

$L_s$ : Inductance cyclique statorique

$L_r$ : Inductance cyclique rotorique

$L_m$  : Inductance cyclique mutuelle entre le stator et le rotor

$J$  : Moment d'inertie des masses tournantes

$f$  : Coefficient de frottement visqueux

$X_{ref}$  : Grandeur de référence

$T_s, T_r$  , : Constantes de temps statorique et rotorique

$\sigma$  : Coefficient de dispersion

$V_{dc}$ : Tension continue

$T_e$ : Période d'échantillonnage

NPC: Neural Point clamped

MLI : Modulation par Largeur d'Impulsion

## **Résumé**

Cette thèse est consacrée à l'étude de l'association entre une machine asynchrone et des onduleurs de tension à deux et trois niveaux. L'objectif principal est d'analyser l'impact de ces structures multiniveaux sur les performances de la machine.

Le modèle mathématique de la machine asynchrone est établi sur la base des hypothèses classiques de linéarité et de symétrie, en utilisant la transformation de Park, afin de faciliter l'analyse dynamique dans un cadre de référence rotatif.

Des stratégies de modulation de largeur d'impulsion (MLI) sont mises en œuvre pour obtenir des tensions de sortie aussi proches que possible des signaux de référence sinusoïdaux, tout en réduisant les harmoniques et en améliorant la qualité de la puissance fournie à la machine.

Les simulations réalisées dans MATLAB/Simulink sont utilisées pour évaluer le comportement dynamique du système, comparer les performances des onduleurs à deux et à trois niveaux, et mettre en évidence les avantages offerts par les structures multiniveaux en termes de rendement, de distorsion harmonique et de contrôle.

## **Abstract**

This thesis is dedicated to the study of the association between an asynchronous machine and two-level and three-level voltage inverters. The main objective is to analyze the impact of these multilevel structures on the performance of the machine.

The mathematical model of the asynchronous machine is established based on the classical assumptions of linearity and symmetry, using the Park transformation, in order to facilitate dynamic analysis in a rotating reference frame.

Pulse Width Modulation (PWM) strategies are implemented to obtain output voltages as close as possible to sinusoidal reference signals, while reducing harmonics and improving the quality of power supplied to the machine.

Simulations carried out in MATLAB/Simulink are used to evaluate the dynamic behavior of the system, compare the performance between two-level and three-level inverters, and highlight the advantages offered by multilevel structures in terms of efficiency, harmonic distortion, and control.

## المخلص:

هذه الأطروحة مكرسة لدراسة الارتباط بين آلة غير متزامنة وعاكسات الجهد ثنائية وثلاثية المستويات. الهدف الرئيسي هو تحليل تأثير هذه الهياكل متعددة المستويات على أداء الآلة. يتم إنشاء النموذج الرياضي للآلة غير المتزامنة على أساس الافتراضات الكلاسيكية للخطية والتماثل، باستخدام تحويل بارك، لتسهيل التحليل الديناميكي في إطار مرجعي دوار. يتم تنفيذ إستراتيجيات تعديل عرض النبض (PWM) للحصول على جهد الخرج في أقرب وقت ممكن من الإشارات المرجعية الجيبية، مع تقليل التوافقيات وتحسين جودة الطاقة المزودة للآلة.

تُستخدم عمليات المحاكاة التي يتم إجراؤها في MATLAB/Simulink لتقييم السلوك الديناميكي للنظام، ومقارنة أداء العاكسات ثنائية المستوى وثلاثية المستويات، وتبسيط الضوء على المزايا التي توفرها الهياكل متعددة المستويات من حيث الكفاءة والتشوه التوافقي والتحكم.

# Introduction générale

---

L'évolution rapide de l'industrie moderne exige des systèmes d'entraînement performants, flexibles et efficaces. Dans ce contexte, la machine asynchrone triphasée s'impose comme un élément incontournable grâce à sa robustesse, son faible coût et sa facilité d'entretien. Toutefois, pour répondre aux exigences croissantes en termes de performance dynamique, de rendement énergétique et de compatibilité électromagnétique, l'alimentation directe par le réseau électrique devient insuffisante. D'où l'intérêt d'associer ces machines à des convertisseurs statiques, tels que les onduleurs.[1]

Les convertisseurs de puissance, en particulier les onduleurs de tension, permettent de générer des signaux alternatifs modulés à partir d'une source continue, avec la possibilité de faire varier la fréquence et l'amplitude de la tension de sortie. Ces caractéristiques les rendent indispensables pour la commande en vitesse ou en couple des moteurs à courant alternatif. Parmi ces convertisseurs, les onduleurs à deux et trois niveaux constituent deux topologies couramment utilisées dans les entraînements industriels.[2]

Les techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI) jouent un rôle fondamental dans le fonctionnement des onduleurs. Elles permettent d'approcher une forme de tension sinusoïdale idéale tout en minimisant les pertes, les perturbations harmoniques et les contraintes sur les composants électroniques. Le choix de la topologie de l'onduleur et de la stratégie de modulation influence directement les performances globales du système électromécanique.[3]

Ce travail s'inscrit dans ce cadre technique et scientifique. Il a pour objectif d'étudier et de comparer les performances d'une machine asynchrone lorsqu'elle est alimentée successivement par un onduleur de tension à deux niveaux, puis par un onduleur à trois niveaux. L'étude repose sur une modélisation rigoureuse de la machine à l'aide des transformations de Park, suivie d'une mise en œuvre des différentes commandes sous MATLAB/Simulink. Les résultats obtenus permettent d'analyser le comportement dynamique du système, la qualité de l'onde de tension, les courants statoriques, le couple électromagnétique et le taux de distorsion harmonique (THD).

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres : le premier présente les généralités sur les machines asynchrones, leur constitution et leur principe de fonctionnement ; le deuxième chapitre traite de la modélisation mathématique de ces machines ; le troisième est consacré à l'étude des onduleurs de tension, de leurs topologies et de leurs stratégies de commande ; enfin, le quatrième chapitre présente et interprète les résultats de simulation comparant les deux structures d'onduleurs.

**Chapitre I**  
**Généralités sur les machines asynchrones**

### I.1. Introduction :

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc....

L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc...). [4]

### I.2. Généralités sur les machines asynchrones

Les moteurs asynchrones représentent au moins 80% des moteurs électriques, il est le moteur le plus utilisé dans toutes les applications industrielles ou domestique, du fait de sa facilité d'installation de son bon rendement et de son excellente fiabilité.[5]

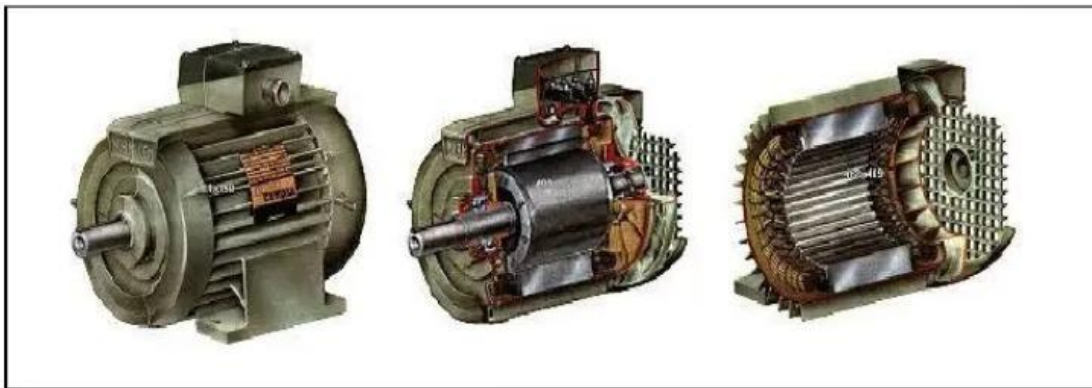


Figure I.1 Moteur asynchrone [47]

#### I.2.1. Définition d'un moteur asynchrone

Les machines asynchrones peuvent être définies de façon très simple : ce sont des machines à stator triphasé, à rotor polyphasé habituellement en court-circuit, et l'entrefer est constant. Ce sont donc des machines à pôles lisses. Les machines asynchrones sont les machines électriques les plus répandues car les plus économiques à fabriquer. Ce sont aussi des machines difficiles à commander. Le rotor tourne à une vitesse différente de celle du synchronisme d'où son nom « asynchrone », les anglo-saxons disent induction machine [6]

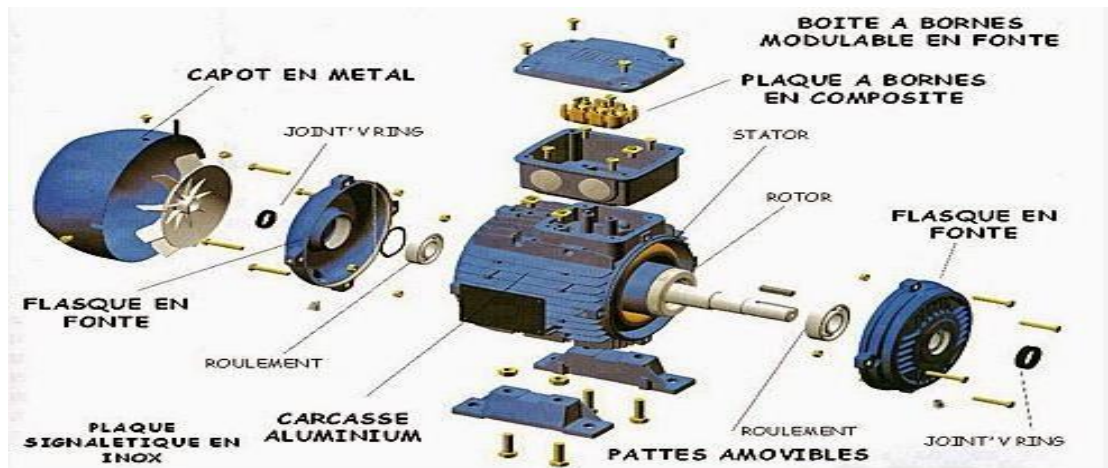


Figure I.2 Différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé à rotor bobiné[47]

### I.2.2. Plaque signalétique

Chaque machine électrique dispose d'une plaque signalétique qui constitue une sorte de carte d'identité du moteur [7]

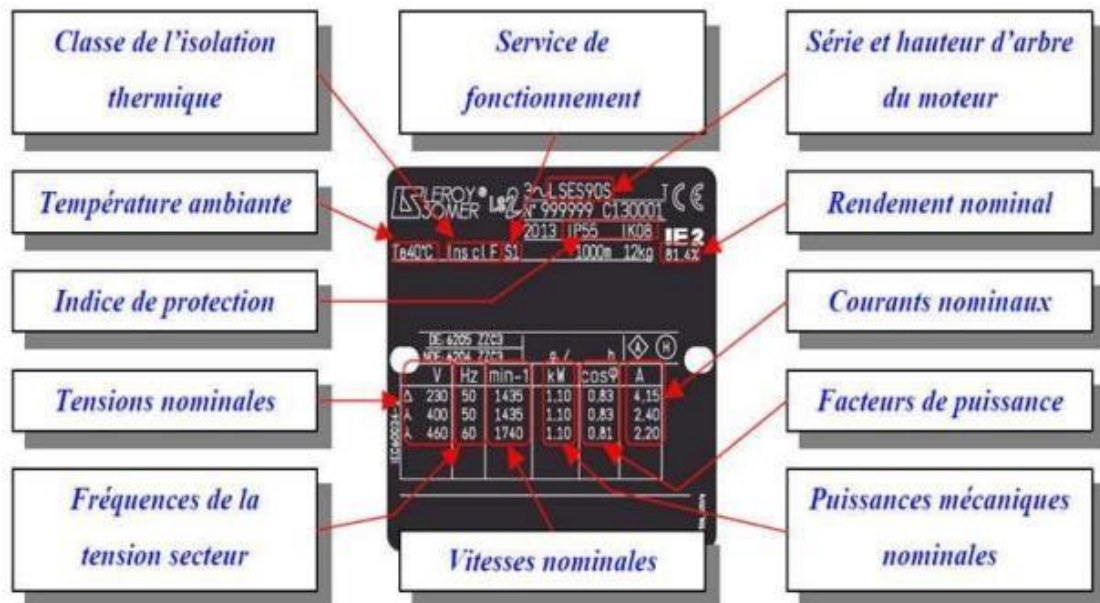
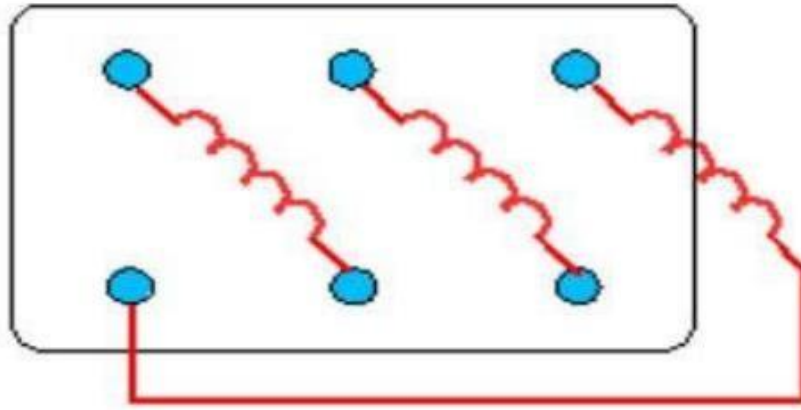


Figure I.3 : Plaque signalétique d'un moteur asynchrone [7]

### I.2.3. Le bobinage d'un moteur asynchrone

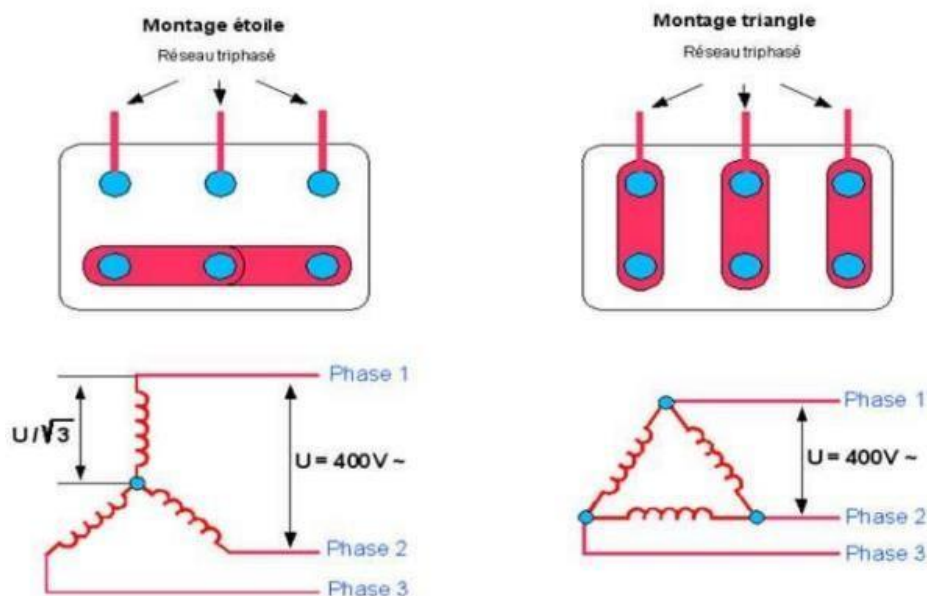
Les bobines sont logées dans les encoches du stator. Le branchement des bobines sur le réseau se fait au niveau de la plaque à borne située au-dessus du moteur. On dispose ainsi de 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Les bornes sont reliées aux bobines selon le schéma suivant [8]



**Figure I.4 :** Branchements des bobines internes de la machines asynchrone [8].

- Plaque à Bornes
- Branchement étoile ou triangle

Il y a deux possibilités de branchement du moteur au réseau électrique triphasé. Le montage en étoile et le montage en triangle comme la figure ci-dessous montre [8].



**Figure I.5 :** Les couplages des moteurs asynchrones (étoile et triangle) [I 8]

### I.3. Avantages et inconvénients d'un moteur asynchrone : [9]

#### I.3.1. Les Avantages :

- Le MAS est facile à réaliser.
- Robuste et Faible coût d'entretien.
- Bonne standardisation entre les fabricants.
- Démarrage en direct sur le réseau (grand couple de démarrage)

- Son rendement est proche de 99%.

### I.3.2. Inconvénients :

- Pour les moteurs de moyenne et grande puissance, le temps de démarrage est long.
- Si le couple résistant dépasse une certaine limite, le moteur décroche et s'arrête.
- Il faut une excitation, c'est-à-dire une deuxième source d'énergie.
- Demande un fort couple lors du démarrage.

### I.4. Applications :[10]

- Traction électrique (Eurostar notamment)
- Propulsion des navires
- Machines outil
- Ascenseur
- Treuils
- Pompes
- Électroménager

### I.5. Constitution d'une machine asynchrone :

#### I.5.1. Le Stator

C'est la partie fixe du moteur et c'est lui qui reçoit le courant alternatif. Il est composé d'une tôle mince (0.5 mm) de qualité supérieure, comportant des encoches où sont logés des enroulements (bobinage). Il y a trois enroulements (bobines) car c'est un moteur triphasé\_[47]



**Figure I.6**\_Le stator de MAS[47]

Vu que la fréquence est fixe, la vitesse de rotation du champ tournant du moteur ne peut varier qu'en fonction du nombre de paires de pôles

Tableau I.1 : Nombre de paires de pôles

Nombre paires de poles	2	4	6	8	10
Vitesse (tr/min)	3000	1500	1000	750	500

I.5.2. Le Rotor

C'est la partie mobile qui se trouve à l'intérieur du stator c'est un cylindre en tôle dans lequel est logé soit une cage d'écurieul en cuivre, soit un bobinage triphasé dont les sorties sont branchées sur trois bagues. La partie extérieure (qui sort du moteur) est l'arbre de transmission, qui peut, par exemple, être relié à un compresseur, à un réducteur. Par le biais d'un accouplement mécanique [11]



Figure I.7 : Un rotor bobiné[47]

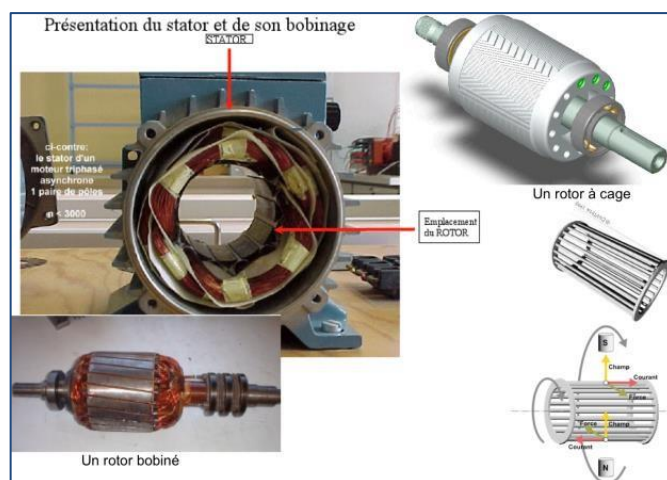


Figure I.8 Différentes pièces d'un moteur asynchrone triphasé [47]

### I.6. PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT :

Le principe de fonctionnement de la machine asynchrone est basé entièrement sur la loi de l'induction ; la machine asynchrone est considérée comme un transformateur à champ magnétique tournant dont le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire en court-circuit. [12]

Ce fonctionnement repose sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant, créé par les courants triphasés fournis à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant.

Lorsque le rotor tourne à une vitesse  $N_c$  différente du synchronisme, l'application de la loi de FARADAY à un des enroulements rotorique montre que celui-ci devient le siège d'une force électromotrice qui étant court-circuité sur les enroulements va donner naissance à un courant dont l'intensité est limitée par l'impédance de ce dernier. L'interaction entre ce courant et le champ glissant va donner naissance à des forces s'exerçant sur les brins du rotor dont le moment par rapport à l'axe de rotation constituera le couple de la machine lorsque le champ est sinusoïdale, la vitesse de rotation est :

$$n_1 = \frac{f}{p} \quad \text{..... (I.1)}$$

Où :  $f$  : la fréquence d'alimentation.

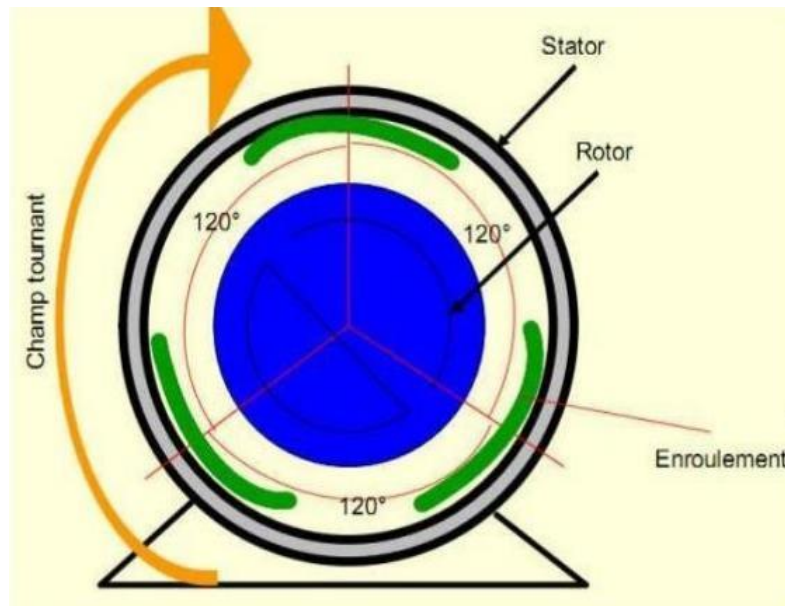
$P$  : représente le nombre de paires de pôles.

