

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la**  
**Recherche Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**



**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

**Thème**

Modélisation et simulation de l'association  
onduleur multi niveaux-machine asynchrone

Devant le jury composé de :

Menaceur Noureddine  
Djokhrab Allaeddine  
Mezine Asia  
Guia Houssam  
Youcef guerfi

Président  
Examinateur  
Examinateur  
Examinateur  
Encadreur

Présenté par :

- Belkacemi Belkacem  
- Mim Zakaria  
- Ouada Laiche

**2020-2021**

# Remerciement

*Nous remercions tout d'abord, **ALLAH** qui nous a donné la force et le courage afin de parvenir à élaborer ce modeste travail.*

*En tout premier lieu, nous remercions vivement notre encadreur monsieur **Youcef Guerfi**, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, son soutien moral et scientifique nous a permis de mener à terme ce travail.*

*Nous souhaitons également remercier toute l'équipe pédagogique du département **Electromécanique**.*

*Nos vifs remerciements vont aussi à nos enseignants qui ont fait de leurs mieux pour nous donner une formation universitaire solide qui nous a permis de préparer ce modeste mémoire, qui nous sera très utile pour notre avenir professionnel. Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre mémoire en acceptant d'examiner notre travail.*

*Nous voudrions remercier nos familles qui nos encouragées dans la poursuite de notre travail de mémoire.*

*Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



*Dédicace*

*A nos chers parents avec toute notre  
gratitude et notre amour*

*Pour toutes ces années de sacrifice et  
d'encouragement.*

*À nos frères et sœurs et à toutes nos  
familles.*

*A tous les amis...*

*Pour tous ceux que j'aime.*

# Sommaire

## Sommaire

|   |           |
|---|-----------|
| Introduction générale.....  | 2         |
| <b>Chapitre I État De L'art du Système</b>  |           |
| <b>I.1.Introduction.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>I.2.Généralités sur la machine asynchrone .....</b>                                | <b>5</b>  |
| <b>I.2.1.Définition de la machine asynchrone .....</b>                                | <b>5</b>  |
| <b>I.2.2.Constitution de la machine asynchrone .....</b>                              | <b>6</b>  |
| <b>I.2.2.1 Le stator .....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>I.2.2.2 Le rotor .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>I.2.2.3 L'entrefer .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>I.2.2.4 Les organes mécaniques .....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>I.2.3 : Principe de fonctionnement des machines à courant alternatif :.....</b>    | <b>8</b>  |
| <b>I.2.4. Couplage des enroulements.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>I.2.4.1. Définitions.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>I.2.4.2. Types des couplages :.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>I.2.4.3. Couplage des moteurs asynchrones triphasés .....</b>                      | <b>11</b> |
| <b>I.2.5.Avantages et inconvénients des la machine asynchrone.....</b>                | <b>12</b> |
| <b>I.2.6 Système d'alimentation.....</b>  | <b>12</b> |
| <b>I.2.7 les semi-conducteurs des puissance .....</b>                                 | <b>13</b> |
| <b>I.3. Généralités sur L'onduleur de tension.....</b>                                | <b>14</b> |
| <b>I.3.1. Définitions des onduleurs .....</b>   | <b>14</b> |
| <b>I.3.2. Principe générale de fonctionnement .....</b>                               | <b>15</b> |
| <b>I.3.3. Différents types des structures des convertisseurs multi – Niveaux.....</b> | <b>16</b> |
| <b>I.3.3.1 Intérêt des onduleurs multi-niveaux .....</b>                              | <b>16</b> |
| <b>I.3.4. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....</b>             | <b>17</b> |
| <b>I.3.4.1 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage .....</b>                       | <b>17</b> |
| <b>I.3.4.2 Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants.....</b>                  | <b>19</b> |
| <b>I.3.4.3 Onduleurs multi niveaux en cascade.....</b>                                | <b>21</b> |

|   |    |
|---|----|
| <b>I.3.4.4 Autres topologies</b> .....  | 22 |
| <b>I.3.5. Classification des topologies selon leur alimentation</b> .....     | 23 |
| <b>I.3.6. Nombres de composants nécessaires</b> .....                         | 23 |
| <b>I.3.7. Domaines d'application des convertisseurs multi-niveaux :</b> ..... | 25 |
| <b>I.3.8. Avantages et inconvénients des onduleurs multi-niveaux :</b> .....  | 26 |
| <b>I-4-Conclusion :</b> .....   | 26 |