L'interaction électromagnétique des deux parties de la machine n'est possible que lorsque la vitesse du champ tournant ( $n_1$ ) diffère de celle du rotor ( $n$ ), c'est-à-dire lorsque  $n \neq n_1$ , car dans le cas contraire, ( $n = n_1$ ), le champ serait immobile par rapport au rotor et aucun courant ne serait induit dans l'enroulement rotorique.

Le rapport

$$g = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad \text{..... (I.2)}$$

Est appelé glissement de la machine asynchrone [13]



**Figure I.9** Schéma de principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone.[47]

### Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons commencé par une description générale du moteur asynchrone ensuite nous avons décrit les différentes parties de la machine asynchrone. On a aussi cité les différents avantages et inconvénients de la machine asynchrone.

**Chapitre II**  
**Modélisation de la machine asynchrone**

### II.1. Introduction :

La modélisation des machines électriques est une phase primordiale pour l'élaboration de leurs lois de commande. En effet, aborder la commande des machines électriques nécessite l'emploi d'une méthode de modélisation adaptée à la commande. Il s'agit d'une application simple des méthodes de la modélisation à la machine asynchrone qui présente des spécificités propres qui ne sont pas nécessairement communes à d'autres processus physiques.

Il est donc évident que cette étape de modélisation soit un passage obligatoire pour étudier le comportement de la machine dans tous les cas de fonctionnement

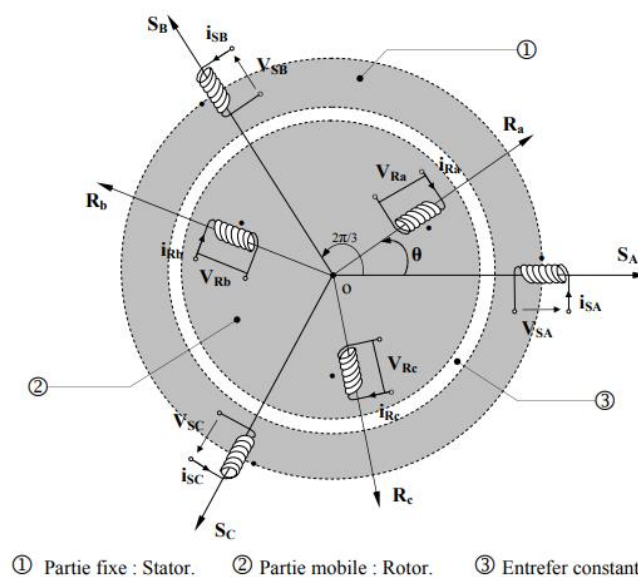
A cet effet, le point de départ que nous avons considéré pour la modélisation de la machine asynchrone est la machine généralisée et les équations d'état qui lui sont associées.

Ces équations seront traduites sous forme de schéma-blocs de manière à être simulées sous MATLAB-SIMULINK.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone (MAS). Dans cette partie on donnera la représentation mathématique de la MAS [14]

### II.2. MODELE DE LA MAS TRIPHASEE

Le modèle de la machine à induction triphasé est illustré par le schéma de la «Fig. II-1» Avec les armatures statoriques et rotoriques sont munies chacune d'un enroulement triphasé, sont trois enroulements du stator :  $S_a S_b$  et  $S_c$ , et pour les trois enroulements rotoriques :  $R_a R_b$  et  $R_c$  et  $\theta$  : Angle entre l'axe de la phase statorique et la phase rotorique.[15]

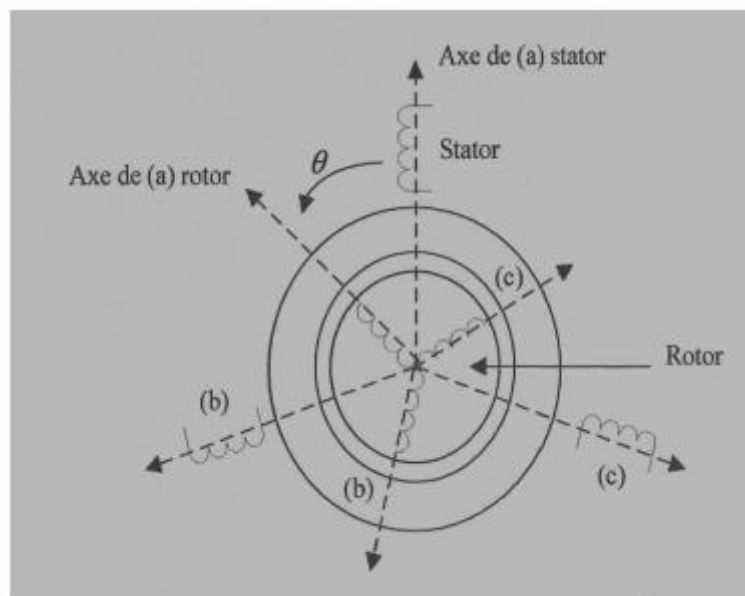


**Figure. II.1** Modèle d'une machine asynchrone triphasée.

### II.3. Modèle mathématique du moteur asynchrone triphasé

Le modèle mathématique permet principalement d'observer les différentes évolutions des grandeurs électromécaniques d'une part, et d'autre part de prévoir le contrôle nécessaire pour pallier aux différents problèmes qui accompagnent les opérations de variation de charge, de vitesse...etc.

La machine est alimentée en tension, les composantes du vecteur de commande de l'équation d'état seront donc des tensions. Les différentes grandeurs seront, dans un premier temps exprimé dans leurs repères respectifs.[16]



**Figure II.2:** Modèle des enroulements statoriques et rotoriques d'une MAS

Le comportement de la machine est décrit par trois équations

- Electriques ;
- Magnétiques ;
- Mécaniques

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme indiqué sur la figure (II 2). Les phases rotoriques sont courtes circuitées sur elles-mêmes.  $\theta$  est l'angle électrique entre l'axe de la phase a statorique et la phase a rotorique. La **loi de Faraday** permet d'écrire

$$V = Ri + \frac{d\varphi}{dt} \dots \dots \dots (II.1)$$

#### II.3.1. Au stator

L'écriture matricielle condensée pour les trois phases statoriques est résumé par ces écritures :

**II.3.1.1. Equation électrique**

$$[U_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{sabc}] \dots \dots \dots (II.2)$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.3)$$

La résistance statorique étant la même pour les trois phases  $R_{as} = R_{sb} = R_{sc} = R_s$

**II.3.1.2. Equation magnétique**

$$[\varphi_{sabc}] = [I_s][i_{sabc}] + [M_{sr}][i_{rabc}] \dots \dots \dots (II.4)$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + M \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{4\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.5)$$

avec

$I_s(I_r)$  Inductance propre d'une phase statorique (rotorique)

$M_s(M_r)$ : Inductance mutuelle en deux phases du stator (rotor)

M: Inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

**II.3.2. Au Rotor.**

**II.3.2.1. Equation électrique**

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{rabc}] \dots \dots \dots (II.6)$$

Le rotor étant en court-circuit, ses tensions sont nulles.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} \dots \dots \dots (II.7)$$

De même

$$R_{ra} = R_{rb} = R_{rc} = R_r$$

**II.3.2.2. Equation magnétique**

$$[\varphi_{rabc}] = [I_r][i_{rabc}] + [M_{rs}][i_{sabc}] \dots \dots \dots (II.8)$$

Cette notation est l'écriture condensée de :

$$\begin{bmatrix} \varphi_{ra} \\ \varphi_{rb} \\ \varphi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + M \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{4\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

Sachant que :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = M \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{4\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{4\Pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(II.10)$$

La résolution analytique du système d'équations (II. 3) et (II. 7) se heurte à des difficultés du fait que les termes trigonométriques de la matrice varient en fonction du temps. Cela conduira à l'usage de la transformation de Park qui permettra de rendre constant ces paramètres

**II.3.2.3. Equation mécanique**

L'équation mécanique est donnée par

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - C_f \Omega \dots\dots\dots(II.11)$$

$C_e$ : Couple moteur de la machine (électromagnétique) ;

$C_r$  Le couple résistant ;

$C_f$  Le coefficient de frottement

$\Omega$ : Vitesse mécanique de rotation du rotor.

La résolution analytique du système d'équations (II-4) et (II-8) se heurte à des difficultés du fait que les termes trigonométriques de la matrice des inductances varient en fonction de la position. Ce qui impose l'utilisation de la transformation de Park afin de rendre ces termes indépendants de la position

**II.3. Modèle de Park de la Machine Asynchrone**

Afin d'obtenir des coefficients constants dans les équations différentielles, la transformation de Park est utilisée. Cette transformation est ancienne (1929) et si elle redevient à l'ordre du jour, c'est tout simplement parce que les progrès de la technologie des composants permettent maintenant de la réaliser en temps réel. Physiquement, on peut la comprendre comme une

transformation des trois enroulements de la MAS à seulement deux enroulements, comme la montre la figure (II 3) [17]

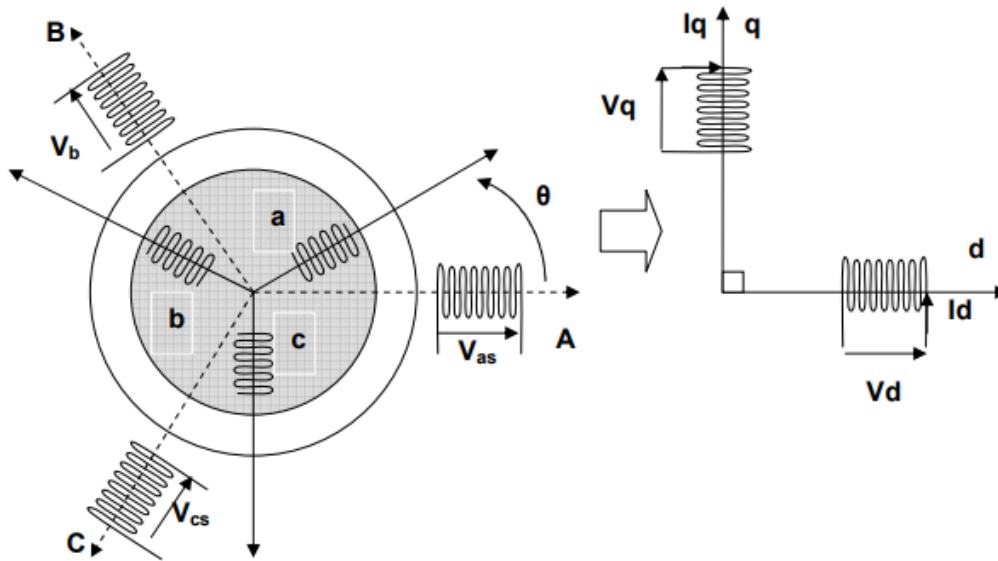


Figure II.3 Modèle de Park de la MAS

**II.4. Transformation de Park**

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée - diphasée suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère mobile dq. Pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques), on applique la transformation de Park. Pour simplifier les équations, et par conséquent le modèle, les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider. En effet, si l'on note par  $\theta_s$  (resp. par  $\theta_r$ ) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (resp. rotoriques) (figure II 4), ceci se fait en liant les angles  $\theta_s$  et  $\theta_r$  par la relation [18]

$$\theta + \theta_r = \theta_s \dots\dots\dots (II.12)$$

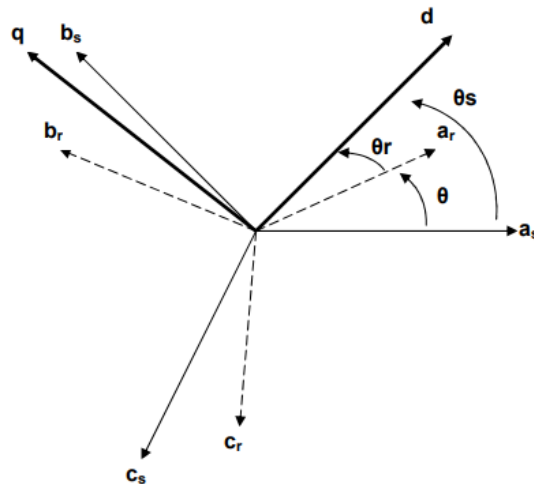


Figure II.4 Modèle de Park de la MAS

Les amplitudes directe (d) et en quadrature (q) des grandeurs statoriques et rotoriques sont fictives ; les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suit

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.13)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = c \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\Pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\Pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta_s)] \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (II.14)$$

Où 'c' est une constante qui peut prendre soit les valeurs  $\frac{2}{3}$  ou 1 pour la non conservation de puissance, soit la valeur  $\sqrt{2/3}$  pour une conservation de puissance. Dans notre cas, nous

prendrons  $c = \sqrt{\frac{2}{3}}$

Ces équations précédentes peuvent être appliquées aussi pour n'importe quelles autres grandeurs telles que les courants et les flux

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné le modèle mathématique de la machine asynchrone dans les différents repères. Les modèles sont obtenus par des transformations de passage d'un système triphasé à un système biphasé puis on applique la transformation soit de Park où celle de Concordia selon le repère désiré.

**Chapitre III**  
**Généralités sur les onduleurs**

### III.1. Introduction

Avec le développement industriel, il est devenu une nécessité d'utiliser des machines électriques de puissance de plus en plus forte afin de développer des couples exigés par les différentes applications. Pour obtenir le fonctionnement optimal de ces machines, on doit les alimenter par une source de tension aussi proche que possible d'une forme sinusoïdale. Cette dernière est obtenue par l'amélioration des performances du convertisseur statique, à travers lequel se fait l'alimentation. En profitant de la technologie des semi-conducteurs qui ne cesse de se développer, aussi en agissant sur la structure du convertisseur statique ou sur la méthode de sa commande, généralement on utilise la commande par modulation de largeur d'impulsions

### III.2. Généralité sur les onduleurs

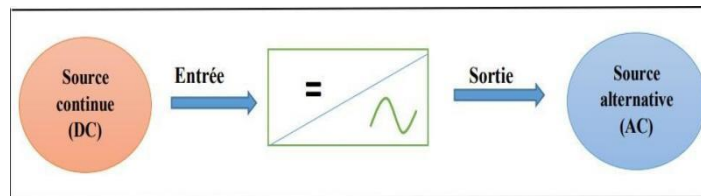
L'énergie électrique est généralement distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins.

Grace aux progrès technologiques réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, les convertisseurs statiques voient progressivement leur champ d'application s'élargir. L'onduleur est utilisé pour produire des grandeurs de sorties (courants et tension) alternatives à partir d'une source continue, il peut être à fréquence fixe ou à fréquence variable [19]

Ce chapitre sera consisté à une brève description sur les onduleurs à (constitution physique, élémentaire, fonctionnement ...), ainsi leurs domaines d'applications et leurs paramètres de performances.

#### III.2.1. Définition des onduleurs

L'onduleur est un convertisseur statique et un dispositif d'électronique de puissance utilisé dans certains systèmes électriques pour convertir l'énergie et protéger l'alimentation en cas de coupure. Il assure la conversion de l'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC) grâce à des composants d'électronique de puissance, notamment des semi-conducteurs commandés par un système de commande qui permet de réguler l'état de l'interrupteur (ouvert ou fermé) à l'aide de techniques spéciales et de la complémentarité entre deux interrupteurs dans un bras pour fournir une tension de sortie alternative acceptable avec une fréquence ou une amplitude variable.[20] [21]



**Figure III.1:** Schéma de principe de la conversion Continu-Alternative (DC– AC)

### III.2.2. Classifications des onduleurs

Les onduleurs sont classés en trois grandes catégories : autonome, non autonome et hybride/intelligent. Ce classement est effectué en fonction d'un jeu de commutations commandées de manière appropriée.

#### III.2.2.1. Onduleur autonome

Les onduleurs autonomes : ils utilisent leur propre circuit auxiliaire pour la commutation des thyristors ou d'autres semi-conducteurs pour commander la fréquence et la forme d'onde de la tension de sortie. Il y a deux types d'onduleurs autonomes : les onduleurs de tension alimentés par une source de tension continue et les onduleurs de courant alimentés par une source de courant continu [22] [23].

#### III.2.2.2. Onduleur non autonome

Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors (pont de Graetz) qui, en commutation naturelle assistée par le réseau, auquel il est raccordé, permet un fonctionnement en onduleur (par exemple par récupération de l'énergie lors des périodes de freinage dans les motrices électriques). À la base du développement des entraînements statiques à vitesse variable pour moteurs à courant continu et alternatif, cyclo-convertisseurs, onduleurs de courant pour machines synchrones et asynchrones, jusqu'à des puissances de plusieurs MW, ce type de montage est progressivement supplanté, au profit de convertisseurs à IGBT ou GTO.

#### III.2.2.3. Onduleurs hybrides ou intelligents

Les onduleurs hybrides ou intelligents représentent une nouvelle génération d'onduleurs dédiée aux applications d'énergie renouvelable pour l'autoconsommation, notamment pour les panneaux solaires photovoltaïques (onduleur solaire). L'énergie produite par ces panneaux est active uniquement pendant la journée et principalement lorsque le Soleil au zénith, ce qui entraîne une fluctuation et une désynchronisation de l'énergie produite par rapport à la consommation des habitations. Pour remédier à cela, il est nécessaire de stocker l'excédent de production avant utilisation. En Europe, il est possible de vendre l'intégralité de sa production à l'entreprise de production d'électricité à un tarif préférentiel, ce qui évite les contraintes liées au stockage de l'excédent de production.

### III.3. Définition de l'Onduleur à Deux Niveaux de Tension

Un **onduleur à deux niveaux de tension** est un convertisseur électronique de puissance statique qui transforme une tension continue (**DC**) en une tension alternative (**AC**) en générant **deux niveaux de tension distinctes** sortie :

- $+V_{dc} / 2$  (niveau haut)
- $-V_{dc} / 2$  (niveau bas)

Il est largement utilisé dans les systèmes photovoltaïques, les entraînements électriques et les applications industrielles

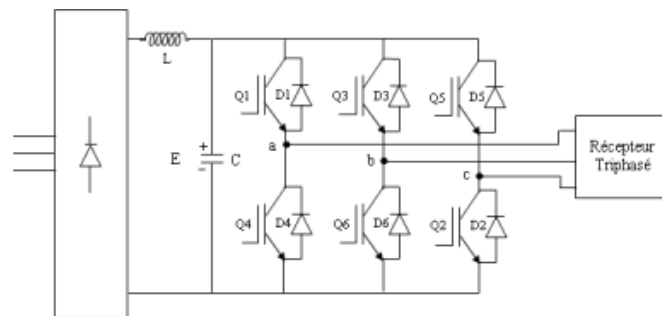


Figure III.2 Structure générale de l'onduleur deux niveaux

#### III.3.1. Avantages

- Simple et économique
- Efficace pour les faibles puissances

#### III.3.2. Inconvénients

- THD élevé Filtrage nécessaire
- Contraintes élevées sur les interrupteurs

### III.4. Les convertisseurs multi-niveaux

#### III.4.1. Intérêt des onduleurs multi-niveaux

Les onduleurs multi-niveaux présentent des avantages importants par rapport aux onduleurs classiques à deux niveaux.

Le premier avantage est la réduction des contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance. En effet, chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction de la tension continue moins élevée que dans les onduleurs à deux niveaux, ce qui permet une meilleure fiabilité et une durée de vie plus longue des composants.

Le deuxième avantage est lié à la qualité spectrale de la tension de sortie. En multipliant le nombre de niveaux intermédiaires, l'amplitude de chaque front montant ou descendant de

la tension de sortie est réduite, ce qui permet de réduire l'amplitude des raies harmoniques. Par conséquent, la distorsion harmonique totale (THD) de la tension de sortie est réduite, ce qui peut être particulièrement important dans certaines applications sensibles aux perturbations électromagnétiques.

Enfin, en utilisant une commande judicieuse des composants de puissance, les onduleurs multi-niveaux peuvent supprimer certaines familles de raies harmoniques. Cette suppression peut être particulièrement utile dans les applications où les exigences en termes de qualité de la tension de sorties ont très strictes, comme par exemple pour les systèmes d'alimentation des équipements électroniques sensibles.

#### III.4.2. Définition de l'Onduleur à Trois Niveaux de Tension

Un **onduleur à trois niveaux de tension** (ou three-level voltage source inverter) est un convertisseur électronique de puissance plus avancé qu'un onduleur classique à deux niveaux. Il génère une tension alternative (AC) à partir d'une source continue (DC) en produisant **trois niveaux de tension distincts** en sortie :

- $+V_{dc} / 2$  (niveau haut)
- $0$  (niveau neutre / moyen)
- $-V_{dc} / 2$  (niveau bas)

L'onduleur NPC à trois niveaux est représenté sur la figure (III 3.). Le bus continu d'entrée est composé de deux capacités en série (C1 et C2), formant un point milieu noté (O) qui permet à l'onduleur d'accéder à un niveau de tension supplémentaire par rapport à l'onduleur classique à deux niveaux. La tension totale du bus continu vaut E, dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension  $E/2$  à leurs bornes. Chacun des trois bras (a, b et c) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (K1, K2, K3 et K4 pour le bras a) et deux diodes de maintien connectées au point milieu du bus continu [24], [25], [26].

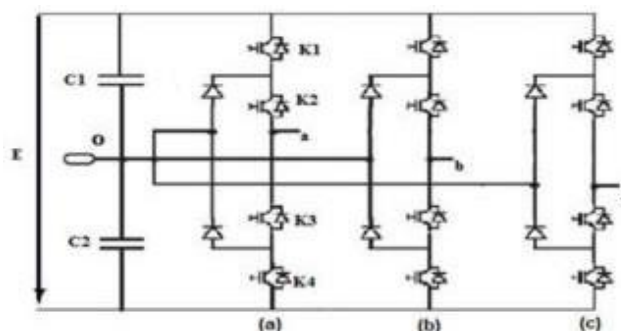


Figure. III 3. Schéma d'un onduleur NPC à 3 niveaux

### III.4.2. Avantages

- THD plus faible
- Moins de stress sur les composants

### III.4.2. Inconvénients

- Coût plus élevé
- Gestion complexe du point milieu (NPC)

### III.4.3. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

Les trois topologies principales des onduleurs multiniveaux les plus récentes sont:

- Onduleurs à diode de bouclage (NPC)
- Onduleurs à condensateur flottant (cellule imbriquées)
- Onduleur en cascade (H-Bridge)

La figure III.4 représente les trois topologies principales des onduleurs multiniveaux les plus récentes :

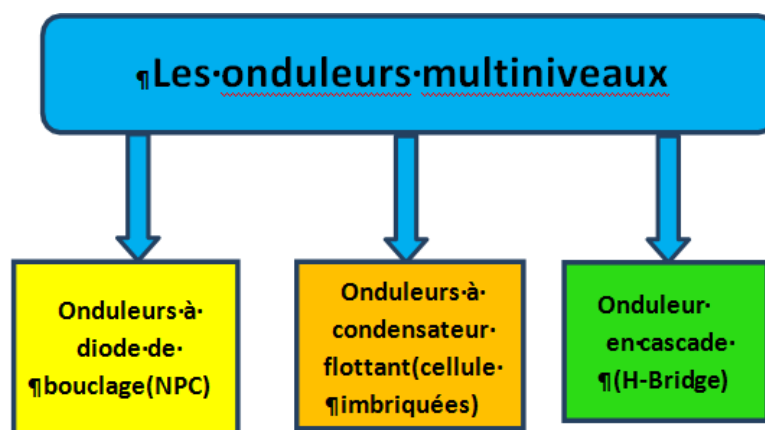


Figure III. 4: Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

#### III.4.3.1. Onduleurs à diode de bouclage (NPC)

##### Onduleur NPC trois niveaux

En 1981, A. Nabae et H. Akagi ont proposé cette structure d'onduleur dans le but de réduire l'amplitude des harmoniques injectées par l'onduleur. L'idée fondamentale de ce montage consiste en la superposition de deux groupes d'interrupteurs et d'un diviseur de tension capacitif (voir figure III 5). Les interrupteurs k11 et k12 sont complémentaires, ce qui signifie que lorsque le premier est en état de conduction, le second est en état de blocage, et vice versa.

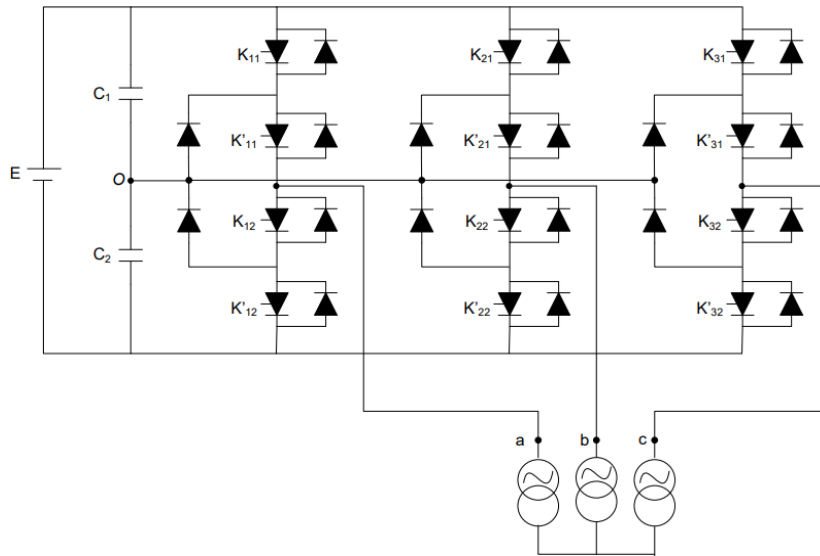


Figure III. 5 : Structure d'un onduleur NPC à trois niveaux [27]

III.4.3.1.1. Principe de fonctionnement

Pour analyser le fonctionnement de ce type d'onduleur, il est suffisant d'étudier le fonctionnement d'un seul bras. Ensuite, on détermine la tension de sortie qui peut être définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs.

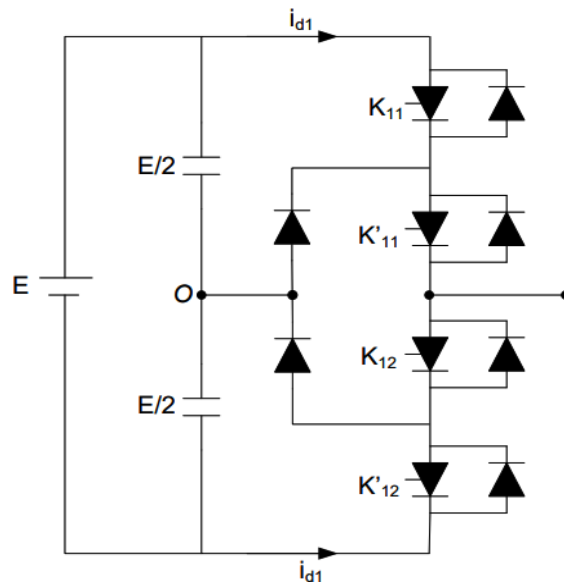


Figure II.6 : Bras d'un onduleur à trois niveaux [27]

Parmi les 16 séquences ( $2^4$ ) possibles, seules trois séquences sont mises en œuvre, tandis que toutes les autres doivent être évitées. Le tableau III.1 résume ces différentes séquences

Tableau (III. 1) : Représentations des séquences qui sont à éviter

$K_{11}$	$K'_{11}$	$K_{12}$	$K'_{12}$	Etat du circuit
1	1	1	1	Court-circuit E1 et E2
1	0	0	1	
1	1	0	1	
1	0	1	1	
1	1	1	0	Court-circuit E1
1	0	0	0	
1	0	1	0	
0	1	1	1	Court-circuit E2
0	0	0	1	
0	1	0	1	

Les trois états de commutation possibles sont résumés dans le Tableau III.2,

L'état 1 représente l'interrupteur fermé et l'état 0 représente l'interrupteur ouvert.

Tableau III.2: Etats possibles de l'onduleur NPC à trois niveaux

$K_{11}$	$K'_{11}$	$K_{12}$	$K'_{12}$	$V_{ao}$
1	1	0	0	$+E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

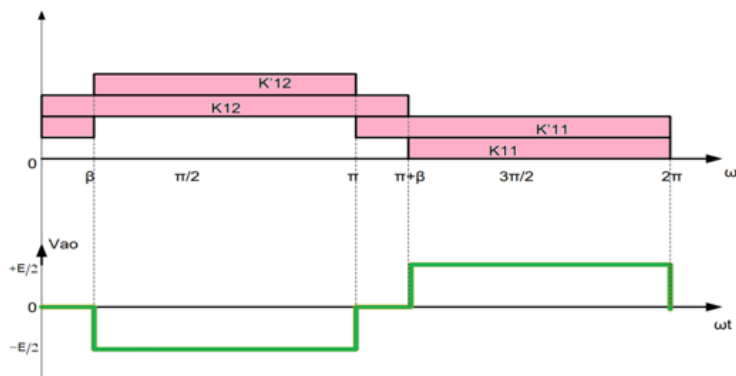


Figure III.7 : Allure de tension par bras d'un NPC trois niveaux

### III.4.3.2. Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants (cellule imbriquées)

La topologie multiniveau proposée par T.Meynard et H.Foch 1992 présente une structure similaire à celle de l'onduleur à diode de roue libre, à la différence que des condensateurs sont utilisés à la place des diodes . Ainsi , cette topologie est appelée "Onduleur à Condensateurs Flottants". Cette solution a été proposée pour résoudre deux problèmes: d'une part, le déséquilibre des tensions ,et d'autre part ,le grand nombre de diodes nécessaires dans les topologies traditionnelles.

#### Onduleur à Cellules Imbriquées à Trois Niveaux

Le schéma de base d'un onduleur à trois niveaux à cellules imbriquées est illustré par la figure (III.8). Chaque cellule est composée de quatre interrupteurs commandables complémentaires, d'un diviseur capacitif et d'un condensateur de bouclage. [28]

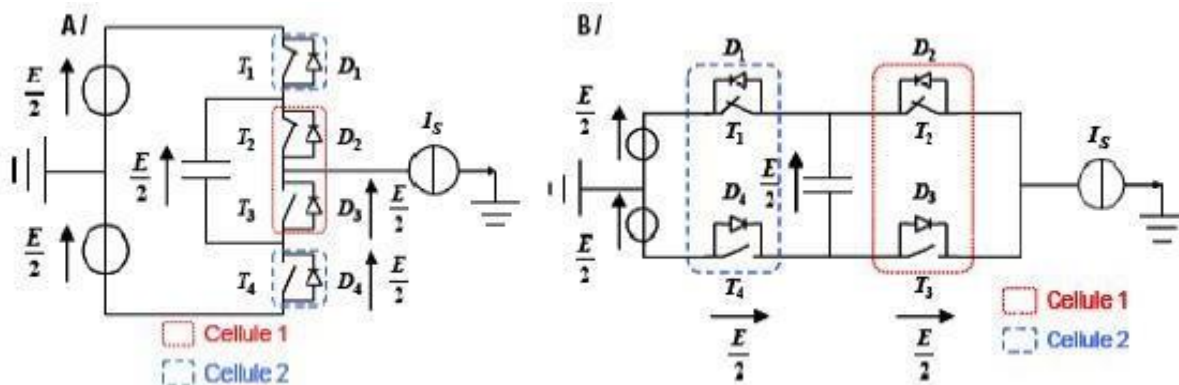


Figure III.8: structure d'un onduleur à cellules imbriquées [27]

### III.4.3.3. Onduleurs multiniveaux en cascade

#### Onduleur à trois niveaux type cascades

La topologie connue sous le nom "des Onduleurs Multiniveaux Cascades" (Cascade Multilevel Inverter) a été proposée par Marchesoni et al. En 1988. Le principe de base consiste à connecter en série des ponts en H (ou ponts complets) , comme illustré dans la figure (III 9). [29]

La principale difficulté de cette topologie réside dans l'alimentation des ponts en H . Il est nécessaire d'avoir autant d'alimentations isolées les unes des autres qu'il y a de cellules. Cependant, dans certaines applications où il n'est pas nécessaire de fournir de la puissance active, il est possible de passer les alimentations et de contenir des éléments de stockage tels que des condensateurs. C'est notamment le cas pour la compensation statique du réactif ou des harmoniques. Cette structure présente de nombreux avantages pour ce type d'applications [19].

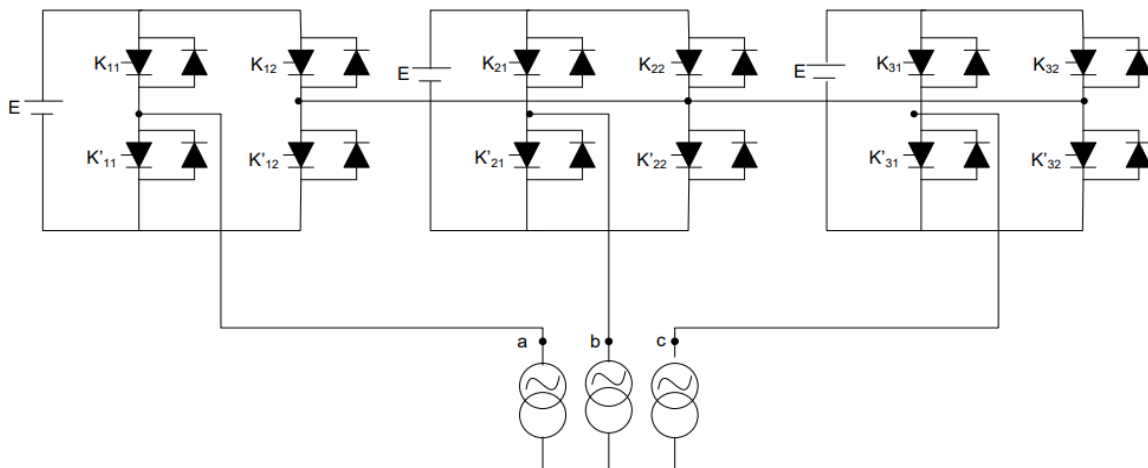


Figure III.9: schémas principaux d'un onduleur triphasé à trois niveaux [27]

### III.5. Techniques de commande de l'onduleur de tension triphasé

#### Onduleur de tension triphasé

On peut réaliser un onduleur triphasé en groupant trois onduleurs monophasés. Il suffit de décaler d'un tiers de période les commandes des trois phases

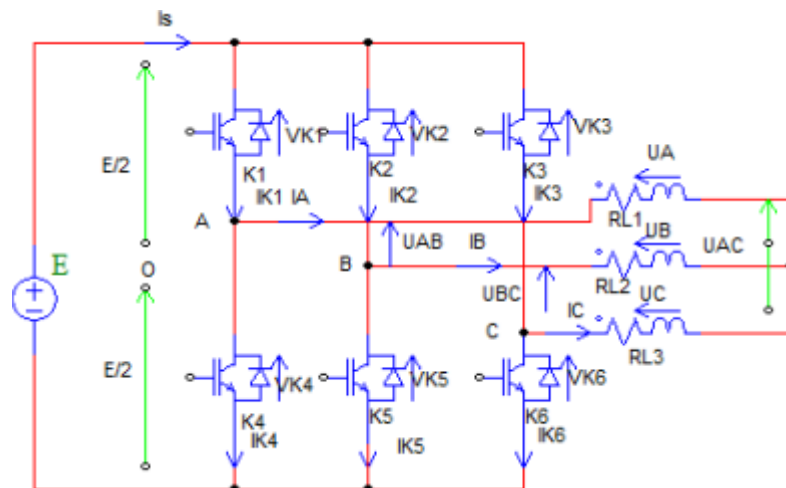


Figure III.10 Onduleur de tension triphasé

Pour cette structure, plusieurs **types de commande** sont possibles, les plus utilisées sont :

- La commande  $120^\circ$
- La commande  $180^\circ$
- Les commandes à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

### III.5.1. Commande à 120°

Les interrupteurs sont commandés pendant une durée correspondant à un tiers de période, mais avec des séquences décalées de 120° d'un bras par rapport aux autres d'où :

- à tous instants deux interrupteurs sont en état de conduire et les quatre autres sont bloqués ;
- deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandés de façon complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source de tension. [30]

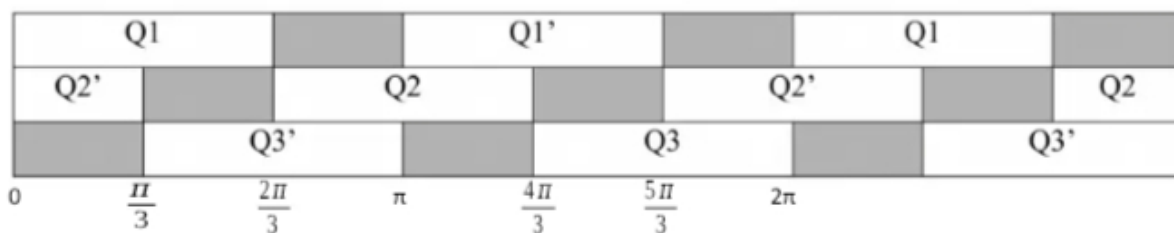


Figure III.11: Commande 120°

#### La commande 120°

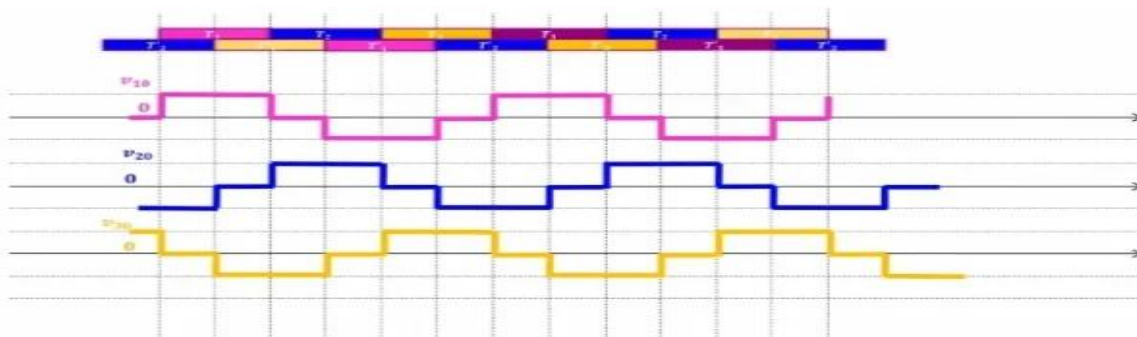


Figure III.12: Commande 120°

### III.5.2. Commande à 180°

Cette commande est conçue de façon à ce que les interrupteurs soient commandés pendant une durée correspondant à une demi période, mais leurs conduction déphasées, d'où

- à tout instant trois interrupteurs sont en état de conduire et les trois autres sont bloqués

- deux interrupteurs d'un même bras doivent être commandés de façon complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source de tension.[30] [31]

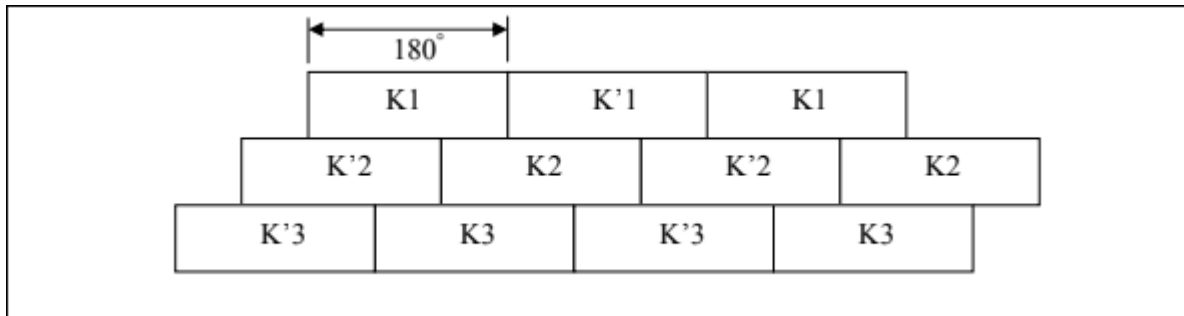


Figure III.13 : Commande 180°

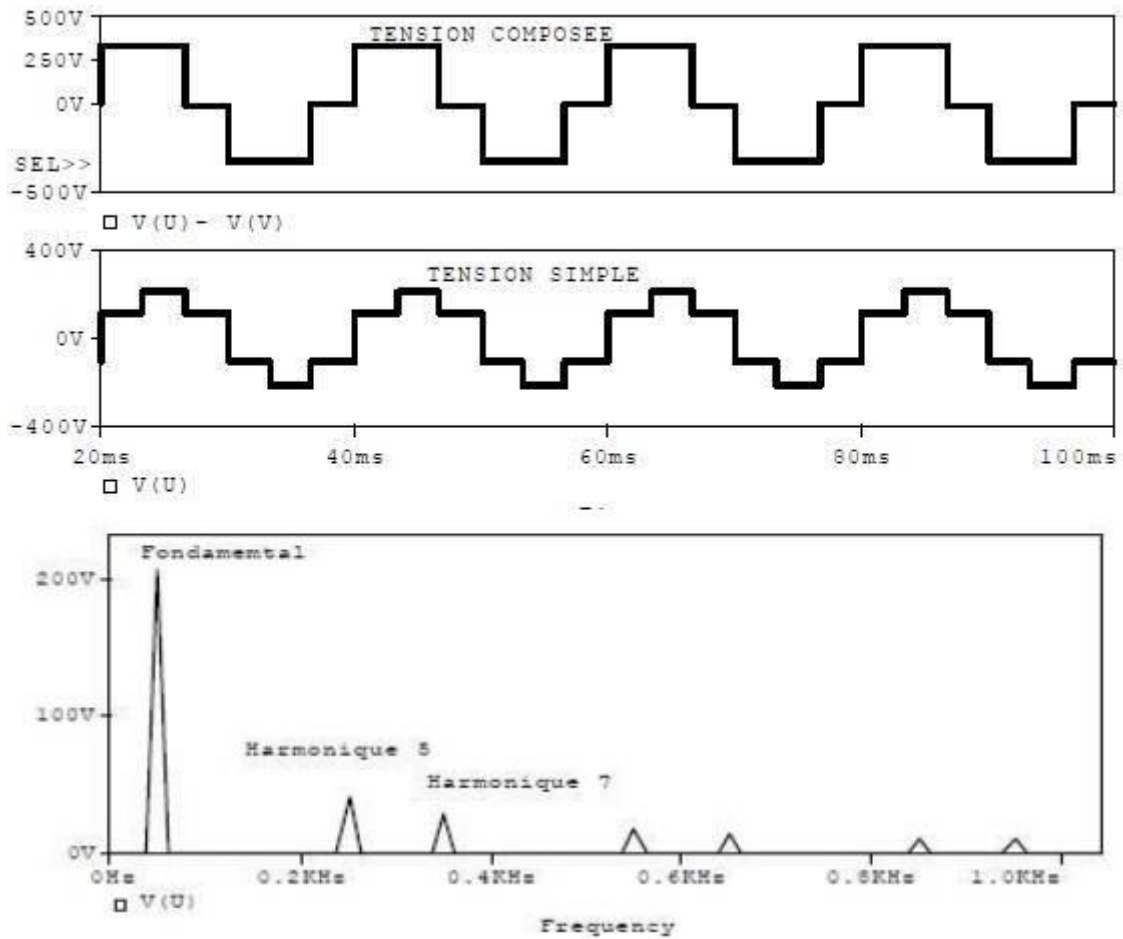


Figure III.14 : Forme d'onde de tension simple, tension composée et spectre d'harmonique pour une commande 180° [47]

### III.5.3. Commande par modulation de largeur d'impulsions

Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques qui sert à obtenir les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'impulsions (M.L.I. en français et P.W.M pour pulse Width modulation en anglais) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et tension fixe (en général une tension continue) par l'intermédiaire d'un convertisseur direct. Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement

Dans la majorité des cas, l'onde idéale est sinusoïdale. La M.L.I. permet de se rapprocher du signal désiré et de faire varier la valeur de fondamental de la tension de sortie, elle repousse vers les fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie ; ce que facilite le filtrage.

Le contenu harmonique génère par une onde M.L.I. entraîne des pertes dans le réseau (pertes fer dans le transformateur, pertes Joule dans la ligne et le convertisseur), dans la charge (pertes Joule, fer et par courant de Foucault). Elles génèrent dans les machines tournantes des oscillations de couple, des bruits acoustiques et des résonances électroniques. Elle injecte du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système. Il faut donc minimiser ces harmoniques.

Parmi ces différentes techniques de modulation de largeur d'impulsion, on a

- **La MLI Sinus-Triangle ou MLI sinusoïdal (STPWM),**
- **Modulation sinus-triangle**
- **La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM)**
- **Commande en MLI intersective:**
- **La modulation linéaire multiple (UPWM)**
- **La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM) :**

Pour un entraînement à courant alternatif performant, on préfère une stratégie de commande évoluée

#### III.5.3.1. Les paramètres essentiels de la MLI sont :

La fréquence de la modulation :  $f_p$

L'indice de modulation [32]: :

$$m = f_p / f_r \dots\dots\dots (III 1)$$

où est:  $f_r$  la fréquence de la référence -

Le coefficient de réglage en tension r

$$r = A_r/A_p \dots\dots\dots(III 2)$$

$A_r$  : Amplitude de la référence.

$A_p$ : Amplitude de la porteuse.

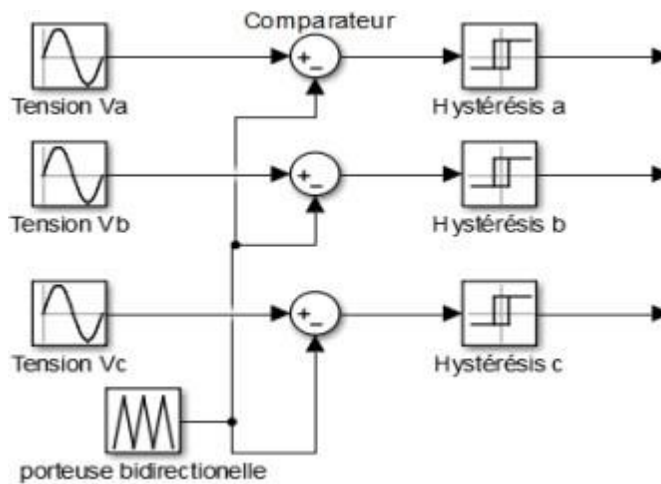
La modulation montre que plus « m » est grand et plus la neutralisation des harmoniques est efficace, d'autre part on cherche à obtenir une valeur de (r) la plus élevée possible. [33].

La modulation est dite synchrone si « m » est un nombre entier cela conduit à une Tension de sortie « U' » qui se reproduit identiquement à elle-même tous les T Dans certains cas la modulation est asynchrone, notamment quant à fréquence de modulation  $f_p$  donnée, on fait varier de façon continue la fréquence de la référence.

Pour le choix de « m », on doit tenir compte des pertes supplémentaires pendant les commutations d'un état à l'autre. Ces pertes croissent lorsque la fréquence de modulation augmente [33].

On ne pourra jamais fonctionner avec un rapport de réglage égal à « 1 », car il faut toujours laisser une durée suffisante aux intervalles de conduction et de blocage des interrupteurs d'un même bras. [33].

Le schéma synoptique de la commande par modulation triangulaire- sinusoïdale triphasé est donné par la figure III.15:



**Figure III.15:** Schéma synoptique de la commande en MLI (triphasé).

Un générateur d'onde délivre l'onde triangulaire aux trois phases (porteuse commune), par contre la référence est propre à chaque phase, les trois références étant déphasées de 120°

III.5.3.2. Les différentes techniques MLI (PWM).

III.5.3.2.1. La MLI Sinus-Triangle ou MLI sinusoïdal (STPWM),

Utilise le principe d'intersection entre une référence sinusoïdale de basse fréquence «  $f_m$  » appelée ‘modulante’, et un signal triangulaire de haute fréquence «  $f_p$  » appelé ‘porteuse’. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersections entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse à chaque demi-cycle, tandis que la fréquence d'onde de référence détermine la fréquence de sortie.

La valeur de la tension de sortie peut être modifiée de 0 à sa valeur maximale en changeant l'indice de modulation. Cette stratégie nécessite une commande distincte pour chaque phase de l'onduleur. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de  $2\pi/3$  à la même fréquence  $f$  (Figure III.16) Les équations présentées ci-dessous expriment les formes d'onde de référence :[34]

$$U_{ra} = \sqrt{2} * E * \sin(\omega t) \dots\dots\dots(III 3)$$

$$U_{rb} = \sqrt{2} * E * \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \dots\dots\dots(III 4)$$

$$U_{rc} = \sqrt{2} * E * \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \dots\dots\dots(III 5)$$

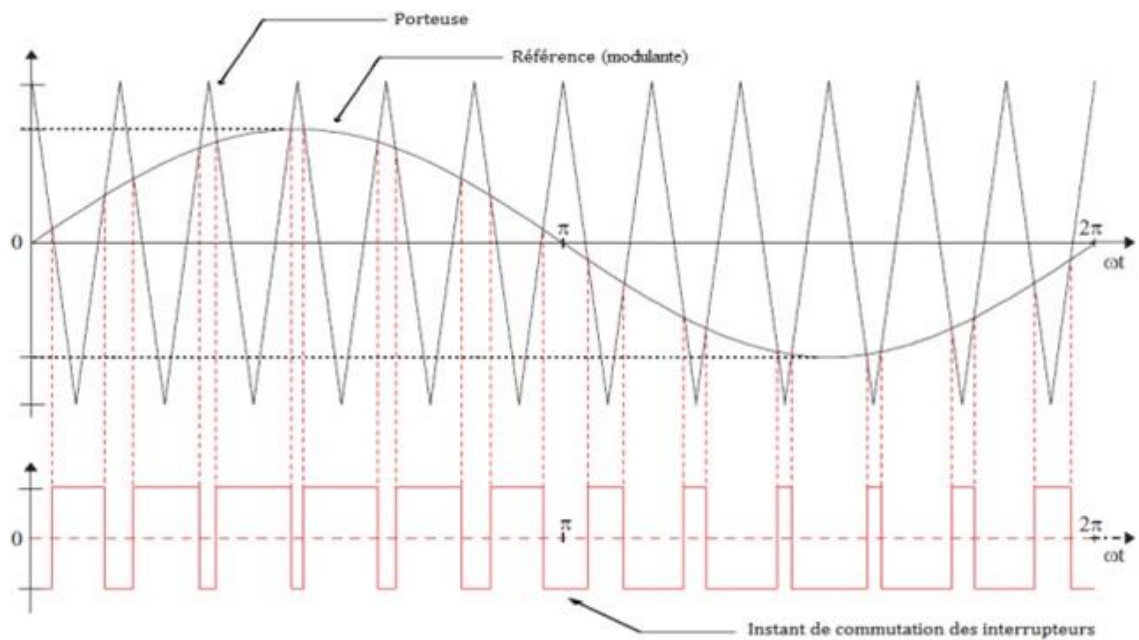
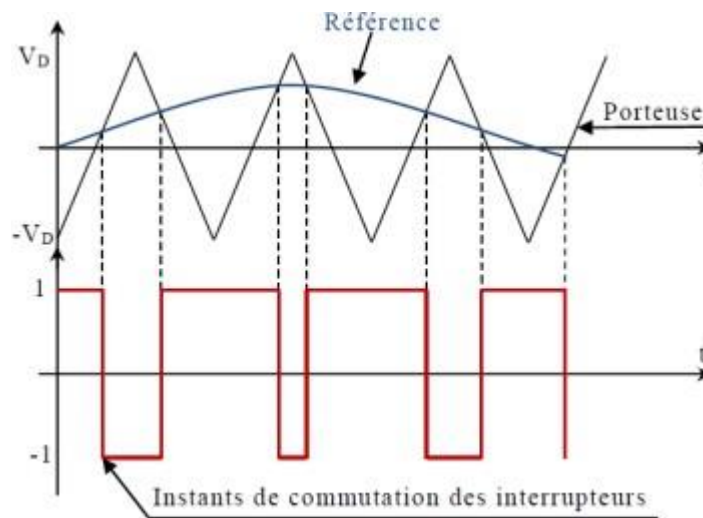


Figure III.16 Signal combiné Porteuse/Référence et leur résultat

### III.5.3.2.2. Modulation sinus-triangle

La M.L.I. sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de  $\frac{2\pi}{3}$  à la même fréquence  $f$  [38]



**Figure III.17** Le signal de la MLI sinus-triangle

### III.5.3.2.3. La modulation sinusoïdale triangulaire unipolaire (SPWM)

Dans ce cas, le signal de référence est sinusoïdal, on obtient à la sortie de l'onduleur une onde formée d'un train d'impulsion de largeur variable (Fig.III.18). Les instants de commutations sont déterminés par des points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse Ce type de MLI est la plus utilisée dans les applications industrielles, car elle s'est avérée la plus efficace pour la neutralisation des harmoniques.[37]

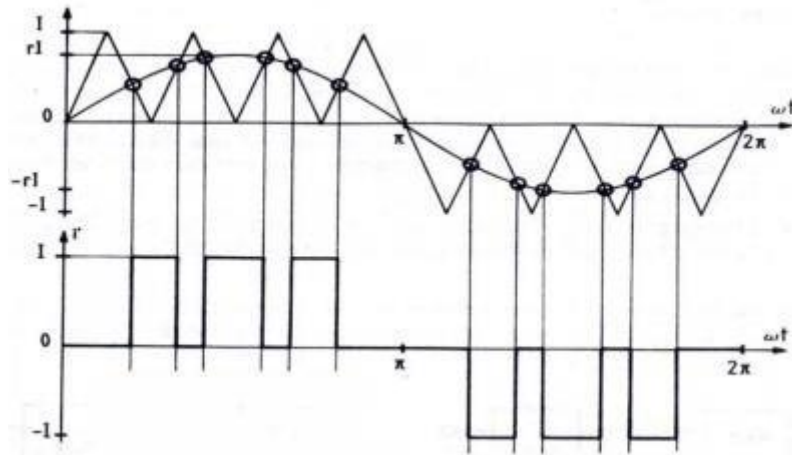


Figure III.18 MLI sinusoïdal triangulaire unipolaire.

#### III.5.3.2.4. Commande en MLI intersective:

Le principe de la MLI intersective est simple. Il s'agit de comparer un signal de référence sinusoïdal délivré par le système de commande (également appelé modulante) avec une porteuse à haute fréquence  $F_{dec}$  (souvent triangulaire symétrique). Cette comparaison détermine l'état des interrupteurs à la fréquence de découpage  $F_{dec}$ . Lorsque le signal de référence dépasse le signal triangulaire, l'ordre de commande ci vaut 1. Dans le cas contraire, il est mis à 0. De cette manière, la valeur moyenne du signal de pilotage (également appelé le rapport cyclique) sur une période de porteuse est égale à la valeur instantanée de la modulante [39]

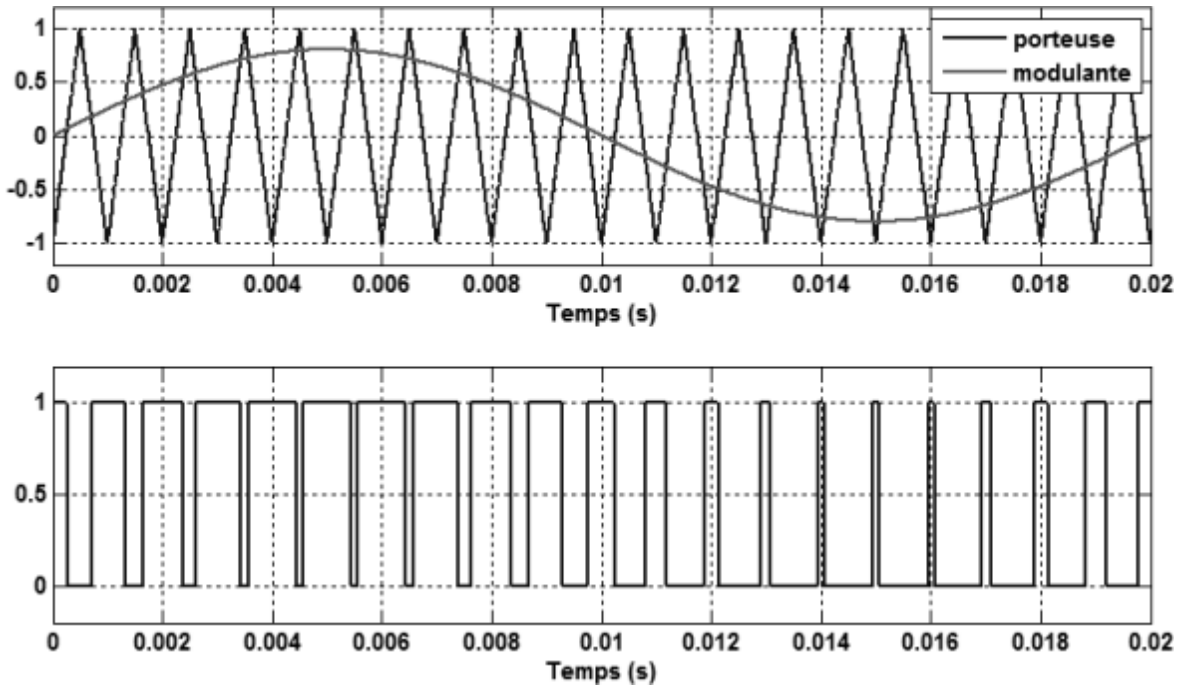


Figure III.19 Principe de la MLI intersective

III.5.3.2.5. La modulation linéaire multiple (UPWM)

Dans cette technique on compare une porteuse triangulaire avec un signal de référence linéaire. L'onde de sortie est sous la forme d'un train d'impulsion en créneaux de largeurs égales

Si l'indice de modulation est égal à un, on obtient la modulation singulière, dans laquelle le signal de sortie est formé d'une seule impulsion par demi-période [34]

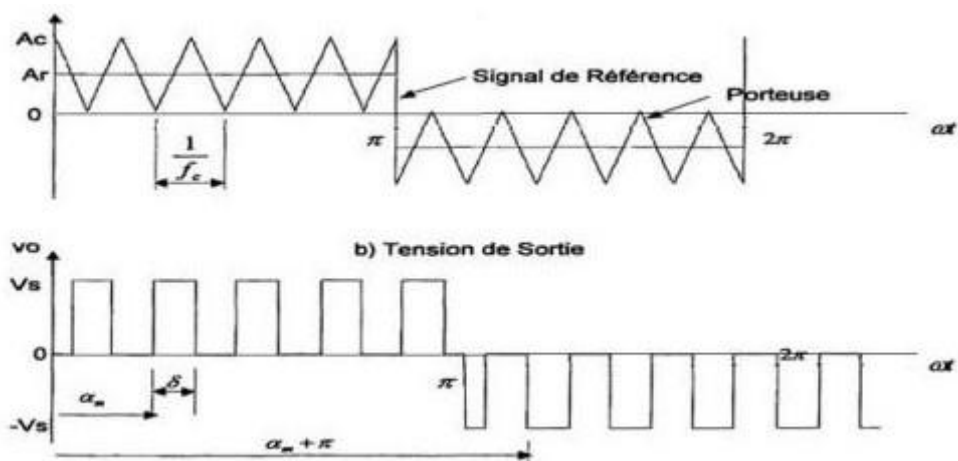


Figure III.20 La modulation de largeur d'impulsions multiples.

### III.5.3.2.6. La modulation sinusoïdale partielle (ou modifiée) (MSPWM)

Le signal de référence est toujours sinusoïdal, sauf que dans cette technique la porteuse n'est pas appliquée au milieu des alternances de la sinusoïde (Fig III 20)[40]

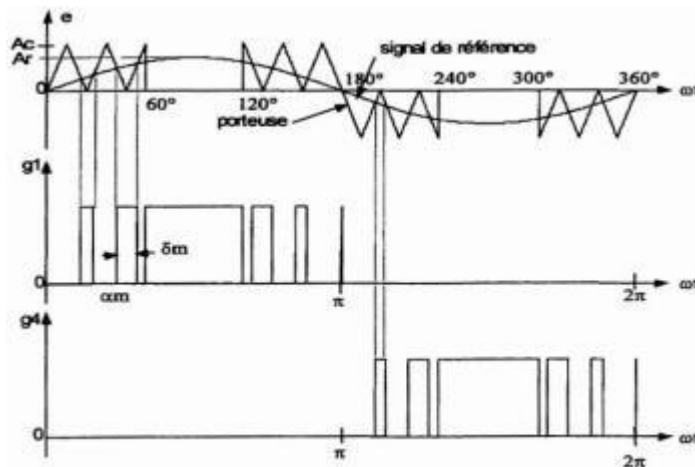


Figure III.21 La modulation sinusoïdale modifiée.

### III.6. Facteur de distorsion harmonique (THD):

Calcul du Taux de distorsion harmonique Le facteur de distorsion totale des harmoniques de la tension de sortie  $THD$ , est défini par le rapport de la somme quadratique des harmoniques de tension à la valeur de la somme quadratique du fondamental et des harmoniques de la tension [41]

$$THD = \frac{(\sum_{i=2}^n V_i^2)^{1/2}}{(\sum_{i=1}^n V_i^2)^{1/2}}$$

- Une valeur de THD inférieure à 10% est considérée comme normale, aucun dysfonctionnement n'est à craindre.
- Une valeur de THD comprise entre 10 et 50% révèle une pollution harmonique significative et il y a risque d'échauffement
- Une valeur de THD supérieure à 50% révèle une pollution harmonique importante et des dysfonctionnements sont fort probable.

### III.7. Utilisation des onduleurs

Les onduleurs sont largement utilisés dans les applications industrielles par exemple:

Variateur de vitesse des moteurs à courant alternatif, chauffage par induction, les alimentations de secours, les alimentations non interrompues. L'entrée d'un onduleur peut être

une batterie, une tension continue issue des panneaux solaires, ou d'autre source de courant continu obtenu à partir d'un redressement monophasé ou triphasé

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs autonomes, on trouve principalement Les onduleurs à fréquence fixe a commutation forcée : Alimentés le plus souvent par une batterie d'accumulateur, ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, le principe déboucle actuel des onduleurs autonomes [42], [43].

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forces :

Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.

### III.8. Applications

#### III.8.1. Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

La vitesse d'un moteur synchrone est fixée par la pulsation des courants statiques. Pour changer de vitesse il faut donc changer la fréquence des tensions d'alimentation. Il faut donc redresser la tension du réseau puis l'onduler à la fréquence désirée.

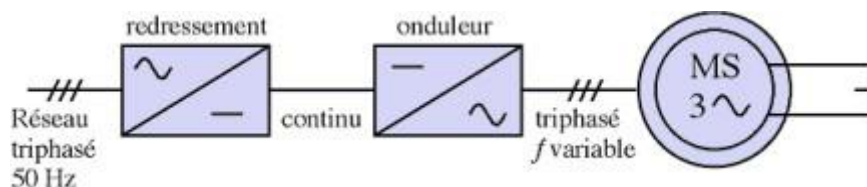


Figure III.22 : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

**Remarque :** pour que la puissance du moteur reste nominale lorsque la fréquence varie, il faut enfaite conserver le rapport ( $f/V$ ) constant. (Si la fréquence augmente, il faut augmenter la tension d'alimentation proportionnellement).

#### III.8.2. Alimentation de secours

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [44].

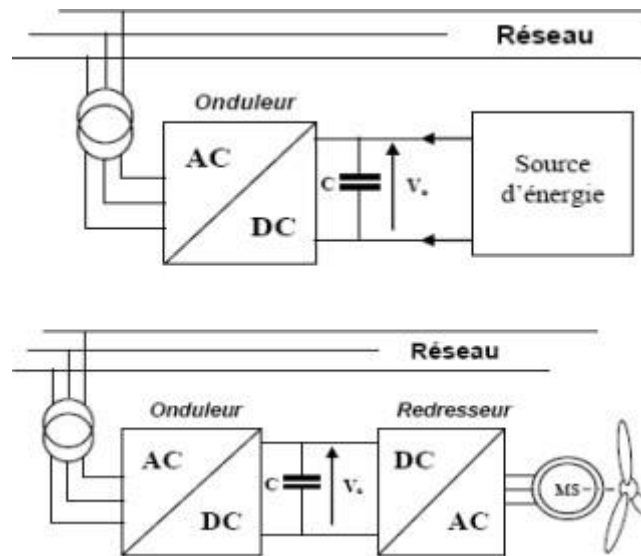


Figure III.23 Alimentation de secours

Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

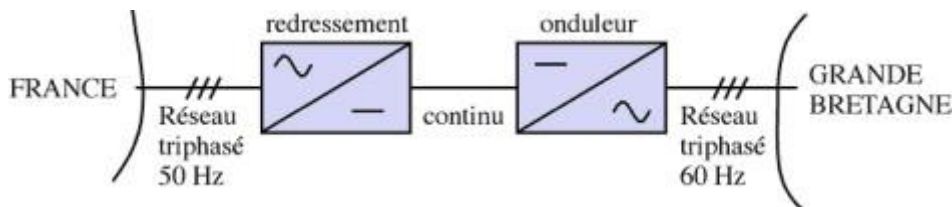


Figure III.24: Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

### III.9. Association de l'onduleur a la machine asynchrone

Un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsion permet d'alimenter toute machine à courant alternatif, AC machine, particulièrement un moteur asynchrone, avec une tension variable en amplitude et en fréquence entre autre pour faire varier sa vitesse dans des conditions de magnétisation optimale, voir (figure.III.25) L'énergie électrique appelée du réseau est redressée en continue ensuite filtrée (L, C) et enfin ondulée par l'onduleur alimentant le moteur en tension et fréquence variable. On passe de 50 1Hz fixe vers une fréquence variable à volonté au niveau de la machine. En mode commande des machines AC les commandes en fréquence représentent celles qui sont efficiente du point de Vue rendement et performances énergétiques voire automatique [45]

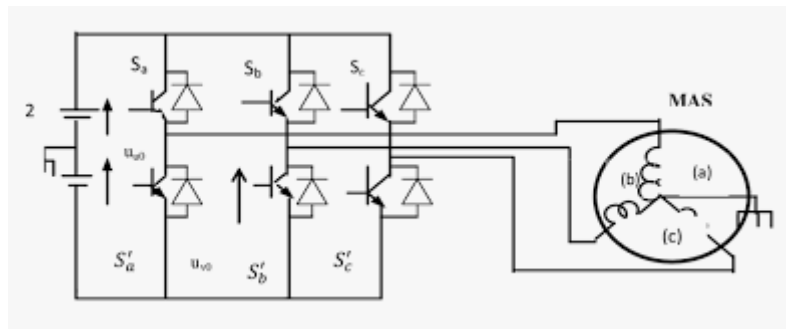


Figure III.25 Association Onduleur a la Machine asynchrone triphasée

### III.10. Les avantages et les inconvénients

#### III.10.1. Les avantages des onduleurs : [46]

- Le principal avantage de l'onduleur est de protéger des installations électriques contre les coupures brusques ou intempestives du courant. Ces coupures peuvent endommager ces installations, faire laisser inachevé un travail qu'on a commencé où faire perdre des données ou des textes en cours de traitement.
  - Le coût de mise en place est faible
  - Le montage de l'onduleur centralisé est vraiment simple
  - L'usage est simple et sans inconvénients majeurs.
  - En cas de panne, le service après-vente est facile à réaliser car tout est centralisé.
  - La compatibilité avec les batteries de nombreuses marques.

#### III.10.2. Les inconvénients des onduleurs : [46]

- En cas de détérioration du câblage, la sécurité de l'édifice peut être compromise avec un risque d'incendie.
- En cas de problème sur panneaux, la perte de production est probable.
- Le dimensionnement de l'onduleur centralisé doit-être fait de manière professionnelle.
- La durée de vie du matériel (environ 10 ans) et les garanties sont courtes (de 5 à 7 ans).

**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons commencé par des généralités sur les onduleurs définition, et leurs classifications, leurs domaines d'application, Puis nous avons donné les avantages et les inconvénients de l'onduleur et nous avons terminé notre chapitre par une conclusion qui explique ce que nous avons fait. Après cette, nous étudierons les Résultats de Simulation par logiciel MATLAB dans le prochain chapitre.

**Chapitre IV**  
**Résultats de Simulation**

## SIMULATION DU MODELE DE LA MAS EN TENSION ALIMENTER PAR ONDULEUR 2 ET 3 NIVEAUX

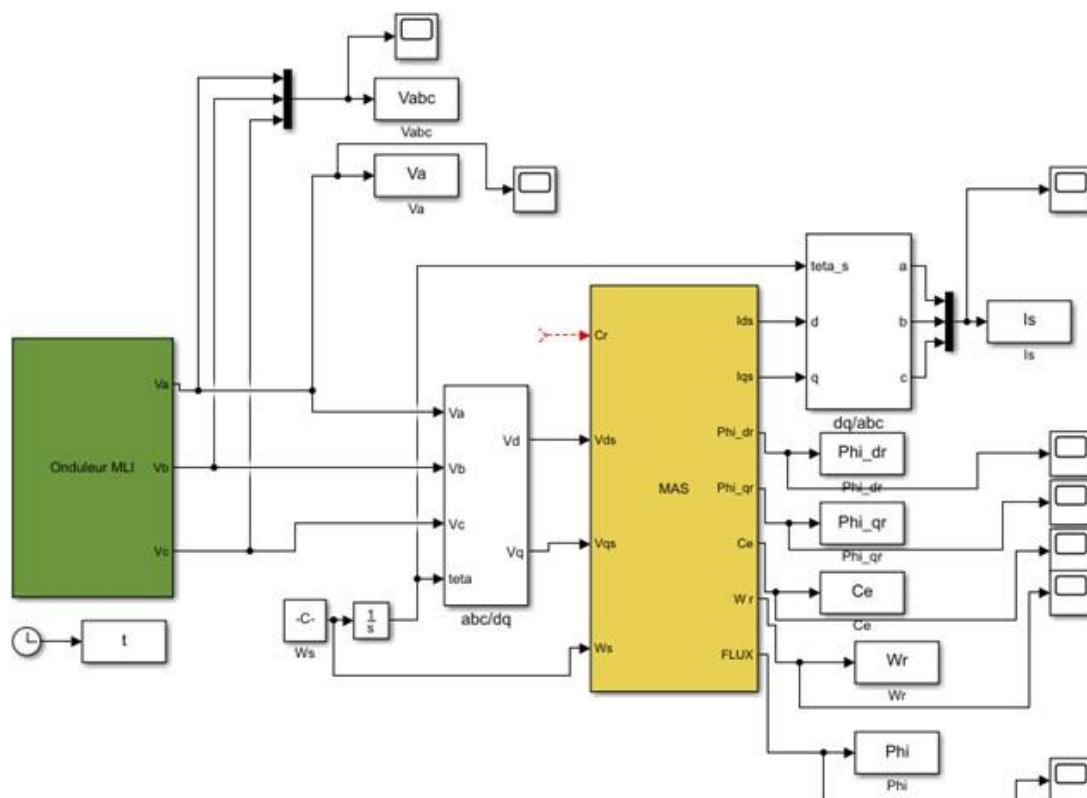
La simulation, bien connue de nos jours, des modèles des machines électriques et des entraînements, permet d'analyser les résultats des systèmes avec beaucoup de précision. Dans notre cas, toutes les simulations sont effectuées par le logiciel «SIMULINK» sous «MATLAB», il offre également plusieurs méthodes de résolution numérique des équations différentielles

Dans notre travail on va simuler la machine asynchrone à cage avec l'association de l'onduleur de tension à deux et trois à niveaux commandé par MLI.

### IV.1 Discussions des Résultats

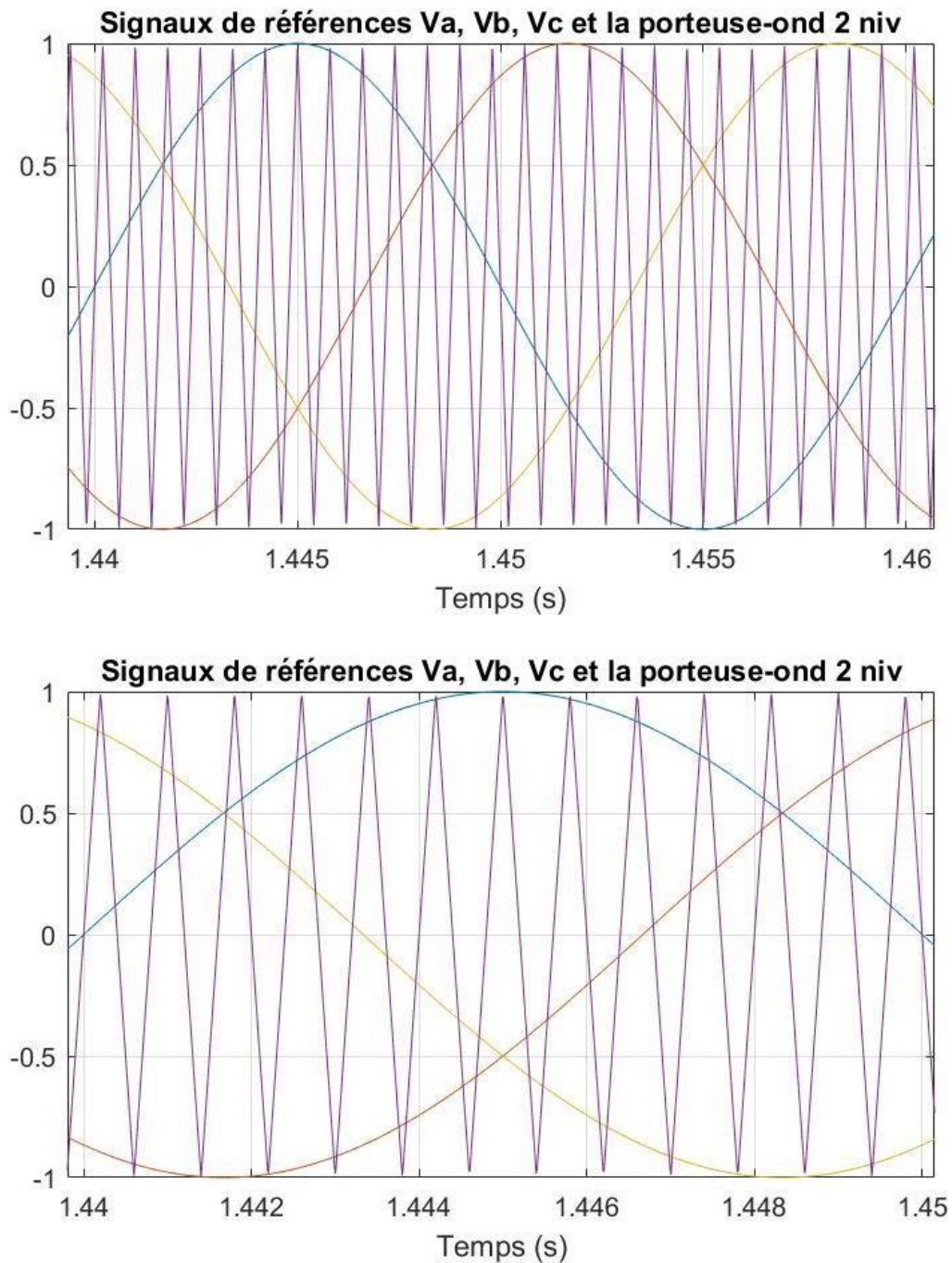
Dans cette étude nous avons associé à la MAS un onduleur de tension commandé en modulation de largeur d'impulsion (MLI), pour cela nous avons provoqué un couple de charge à l'instant  $t = 3s$  de valeur  $Cr = 10 \text{ N.m}$  L'association de la MAS est faite a la fois par un onduleur de 2 niveaux , et un autre onduleur de 3 niveaux.

### IV.2 Résultats obtenus de simulation avec un onduleur à 2 niveaux :



**Figure IV.1:** Schéma de simulation avec un onduleur à 2 niveaux

### IV.2.1. Signaux de références Va,Vb,Vc et la porteuse ond 2 niveaux



**Figure IV.2** : signaux de référence Va ,Vb ,Vc d'un onduleur à 2 niveaux.

#### Synchronisation et déphasage des références (Va, Vb , Vc)

Les signaux sinusoïdaux sont parfaitement **déphasés de 120°** équilibrés. Ces sinusoïdes sont les **tensions de référence** destinées à produire des tensions MLI pour chaque phase.

- **Porteuse triangulaire**

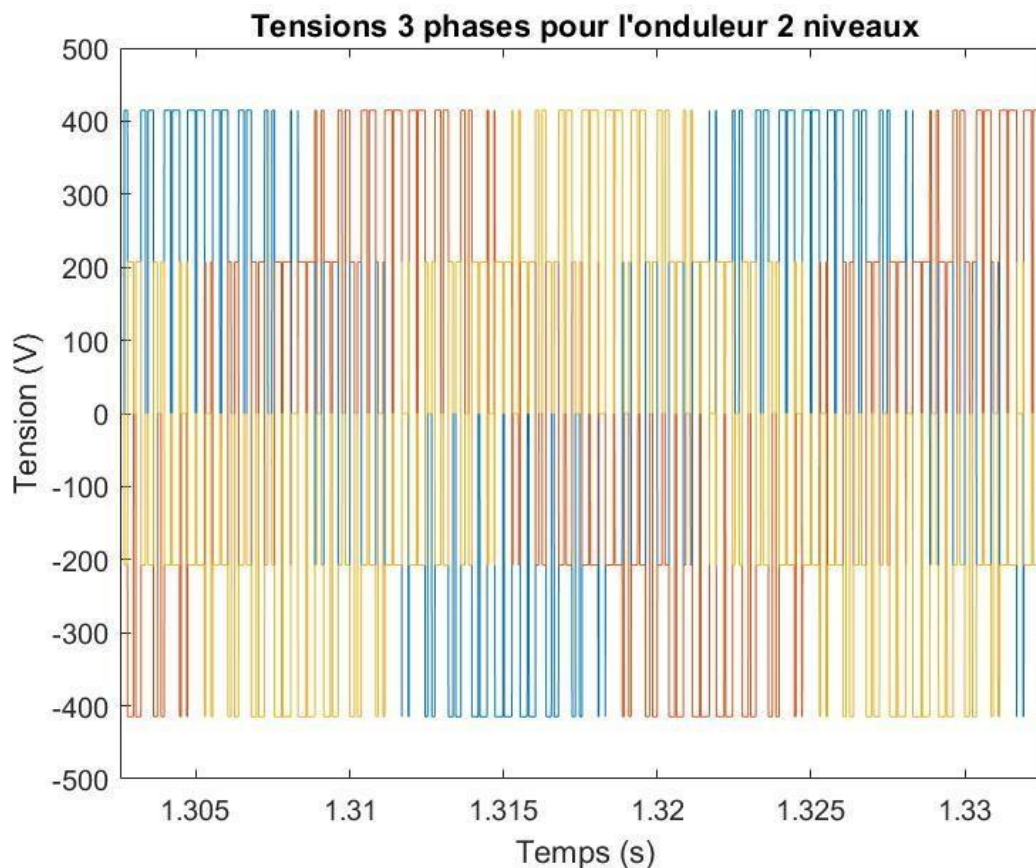
Le signal triangulaire (de haute fréquence) est la **porteuse commune** utilisée pour la **comparaison avec chaque sinusoïde**. Elle oscille entre -1 et +1, indiquant une **modulation symétrique centrée**.

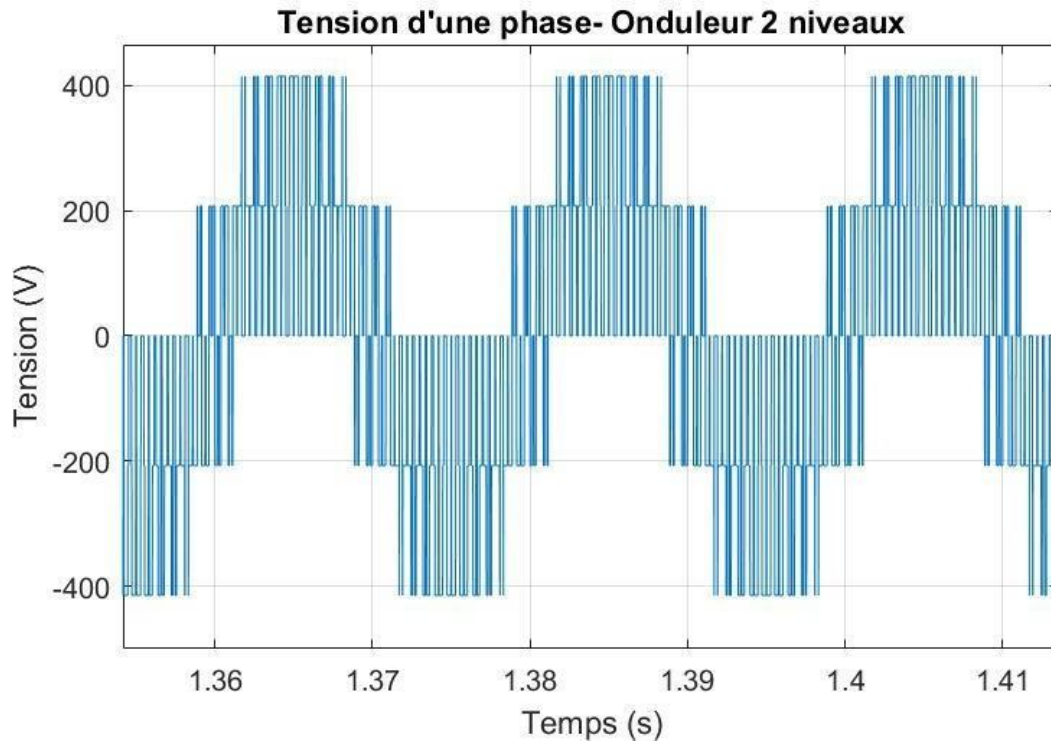
La **fréquence de la porteuse** est bien plus élevée que celle des sinusoïdes (5 kHz, période  $\approx 0.2$  ms), ce rapport est crucial : c'est le **rapport de modulation fréquentielle (mf)**.

- **Principe de fonctionnement MLI (typique d'une MLI sinusoïdale classique).**

Chaque sinusoïde est comparée à la porteuse pour générer des impulsions MLI. Quand la **référence est supérieure à la porteuse**, la sortie logique est 1 (tension positive,  $+V_{dc}/2$ ). Sinon, elle est à 0 (ou  $-V_{dc}/2$ ). Cela permet de produire une tension **moyenne sinusoïdale**.

#### IV .2.2. La Tension



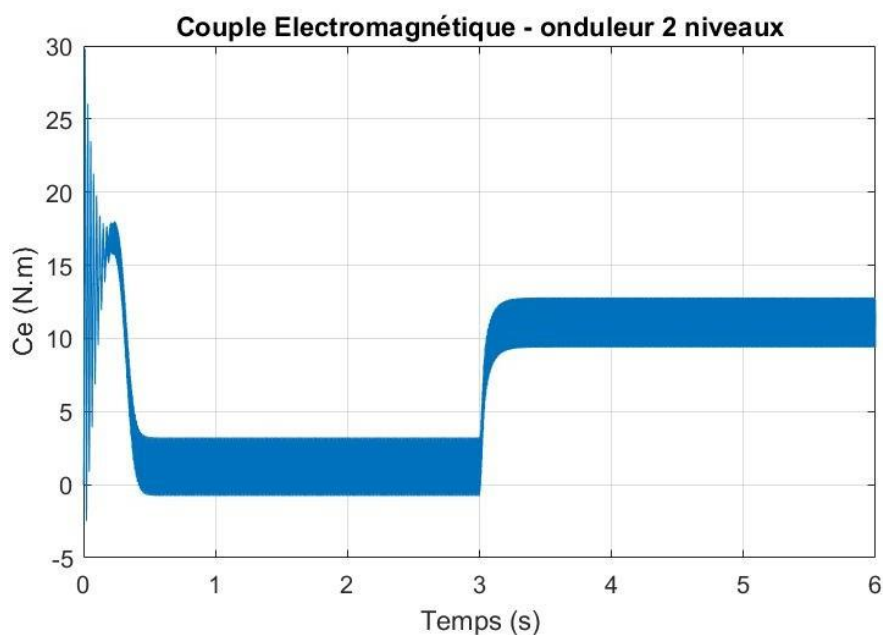


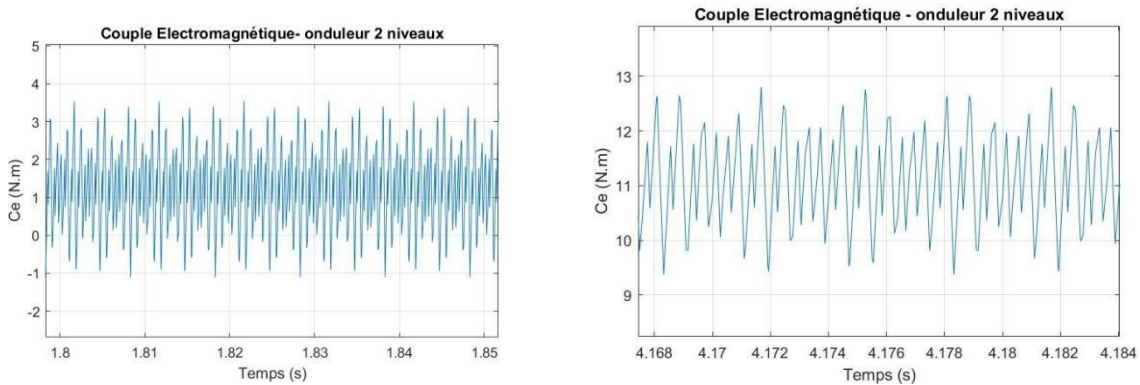
**Figure IV.3:** Les tensions  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  à la sortie d'un onduleur à 2 niveaux.

La figure montre la tension générée par un onduleur 2 niveaux alimentant une MAS pour produire une tension de sortie plus proche d'une sinusoïde.

Le signal passe uniquement entre  $+V_{dc} / 2$  (+400 V) et  $-V_{dc} / 2$  (-400 V) : c'est bien un **onduleur bipolaire 2 niveaux**.

### IV.2.3. Le Couple Electromagnétique





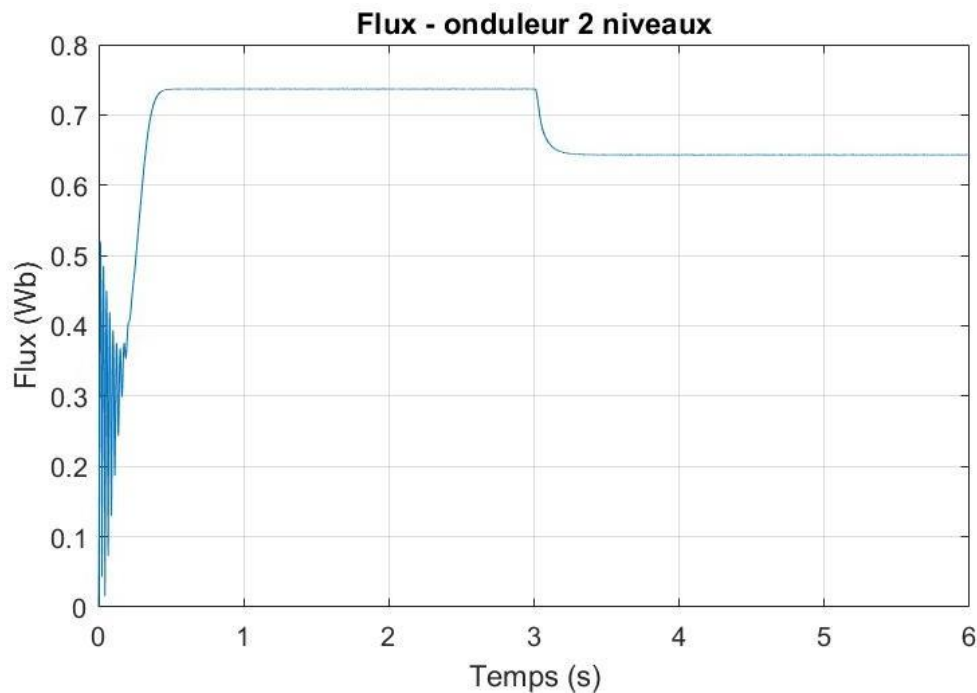
**Figure IV.4 :** Réponse du couple électromagnétique d'un onduleur à 2 niveaux.

- **Démarrage :** lorsque  $t \in [0, 0.35 \text{ s}]$ , au démarrage, le couple atteint une valeur maximale qu'est égal à 30 N.m(**courant d'appel**). Pendant cet intervalle on remarque qu'il y a des oscillations ce qui implique le régime transitoire.
- **Régime permanent :** Stabilisation attendue autour de la consigne.

Lorsque  $t \in [0.35, 3 \text{ s}]$ , le couple électromagnétique se stabilise vers une valeur moyenne qu'est égale 1 N.m, ce qui implique le fonctionnement à vide de la machine.

A l'instant  $t = 3 \text{ s}$ , on applique une charge mécanique d'une valeur 10 N.m, dans ce cas le couple continu à osciller aussi autour de cette valeur

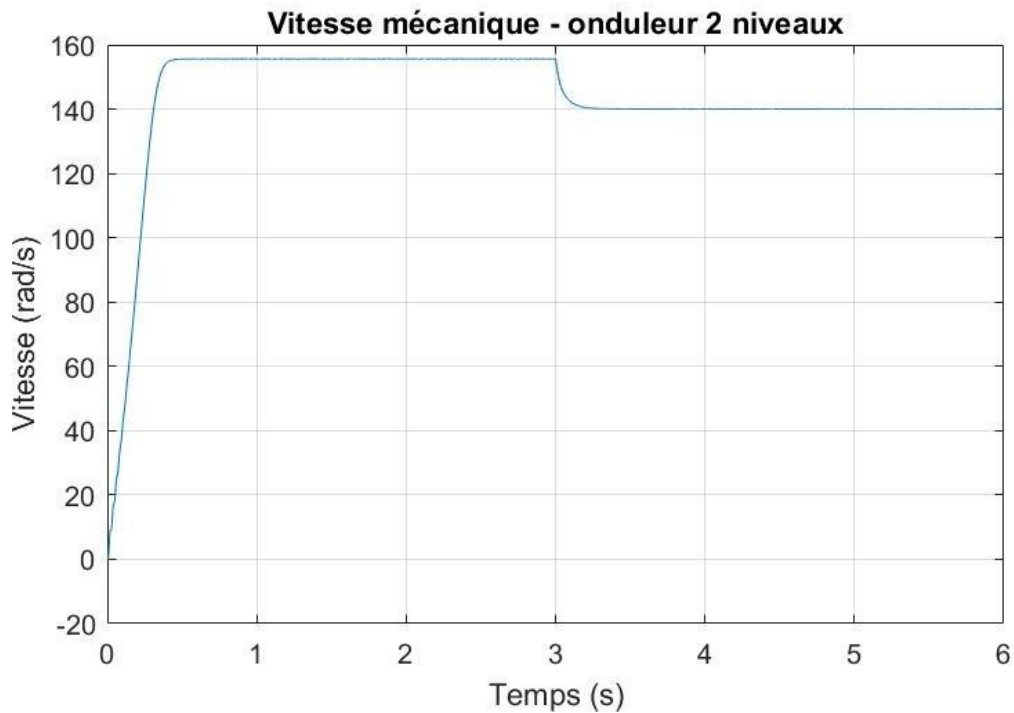
#### IV.2. 4. Le Flux



**Figure IV.5:** Le Flux d'un onduleur à 2 niveaux.

Le flux statorique augmente rapidement jusqu'à environ 0,72 Wb, où il se stabilise, puis subit une légère chute vers 0,62 Wb après 3 secondes. Due au passage de vide à charge, le flux reste toutefois relativement stable, indiquant un bon contrôle du flux par l'onduleur

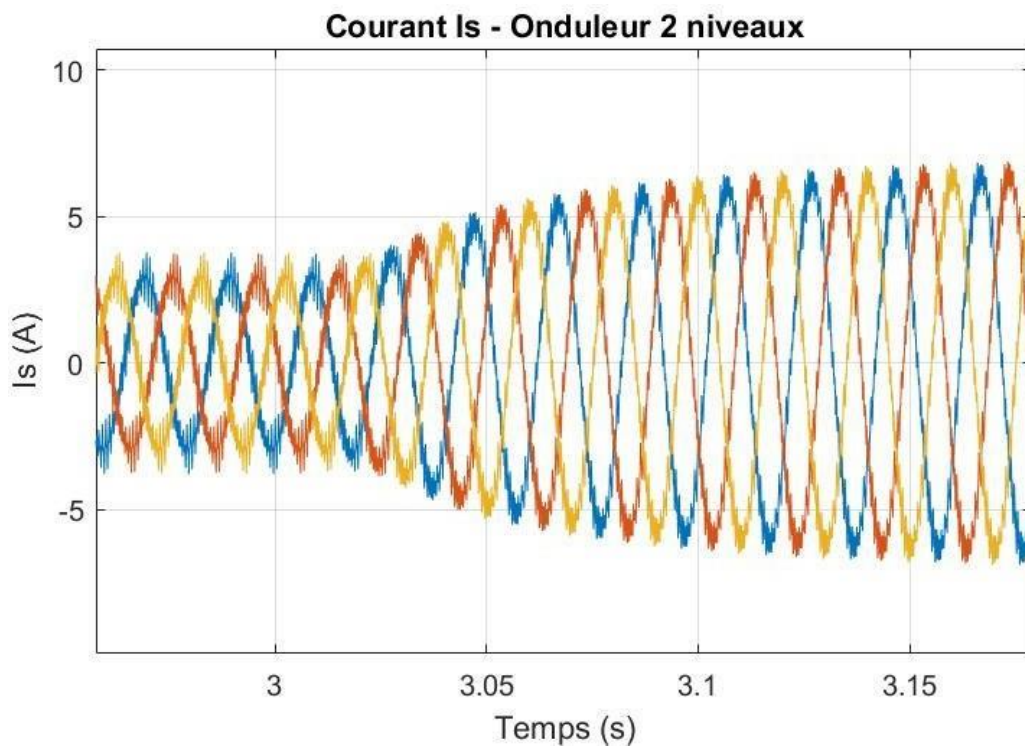
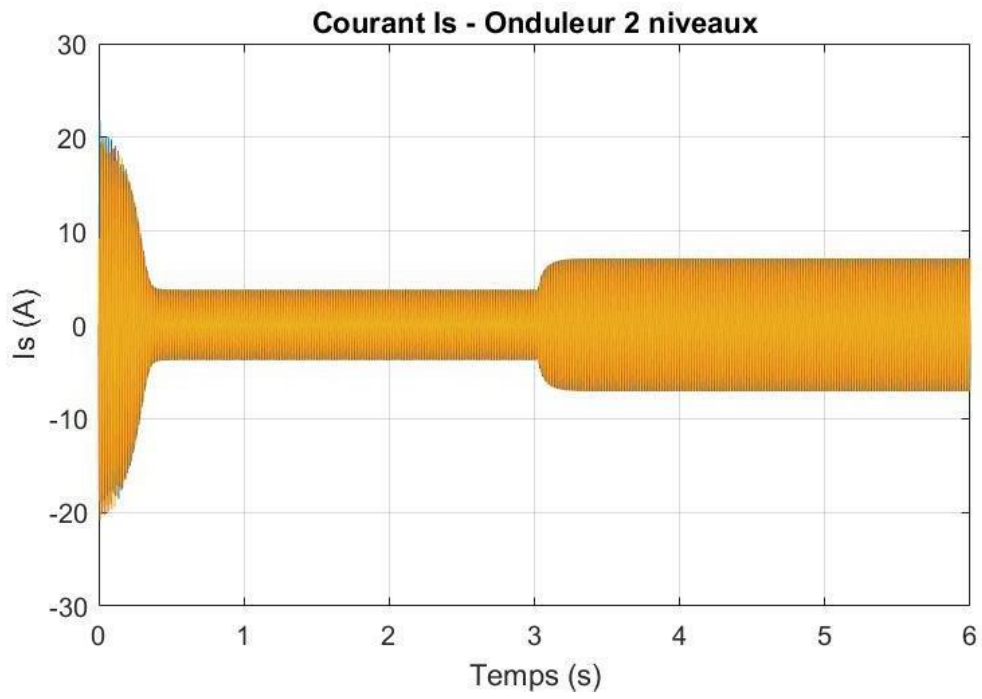
#### IV.2.5. La Vitesse Mécanique

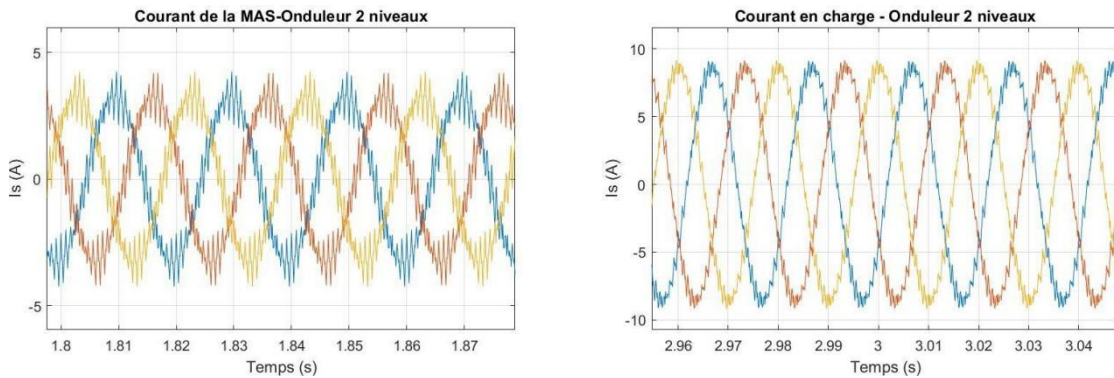


**Figure IV.6 :** La Vitesse mécanique d'un onduleur à 2 niveaux.

Au démarrage et pendant le régime transitoire la vitesse est presque linéaire puis elle atteint sa valeur nominale à vide de 157 rad /s. lorsque la MAS fonctionne en charge, on remarque qu'il y a une diminution de cette valeur  $\Omega = 140$  rad/s.

IV.2.6. Le courant  $I_s$





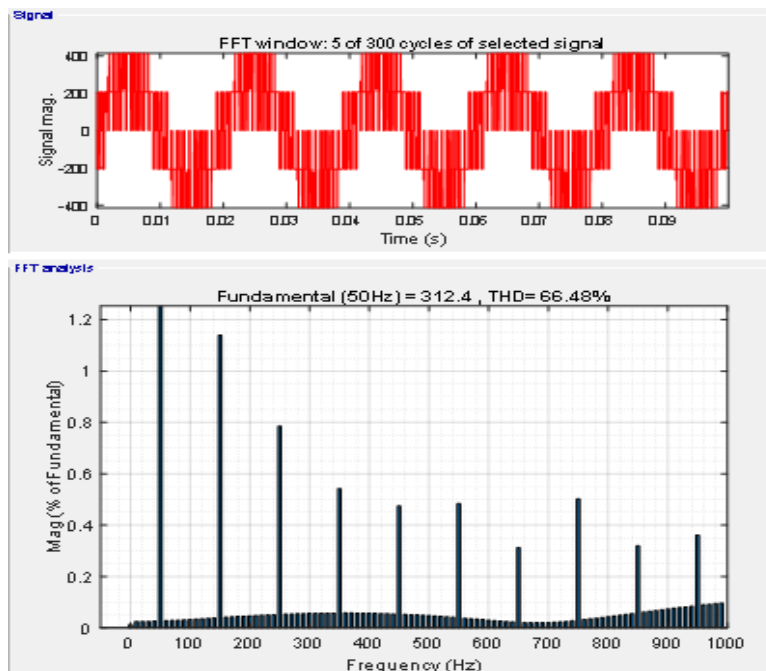
**Figure IV.7 :** Le Courant de la MAS d'un onduleur à 2 niveaux.

Les trois courants forment un système triphasé équilibré et elles sont décalées entre elles d'un tiers ( $1/3$ ) de période.

Le temps de réponse du moteur est caractérisé par une période de 0.35s.

- **En régime transitoire**, le courant atteint des valeurs très élevées environs de 20A
- **En régime permanent**, pour  $m = 35$ , la forme du courant statorique à une forme similaire d'une sinusoïde avec des perturbations, elle est très riche en harmoniques. Les valeurs montrent une stabilité en marche à vide ( $I=4A$ ), ensuite un courant en charge ( $I=8A$ )

#### IV.2.7. THD Tension pour Onduleur 2 Niveaux



**Figure IV.8 :** Le spectre d'harmonique de la tension d'un onduleur à 2 niveaux.

- **THD de la Tension (THD = 66.48%)**
- **Valeur critique:** >5% est inacceptable pour la machine asynchrone (échauffement, pertes accrues).

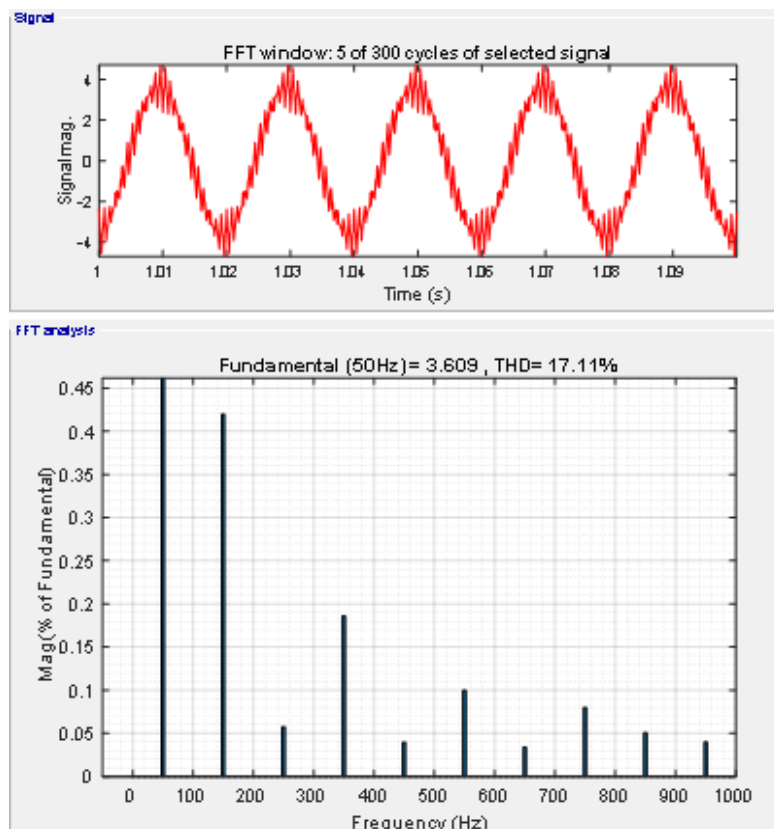
#### Origine du problème:

- **Naturel avec un onduleur 2 niveaux:** Les transitions abruptes génèrent des harmoniques élevés.
- **Charge inductive faible:** Le courant ne lisse pas suffisamment la tension MLI.

#### Solutions

- **Filtrage actif:** Filtre LC en sortie pour réduire le THD à <10%.
- **MLI optimisée:** Modulation 3 niveaux ou MLI avec pré compensation des harmoniques.

#### IV.2.8. THD Courant pour Onduleur 2 Niveaux



**Figure IV.9 :**Le spectre d'harmonique de le Courant d'un onduleur à 2 niveaux.

#### THD du Courant (THD = 17.11%)

- **Norme acceptable:** <5% pour les applications industrielles (IEEE-519). [\[47\]](#)

**Cause principale:**

**MLI non optimisée** (modulation MLI classiqu

- **Absence de filtre LC** en sortie de l'onduleur.

**Correctifs:**

- **Augmenter la fréquence PWM** (ex. passer de 5 kHz à 10 kHz).
- **Utiliser une MLI vectorielle (SVM)** pour réduire les harmoniques de 30-50%.
- **Ajouter un filtre LC** pour atténuer les résidus haute fréquence.

**IV.2. 9. Comparaison Courant vs Tension**

<b>Parameter</b>	<b>Courant (THD=17.11%)</b>	<b>Tension (THD=66.48%)</b>
<b>Impact sur la MAS</b>	Pertes cuivre, vibrations	Pertes fer, échauffement
<b>Source principal</b>	MLI + interaction charge	Commutations brutales (2 niveaux)
<b>Solution urgente</b>	Optimiser la MLI	Ajouter un filtre LC

IV.3. Résultats obtenus de simulation avec un onduleur à 3 niveaux :

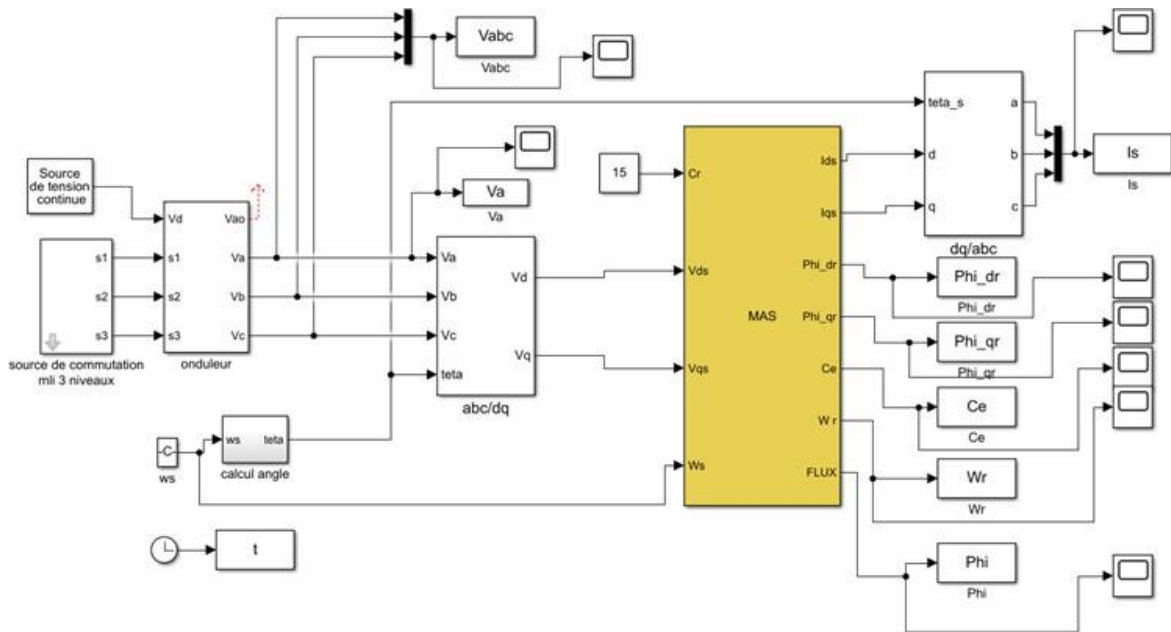
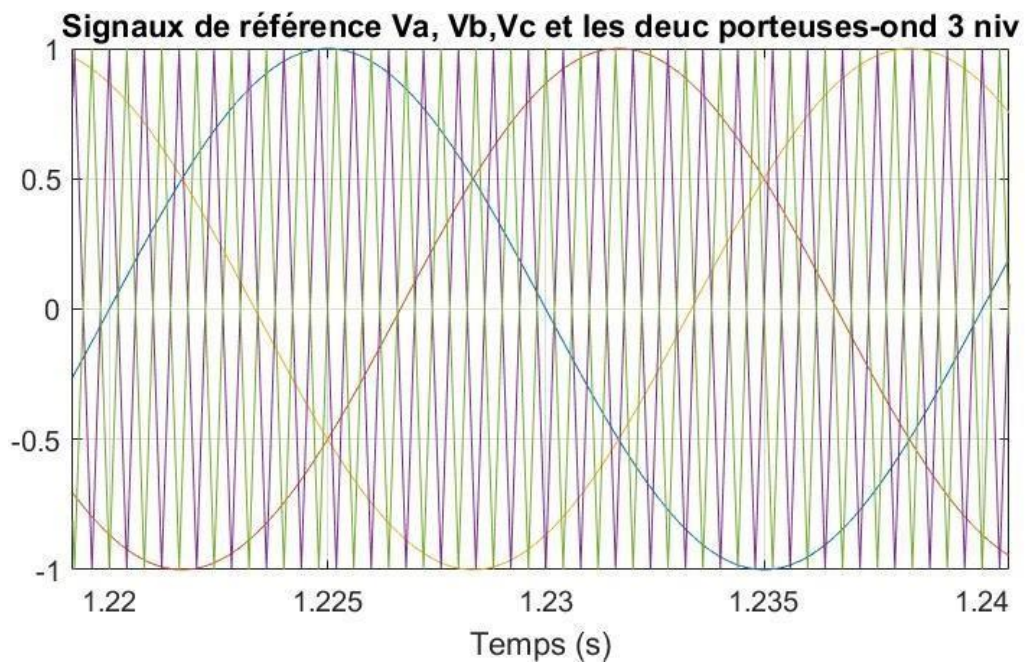


Figure IV.10 : Schéma de simulation avec un onduleur à 3 niveaux

IV .3.1. Signaux de références  $V_a, V_b, V_c$  et la porteuse ond 3 niveaux



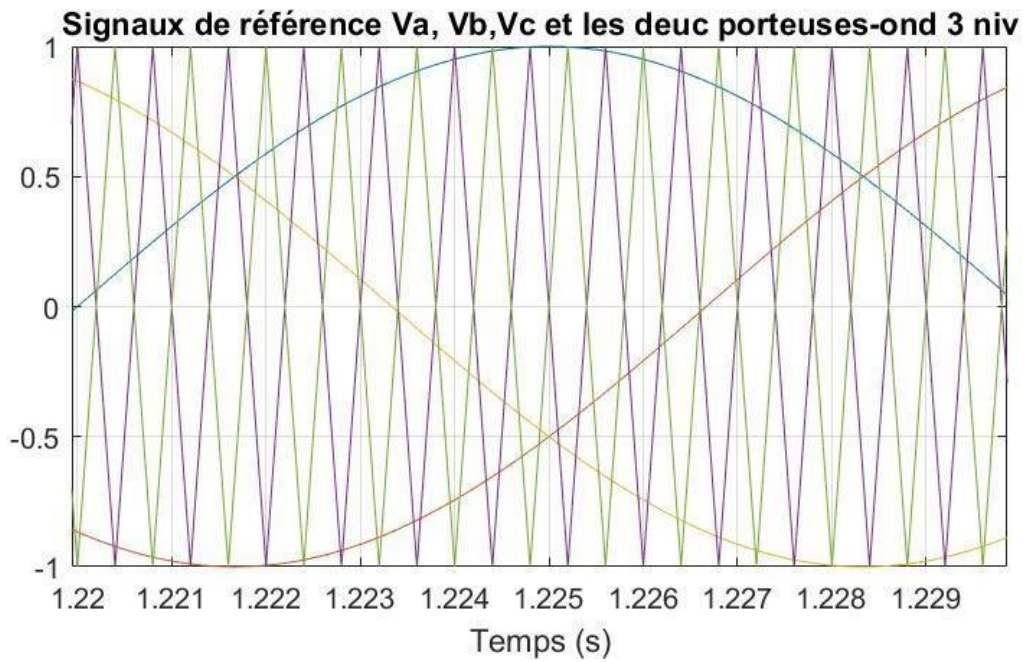


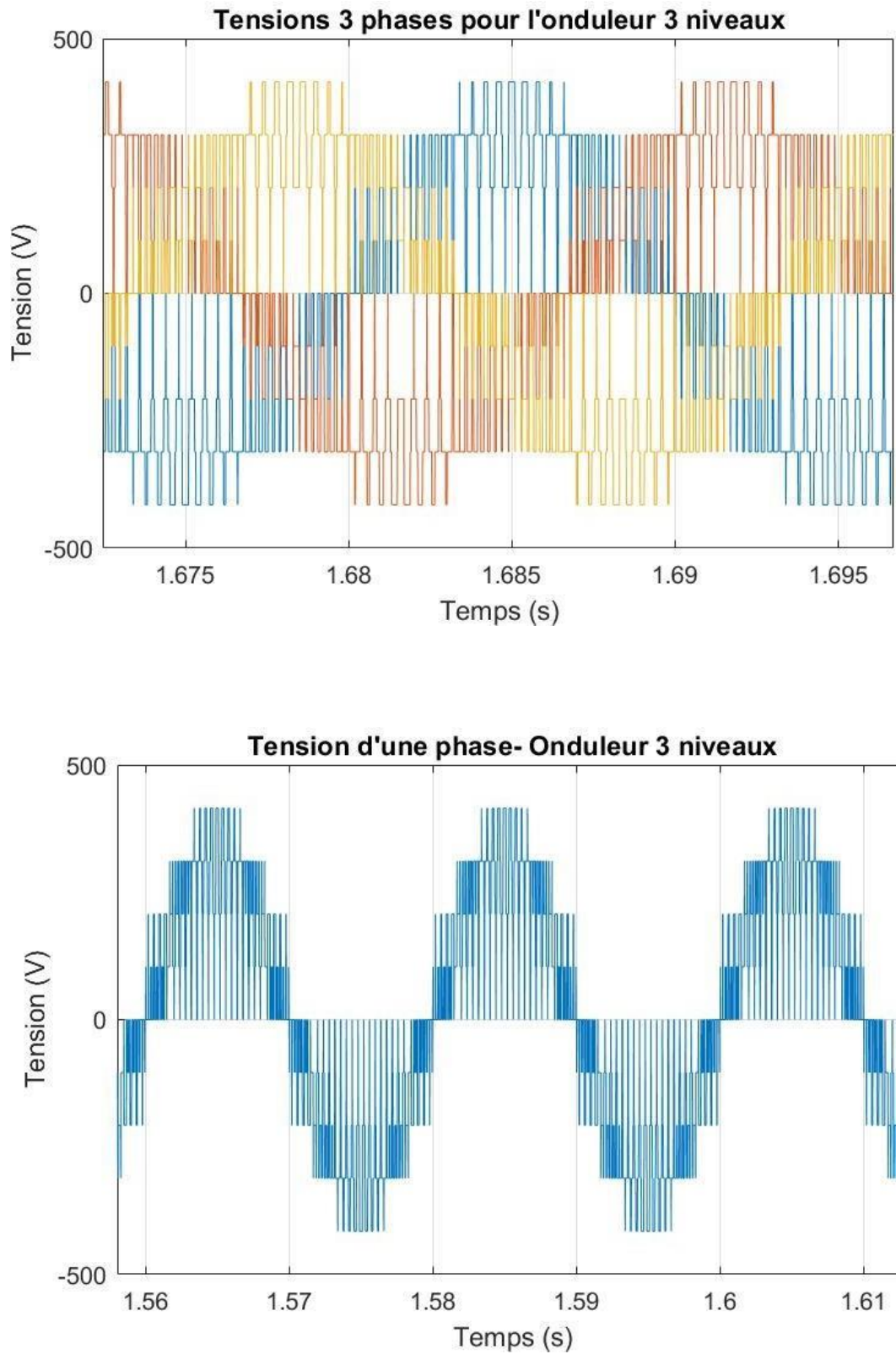
Figure IV.11 : signaux de reference  $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$  un onduleur à 3 niveaux

### Signaux Porteuses et Références (3 Niveaux)

#### Configuration typique:

- Deux porteuses triangulaires décalées (en opposition de phase) comparées aux références sinusoïdales ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ).
- Génération des niveaux :
  - **Niveau +Vdc**: Référence > Porteuse supérieure.
  - **Niveau 0**: Porteuse inférieure < Référence < Porteuse supérieure.
  - **Niveau -Vdc**: Référence < Porteuse inférieure.

### IV .3.2. La Tension



**Figure IV.12:** Les tensions  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$  à la sortie d'un onduleur à 3niveaux.

### Tension Monophasée (1 phase)

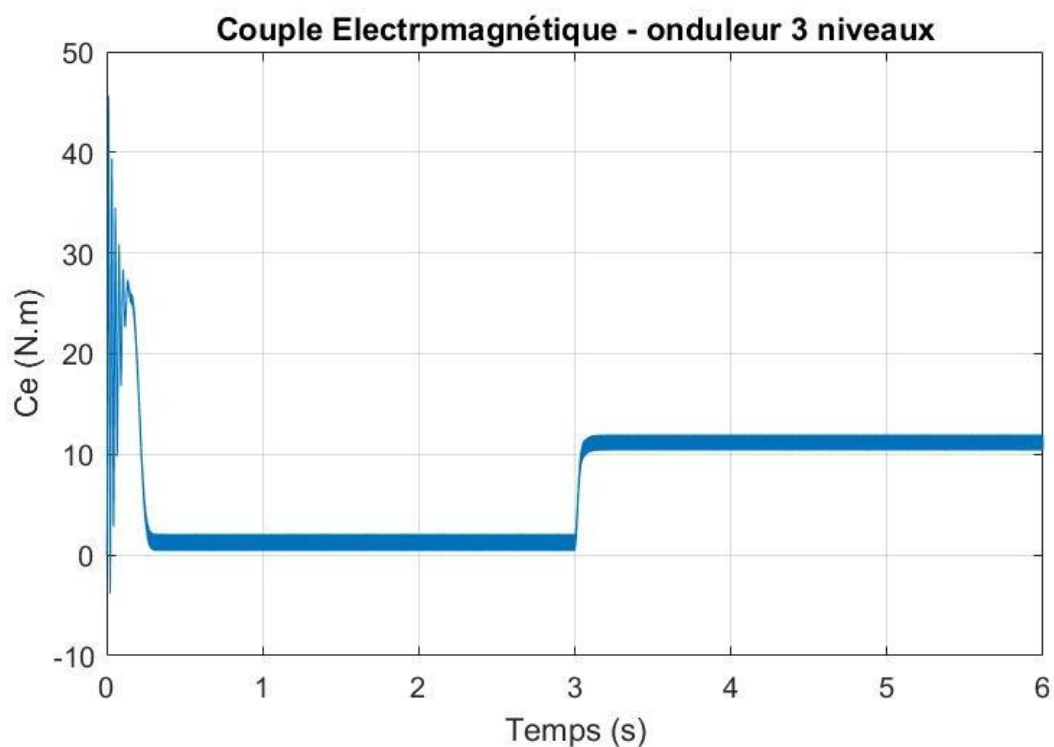
- **Forme d'onde attendue:**
- **3 niveaux distincts** ( $-V_{dc}$ ,  $0$ ,  $+V_{dc}$ ) avec des transitions progressives.
- **Réduction des harmoniques** par rapport à un onduleur 2 niveaux grâce aux niveaux intermédiaires.

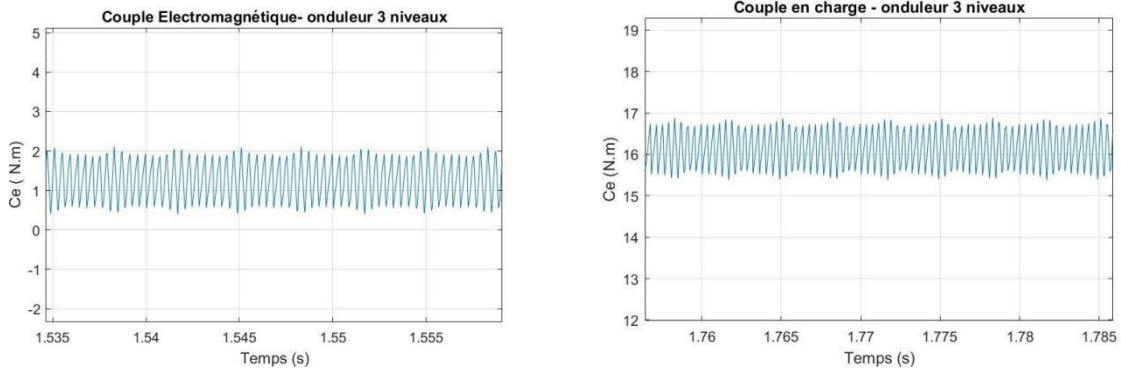
### Tensions Triphasées

- **Forme d'onde attendue :**
- **3 signaux décalés de  $120^\circ$** , chacun avec 3 niveaux ( $-480$  V,  $0$  V,  $+480$  V).
- **Avantage clé:** Réduction du THD tension (visuel moins "agressif" qu'en 2 niveaux).

#### IV.3.3. Le Couple Electromagnétique

Marche à vide puis en charge à  $t=0.3$  s





**Figure IV.13** : Réponse du couple électromagnétique un onduleur à 3 niveaux

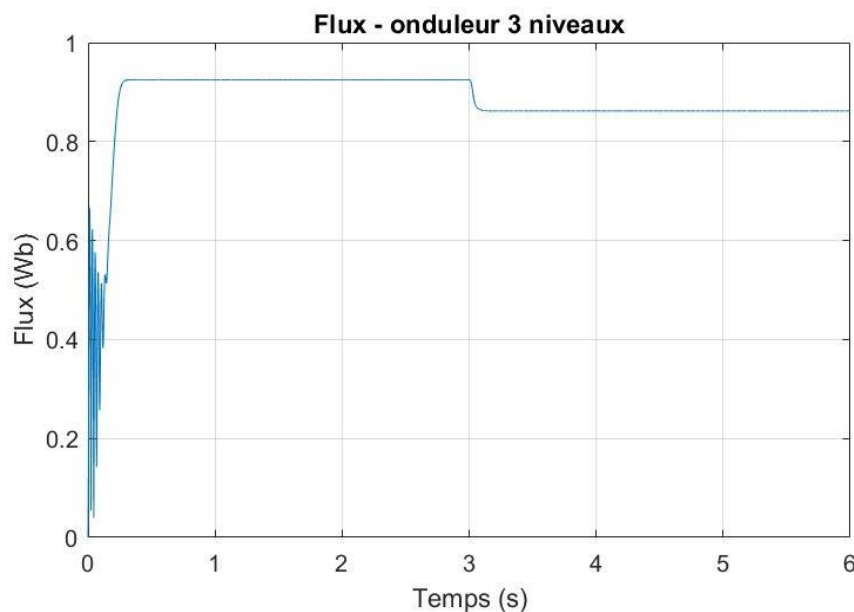
**Démarrage** : lorsque  $t \in [0, 0.3 \text{ s}]$ , au démarrage, le couple atteint une valeur maximale qu'est égal à 45 N.m(**courant d'appel**). Pendant cet intervalle on remarque qu'il ya des oscillations ce qui implique le régime transitoire.

**Régime permanent** : Stabilisation attendue autour de la consigne.

Lorsque  $t \in [0.3, 3 \text{ s}]$ , le couple électromagnétique se stabilise vers une valeur moyenne qu'est égale 1 N.m, ce qui implique le fonctionnement à vide de la machine.

A l'instant  $t = 3 \text{ s}$ , on applique une charge mécanique d'une valeur 10 N.m, dans ce cas le couple continu à osciller aussi autour de cette valeur

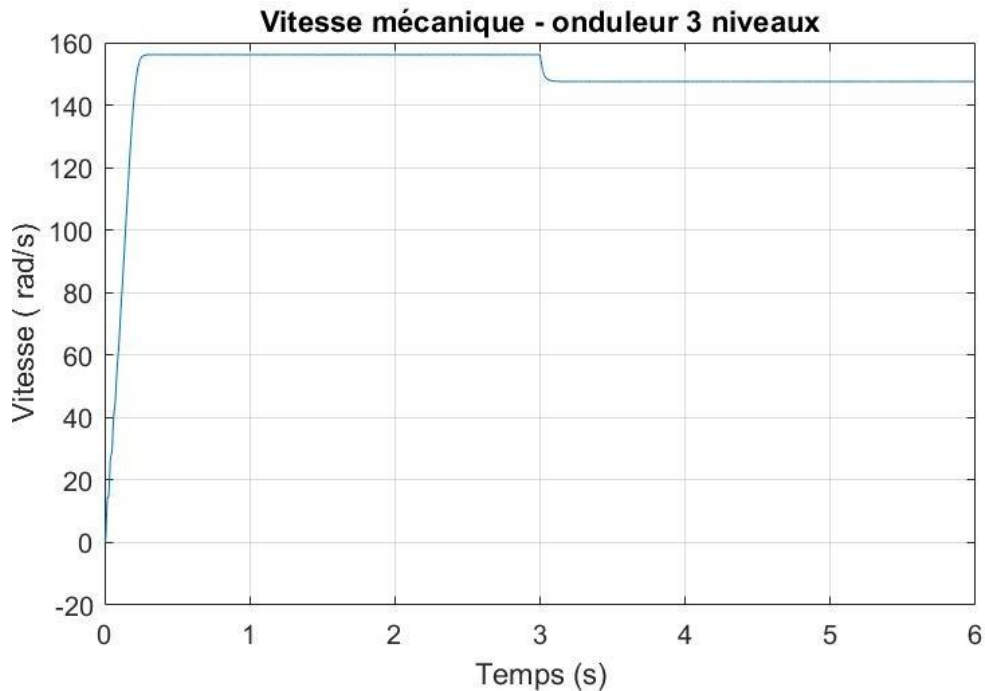
#### IV.3.4. Le Flux



**Figure IV.14** : Le Flux d'un onduleur à 3niveaux.

Le flux statorique augmente rapidement jusqu'à environ 0,86 Wb, où il se stabilise, puis subit une légère chute vers 0,82 Wb après 3 secondes. Due au passage de vide à charge, Le flux reste toutefois relativement stable, indiquant un bon contrôle du flux par l'onduleur

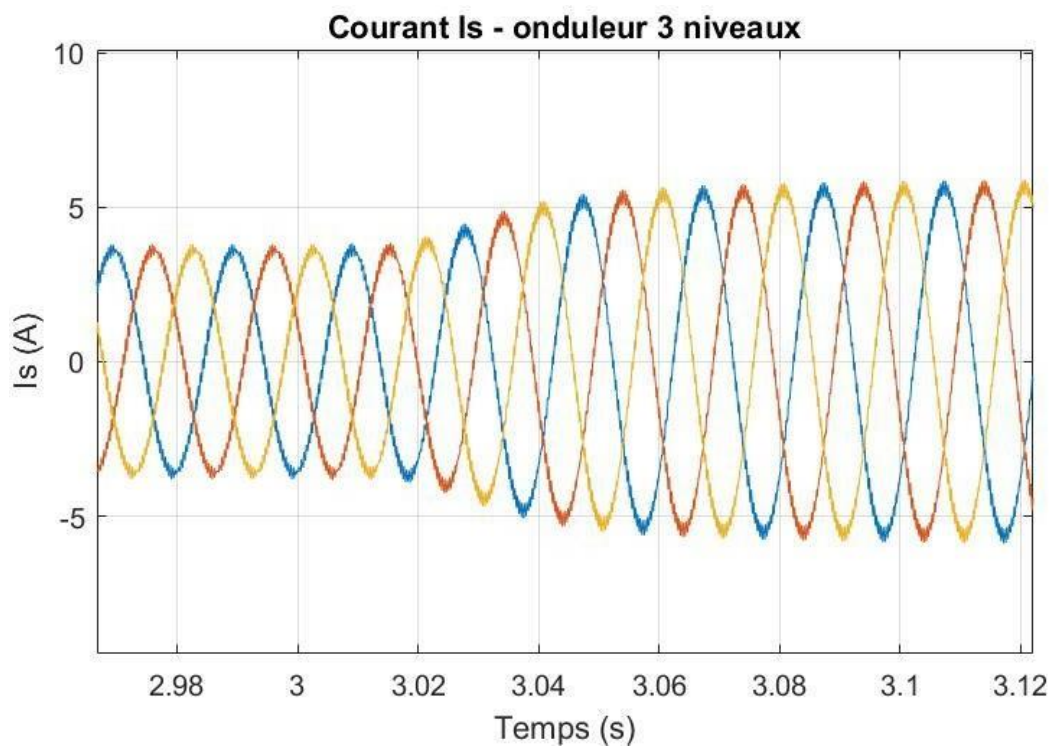
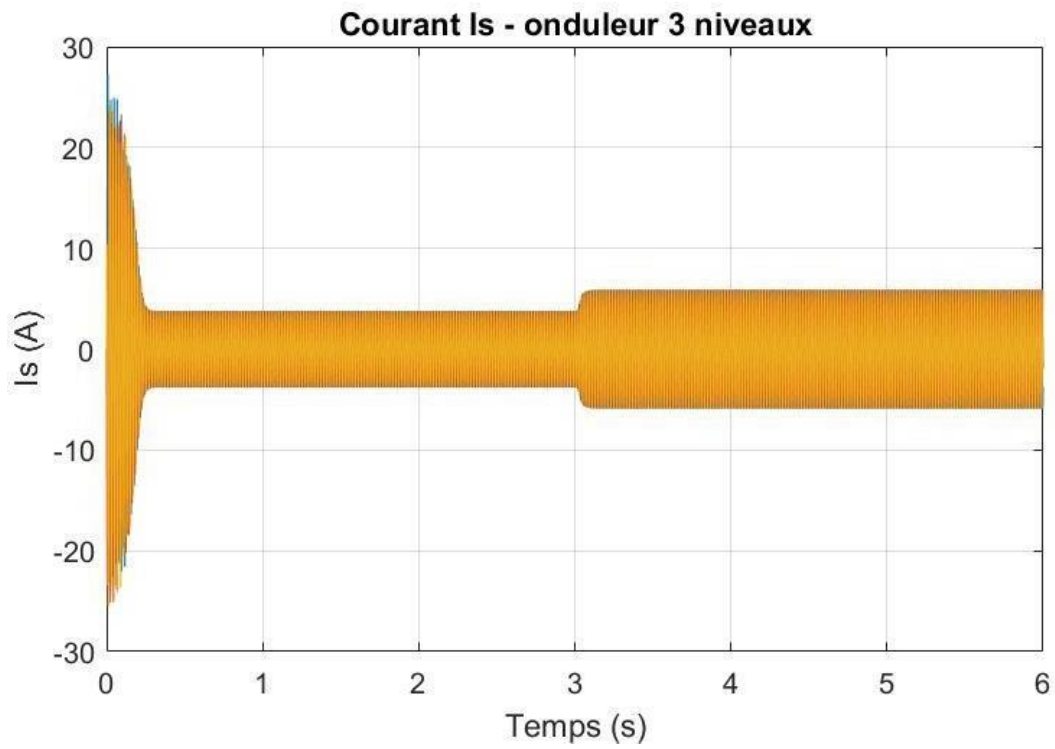
#### IV .3.5. La Vitesse Mécanique

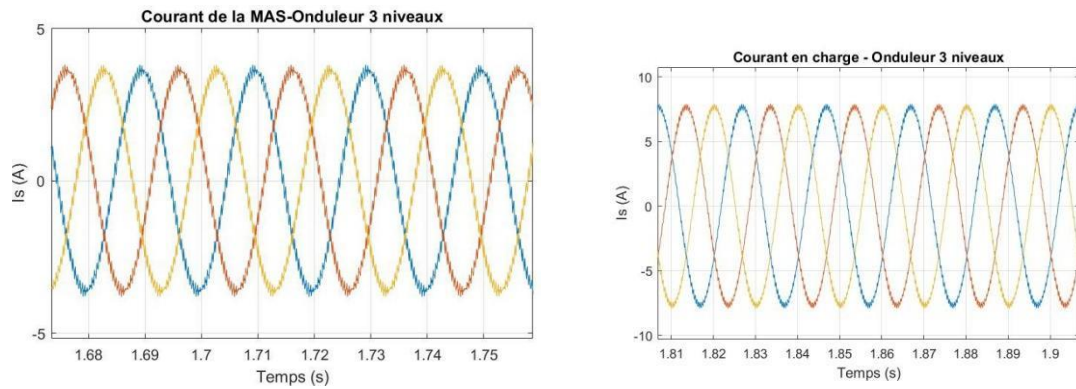


**Figure IV.15 :** La Vitesse mécanique d'un onduleur à 3 niveaux.

Au démarrage et pendant le régime transitoire la vitesse est presque linéaire puis elle atteint sa valeur nominale à vide de 157 rad /s. lorsque la MAS fonctionne en charge, on remarque qu'il y a une diminution de cette valeur  $\Omega = 153$  rad/s.

IV.3.6. Le courant  $I_s$





**Figure IV.16 :** Le Courant de la MAS d'un onduleur à 3 niveaux.

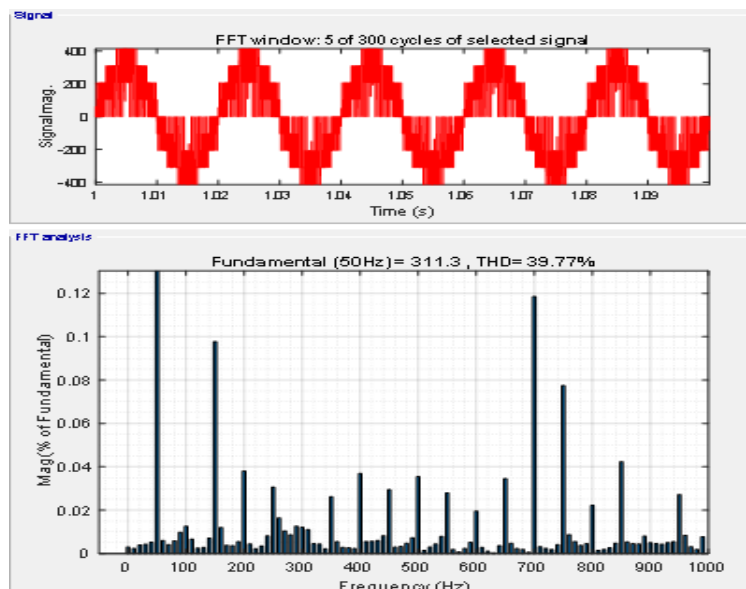
Les trois courants forment un système triphasé équilibré et elles sont décalées entre elles d'un tiers ( $1/3$ ) de période. - Le temps de réponse du moteur est caractérisé par une période de 0.3s.

**En régime transitoire**, le courant atteint des valeurs très élevées environs de 25A.

**En régime permanent**, pour  $m = 35$ , la forme du courant statorique à une forme sinusoïdale, elle est moins riche en harmoniques. Les valeurs montrent une stabilité en marche à vide ( $I=4A$ ), ensuite un courant en charge ( $I=8A$ )

#### IV.3.7. THD tension pour onduleur 3 niveaux

**La fondamentale 50(Hz), (THD = 39.77%)**



**Figure IV.17:**Le spectre d'harmonique de Tension d'un onduleur à 3 niveaux.

## Analyse du THD de Tension à 39.77% avec Onduleur 3 Niveaux

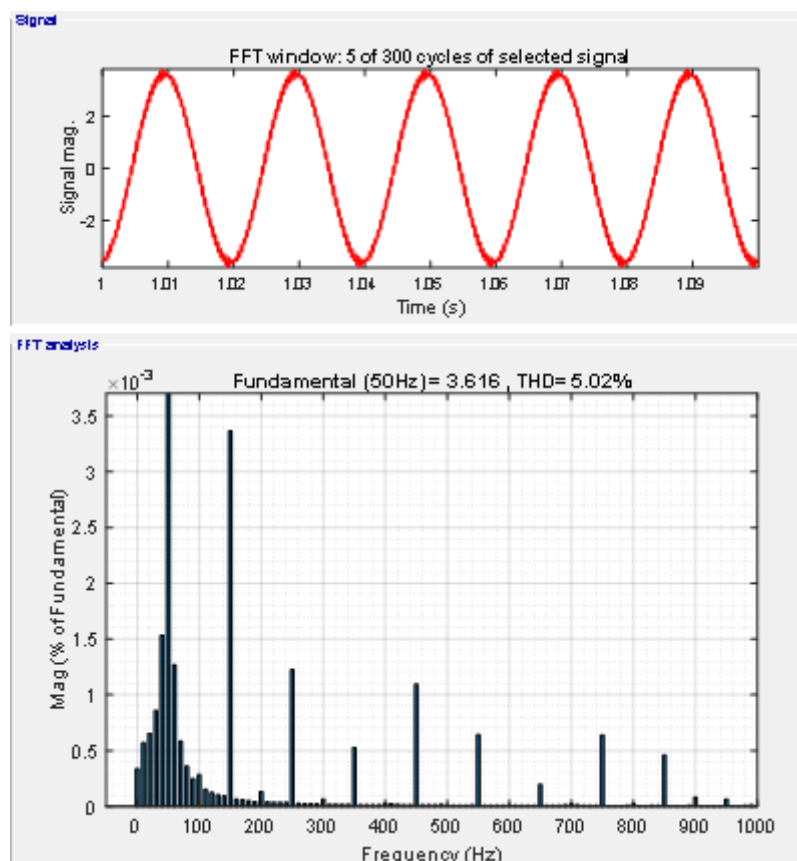
### Valeur Mesurée (39.77%):

- Au-dessus des attentes pour un onduleur 3 niveaux (15-25% typique).
- Comparaison avec 2 niveaux : Réduction de 40% (vs 66.48%), mais reste non optimale.

### Causes Probables :

- Stratégie de modulation non optimisée (MLI classique au lieu de SVM).
- Absence de filtre de sortie.

### IV.3.8. THD courant pour onduleur 3 niveaux (THD = 5.02%)



**Figure IV.18** :Le spectre d'harmonique de le Courant d'un onduleur à 3 niveaux.

### THD du Courant (5.02%) - Excellente Performance

- **Norme industrielle:** <5% (IEEE-519) , **Objectif atteint** avec 3 niveaux.
- Signal : Très proche d'une sinusoïde parfaite.
- Spectre : Fondamentale à 50 Hz très dominante, harmoniques faibles.

- THD : Faible (5.02%), indiquant une excellente qualité de signal typique d'un onduleur bien filtré ou en fonctionnement à vide

#### IV.3.9. Comparaison des résultats de simulation

##### Analyse des Performances Techniques

Paramètre	Onduleur 2 Niveaux	Onduleur 3 Niveaux	Amélioration
<b>THD Tension</b>	66.48%	39.77%	Réduction de 40%
<b>THD Courant</b>	17.11%	5.02%	Réduction de 70%
<b>Oscillations de Couple</b>	Importantes ( $\pm 15\%$ )	Réduites à $\pm 5\%$	Dynamique améliorée
<b>Vitesse Mécanique</b>	Temps de réponse lent	Réponse rapide et stable	Précision accrue
<b>Forme d'Onde Tension</b>	Créneaux abrupts (2 niveaux)	3 niveaux lisses	Réduction du bruit

- Le temps de réponse du moteur est plus rapide pour l'onduleur de 3 niveaux.
- En régime transitoire, le courant consommé par le moteur associé à l'onduleur de 3 niveaux est supérieur à celui de 2 niveaux.
- La forme du courant statorique est meilleure dans l'association de 3 niveaux.
- En régime transitoire, le couple électromagnétique atteint une valeur plus importante dans la MAS associée à l'onduleur de 3 niveaux.
- La caractéristique mécanique du moteur est meilleure dans le cas de 3 niveaux, elle représente une grande stabilité pour le moteur.
- On marche à vide, on remarque l'évolution de la vitesse de rotation dans les premiers instants de démarrage, avec un accroissement presque linéaire au régime permanent. La vitesse s'établit à une valeur proche de la vitesse de synchronisme, mais à la mise en charge la vitesse  $\Omega$  diminue puisqu'elle est proportionnelle au couple.
- Pour l'onduleur de tension à 3 niveaux, on remarque que le THD du spectre harmonique de la tension simple de phase Van a diminué par rapport à celui de l'onduleur à 2 niveaux. La même chose pour l'allure de courant et son spectre harmonique.

Donc la qualité spectrale de l'onde de tension et du courant à la sortie d'un onduleur de tension à 3 niveaux commandé par la MLI sinusoïdal est plus mieux que celle d'un onduleur de tension à 2 niveaux commandé MLI sinusoïdal.

### **Conclusion**

Nous avons présenté à travers ce chapitre, la modélisation et la simulation d'un moteur asynchrone associée à l'onduleur de tension à deux niveaux et à trois niveaux par le logiciel MATLAB/SIMULINK.

Ce chapitre a présenté une analyse approfondie des performances d'un système machine asynchrone alimentée par des onduleurs 2 et 3 niveaux, en mettant en évidence les avantages, limites, et améliorations apportées par chaque technologie. Les résultats expérimentaux et simulations ont permis de tirer en conclusions que la qualité de l'onde de tension à la sortie d'un trois niveaux est la meilleure par rapport d'un onduleur deux niveaux

# Conclusion générale

---

Ce mémoire a permis d'explorer en profondeur l'association entre une machine asynchrone triphasée et des onduleurs de tension à deux et trois niveaux. L'objectif principal était d'évaluer l'impact des architectures d'onduleurs sur les performances dynamiques et énergétiques de la machine.

Après avoir modélisé mathématiquement la machine à l'aide de la transformation de Park, nous avons mis en œuvre des techniques de commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) adaptées aux deux types d'onduleurs. Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink ont permis de comparer les tensions de sortie, les courants statoriques, les couples électromagnétiques, les flux et les vitesses, ainsi que les taux de distorsion harmonique (THD).

Les résultats ont montré que l'onduleur à trois niveaux permet une réduction significative du THD par rapport à l'onduleur à deux niveaux, ce qui se traduit par une amélioration notable de la qualité de l'alimentation et donc du comportement de la machine. Cependant, cette amélioration s'accompagne d'une complexité accrue dans la structure de l'onduleur et dans sa commande.

En conclusion, l'utilisation d'onduleurs multi-niveaux, bien que plus exigeante sur le plan technologique, constitue une solution efficace pour optimiser les performances des systèmes d'entraînement électrique modernes. Cette étude ouvre la voie à de futures recherches orientées vers des stratégies de commande avancées, comme la modulation vectorielle (SVM) ou la commande directe du couple (DTC), visant à renforcer encore davantage l'efficacité et la robustesse de l'ensemble convertisseur-machine.

---

**Paramètres de la machine :**

P	2
$R_s$	4.85
$R_r$	3.81
$L_s$	0.274
$L_r$	0.274
$L_m$	0.258
J	0.031
fr	0.0114
$T_r$	$L_r / R_r$
$T_s$	$L_s / R_s$
sig	$1 - (L_m^2 / (L_s * L_r))$
Y	$((R_s / \text{sig}) * (1 / L_s)) + (L_m^2 / \text{sig}) * (L_s * L_r^2)$
K	$L_m / (\text{sig} * L_s * L_r)$
m	35
f	50

## Références bibliographiques

- [1] KERROUM Badreddine theme Etude et Diagnostic de mauvais branchement d'un moteur à induction du diplôme de : MASTER UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA Année : 2017
- [2] Zergoune Mohamed Abdelaziz Hideb Abdelrahmane thème Commande d'onduleur multiniveaux à structure en cascade par stratégie d'élimination d'harmonique sélective Diplôme de MASTER ACADEMIQUEUNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA Promotion :2016/2017
- [3] Melle Hanane HADDAD Etude des Performances de la Machine Asynchrone Alimentée par un Onduleur Multiniveaux Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Professionnel en Electrotechnique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Thème Promotion 2012/2013
- [4] Bouchareb Khaled & Chelghoum Abdelmouiz THEME Etude, modélisation et simulation d'une Machine asynchrone Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de master en génie mécanique Université KASDI Merbah Ouargla 20 / 09 / 2020
- [5] <https://fr.scribd.com/document/479417591/338974416-Chapitre-1-Generalite-Sur-Les-Machines-Asynchrones-docx> [05/03/2025]
- [6] Les-Machines-Asynchrones-docx [05/03/2025]
- [7] Jean-Paul Louis, Modélisation des machines électriques en vue de leur commande, LAVOISIER, 2004 LAVOISIER 11, rue Lavoisier 75008 Paris
- [8] Site internet, WWW.MELEEC.ORG, extraie Mars 2018
- [9] Alain Charbonne, « Le moteur asynchrone triphase », Site internet « <https://sti.discip.accaen.fr> » avril2018[13/03/2025]
- [10] <https://www.etudier.com/dissertations/Moteur-Synchrone-Et-Asynchrone/599080.html>[30/03/2025]
- [11] Metatla Rachid ,Machine a courants alternatif, INSTITUT ALGERIEN DU PETROLE MACHINES A COURANT ALTERNATIF Entreprise Nationale Sonatrach, Institut Algérien du Pétrole, IAP. Avenue du 1er novembre, Boumerdès 35000, Algérie. Ecole de Skikda les Platanes Filfila,21101.

- [12] BELAIDI MEHDI et CHAKER YACINE du diplôme de LICENCE La modelisatoin de la machine asynchrone en vue de sa commande Université Badji Mokhtar - Annaba - Algérie
- [13] Hakima Cherif, « détection des défauts statorique et rotorique dans la machine asynchrone en utilisant l'analyse par FFT et ondelettes » mémoire de magister, Université mohamed khider biskra, 2014
- [14] Rabah BELHADEF Bilal BOUTAYA Ecole Nationale Polytechnique thème Commande Vectorielle et par Logique Floue de la Machine Asynchrone Sans Capteur Année 2008
- [15] ACHOURI Radouane HIDOUCHE Mohamed Thème Commande Vectorielle de la Machine Asynchrone o Simulation sur le logiciel SIMPLORER Validation expérimentale sur banc d'essai Projet de Fin d'Etudes Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur d'Etat En Electrotechnique Ecole Nationale Polytechnique Juin 2007
- [16] Mr BENAOUICHA Mounir et Mr GUERROUT Youcef, “Réalisation d'un onduleur de tension commande par la carte Dspace 1104”, mémoire d'ingénieur .Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2014/2015.
- [17] Benadel Hani Choudira MESSAOUD, technique de commande d'un onduleur triphasé, projet de fin d'étude licence génie électrique
- [18] BOUKAROURA Abdelkader, “Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph”, Mèmoire Présenté pour l'obtention du Diplome de Magister en electrotechniques, Option :Réseaux electriques, universite ferhat abbas de setif ,2009.
- [19] M. Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension - Automatisation des systèmes de puissance électriques », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, Discipline : Génie électrique, Septembre 2002.
- [20] Philippe MISSIRLIU lycée Newton-ENREA Clichy[03/04/2025]
- [21]
- [22] AMEUR Khaled. Contribution to the Study of a Standalone Photovoltaic System with a New Tracking Control of the Global MPP. University Amar Telidji of Laghouat, "April 2018".
- [23] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternaif (volume 4). Edition tec & doc, 1995
- [24] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999)

- [25] M. Baldés, "Etude d'un compensateur statique pour éoliennes à vitesse fixe à base de génératrice asynchrone à cage," Mémoire de Maitrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2010.
- [26] D. P. Duggapu and S. Nulakajodu, "Comparison between Diode Clamped and H-Bridge Multilevel Inverter (5 to 15 odd levels)," VSRD International Journal of Electrical, Electronics & Communication Engineering, Vol. 2, pp. 228-256, no. 5, 2012.
- [27] Darshan Prajapati, Vineetha Ravindran, Jil Sutaria, Pratik Patel, "A Comparative Study of Three Phase 2-Level VSI with 3- Level and 5-Level Diode Clamped Multilevel Inverter," International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 4, no. 4, pp. 708-713, 2014.
- [28] ZEROUAL Yamina «Techniques de commande des convertisseurs appliquées aux onduleurs multi niveaux», Mémoire Présentée vue d'obtention du diplôme de MASTER, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2016.
- [29] SLAVEN Kincic « Onduleur à niveau multiple et son application en compensation de la puissance réactive » Maîtrise en génie électrique, École de technologie supérieure université du Québec. 2000.
- [30] SLIMANI Amel «Techniques de commande des convertisseurs appliquées aux onduleurs multi\_niveaux», Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de MASTER, Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent, 2019.
- [31] [https://elearning.univ\\_eloued.dz/pluginfile.php/34596/mod\\_resource/content/1/Electronique%20de%20puissance%20avanc%C3%A9e-1-2-47-1.pdf](https://elearning.univ_eloued.dz/pluginfile.php/34596/mod_resource/content/1/Electronique%20de%20puissance%20avanc%C3%A9e-1-2-47-1.pdf)[14/04/2025]
- [32] LAOUAR Lokmen theme Structure et commande d'une installation photovoltaïque du Diplôme de Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA 2019/2020
- [33] : TOGOLA Kadiatou ,ABBANE Mahdi « ETUDE D'UN CONVERTISSEUR ALTERNATIFCONTINU A ABSORPTION SINUSOÏDALE UTILISANT UN ONDULEUR A RESONANCE », Mémoire MASTER, UNIVERSITE DE MOULOUD MAMMERI
- [34] BENNACEUR YACINE , « Commande d'un convertisseur CA/CC et contrôle par différentes techniques », Mémoire MASTER, UNIVERSITE D'EL-OUED 2015 MASTER 25/05/2016
- [35] guy grelllet guy cleric « Actionneurs électriques » Edition eyrolles 1997.
- [36] Ahmet M.Hava Russel j kerkman, thomas A.lipo Carrier-based PWM-VSI overmodulation strategies : Analysis, and design IEEE transactions on power electronics vol .13, NO, 4 July 1998

- [37] <https://www.socomec.fr/fr/definition-et-usages-dun-onduleur> [20/04/2025]
- [38] : OBEIDI Nabil ET BOUGUETTAYA Tarak ,« Commande d'un Moteur à Courant Continu Alimenté par un Hacheur avec la Carte Arduino », Mémoire
- [39] Jacque Laroche, « Electronique de puissance convertisseurs » Edition Dunod.2005
- [40] D. P. Duggapu and S. Nulakajodu, “Comparison between Diode Clamped and H-Bridge Multilevel Inverter (5 to 15 odd levels),” VSRD International Journal of Electrical, Electronics & Communication Engineering, Vol. 2, pp. 228-256, no. 5, 2012.
- [41] Darshan Prajapati, Vineetha Ravindran, Jil Sutaria, Pratik Patel, “A Comparative Study of Three Phase 2-Level VSI with 3- Level and 5-Level Diode Clamped Multilevel Inverter,” International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 4, no. 4,pp. 708-713, 2014.
- [42] AIT SAID Abdelkarim, Etude comparative par simulation et implantation en temps réel des techniques de commande de l'onduleur de tension, Thèse de Master, 2016, Université Badji-Mokhtar Annaba.
- [43] S. Guy, B. Robert, Labrique Francis, Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternaif (volume 4). Edition tec & doc, 1995
- [44] T. Wildi : Electrotechnique, 3eme édition, éditions de Boeck université (1999)
- [45] OMEIRI A Thème Commande directe du couple (DTC) d'un moteur asynchrone à cage MEMOIRE DE MASTER ANNABA- MOKHTAR BADJI U Juin2018
- [46] [https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bezziane\\_ali/files/tp\\_ndeg3-\\_association\\_onduleur\\_-\\_machine\\_a\\_courant\\_alternatif.pdf?m=1589319296](https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bezziane_ali/files/tp_ndeg3-_association_onduleur_-_machine_a_courant_alternatif.pdf?m=1589319296)[27/04/2025]
- [47] [https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bezziane\\_ali/files/tp\\_ndeg3-\\_association\\_onduleur\\_-\\_machine\\_a\\_courant\\_alternatif.pdf?m=1589319296](https://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/bezziane_ali/files/tp_ndeg3-_association_onduleur_-_machine_a_courant_alternatif.pdf?m=1589319296)[27/04/2025]
- [48] AYACHIZAKARIA DJOTNI KARIM ETUDE ET SIMULATION D'UN ONDULEUR DE TENSION TRIPHASEPROJET FIN D'ETUDE LICENCE Université BADJI MOKHTAR Annaba Année Universitaire : 2020/2021
- [49] <https://mtecorp.com/fr/blog/2018/04/13/what-is-ieee-519/> [13/05/2025]
- [50] wikipedia