## Chapitre II Modélisation du Système

|   |    |
|---|----|
| <b>II-1 Introduction :</b> .....  | 28 |
| <b>II.2 Modélisation de la machine asynchrone</b> .....   | 28 |
| <b>II.2.1 Hypothèses simplificatrices</b> .....   | 29 |
| <b>II.2.2 Equation générale de la machine asynchrone</b> .....  | 29 |
| <b>II.2.3 Equations magnétiques</b> .....   | 32 |
| <b>II.2.4. Modélisation de la machine asynchrone par la représentation d'état</b> .....                           | 34 |
| <b>II.2.4.1 Le système d'équation d'état</b> .....  | 34 |
| <b>II.2.4.2 Modèle d'état de la machine asynchrone alimentée en tension</b> .....                                 | 35 |
| <b>II.2.4.3 Forme d'état du modèle de la machine asynchrone dans le repère (d, q) lié au champ tournant</b> ..... | 36 |
| <b>II.3. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux</b> .....   | 36 |
| <b>II.3.1. Modèle de fonctionnement d'un bras de l'onduleur</b> .....   | 36 |
| <b>II.3.2. Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur</b> .....                                | 36 |
| <b>II.3.3. modèle de commande de l'onduleur</b> .....   | 39 |
| <b>II.3.3.1. fonction de connexion</b> .....  | 39 |
| <b>II.3.3.2. relation entre les fonctions de connexion</b> .....  | 40 |
| <b>II.3.3.3. fonction de connexion des demi – bras</b> .....  | 40 |
| <b>II.3.3.4. table d'excitation des interrupteurs</b> .....   | 41 |
| <b>II.3.4. modèle de connaissance de l'onduleur</b> .....   | 41 |
| <b>II.3.4.1. les fonctions de conversion [27]</b> .....   | 41 |
| <b>II.3.4.2. matrice de conversion simple [N(t)]</b> .....  | 43 |

|   |    |
|---|----|
| II.3.4.3. matrice de conversion composée [M(t)].....                                  | 44 |
| II.3.5. Stratégie de commande de l'onduleur a trois niveaux .....                     | 45 |
| II.3.5.1. les différentes stratégies de commande de l'onduleur.....                   | 45 |
| II.3.5.1.1. Commande classique à pleine onde [28] [27] .....                          | 45 |
| II.3.5.1.2. Commande à modulation de largeurs d'impulsions (MLI sinusoïdale) [27] ... | 45 |
| II.3.5.2. commande à MLI à deux porteuses en dent de scie unipolaires .....           | 46 |
| II.3.5.2.1. définition des ondes porteuses .....                                      | 46 |
| II.3.5.2.2. algorithme de commande.....   | 47 |
| II.4 Conclusion.....  | 47 |

### Chapitre III Simulation et Interprétation des Résultats

|  |    |
|--|----|
| III-1 Introduction .....   | 49 |
| III.2. Présentation de l'environnement <i>MATLAB/SIMULINK™</i> : .....               | 49 |
| III.2.1. Matlab:.....  | 49 |
| III.2.2. Simulink :.....   | 50 |
| III.3. Simulation et interprétation des résultats: .....                             | 51 |
| III.3.1. Les blocs de la simulation: .....   | 52 |
| III.3.3. Résultats de la simulation en charge à t=1 s: .....                         | 56 |
| III.3.4. Résultats de la simulation des tensions d'alimentation de la machine: ..... | 57 |
| III.3.5. Discussion: .....   | 58 |
| III.4. Conclusion:.....  | 58 |

### Conclusion générale

|                          |    |
|--------------------------|----|
| Conclusion générale..... | 61 |
|--------------------------|----|

### Annexe

|             |    |
|-------------|----|
| Annexe..... | 64 |
|-------------|----|

### Références

|                   |    |
|-------------------|----|
| Références: ..... | 66 |
|-------------------|----|

# **Listes des Symboles et des Acronymes**

## Listes des Symboles et des Acronymes

|                           |  |
|---------------------------|--|
| MSAP                      | Moteur synchrone à aimant permanent                    |
| DTC                       | La commande directe du couple                          |
| MLI                       | Modulation de largeur d'impulsion                      |
| $P_m$                     | puissance maximale                                     |
| $K_i$ $K_p$               | Coefficient proportionnel- intégral                    |
| $\tau$                    | Constante du temps électrique                          |
| $e_d$ $e_q$               | Composantes de la force électromotrice de compensation |
| PI                        | Régulateur Proportionnel Intégrateur                   |
| S                         | Opérateur de Laplace                                   |
| $J_p$                     | Polarisation magnétique permanente                     |
| B                         | Induction magnétique                                   |
| H                         | Le champ magnétique                                    |
| $\mu_0$                   | Perméabilité du vide                                   |
| $\mu_r$                   | Perméabilité relative de l'aimant                      |
| A, B, C                   | Axes liés aux enroulements triphasés                   |
| d, q                      | Axes de référentiel de Park                            |
| $\alpha$ $\beta$          | Axes de référentiel statorique                         |
| $\theta$                  | Angle entre le stator et le rotor                      |
| $V_a, V_b, V_c$           | Tension statorique phase a, b, ou c                    |
| $V_s$                     | Tension statorique                                     |
| $V_d, V_q$                | Tension statorique sur l'axe d et l'axe q              |
| $V_\alpha, V_\beta$       | Tension statorique sur l'axe $\alpha, \beta$           |
| $I_a$ $I_b$ $I_c$         | Courant statorique phase a, b, ou c                    |
| $I_a^*$ $I_b^*$ $I_c^*$   | Les courants de phases de référence                    |
| $I_s$                     | Courant statorique                                     |
| $I_d$ $I_q$               | Courant statorique sur l'axe d et l'axe q              |
| $I_{dref}$ $I_{qref}$     | Courant de référence sur l'axe d et l'axe q            |
| $I_\alpha$ $I_\beta$      | Courant statorique sur l'axe $\alpha, \beta$           |
| $\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c$  | Flux statorique phase a, b, ou c                       |
| $\Phi_d, \Phi_q$          | Flux statorique sur l'axe d et l'axe q                 |
| $\Phi_\alpha, \Phi_\beta$ | Flux statorique sur l'axe $\alpha, \beta$              |
| $\Phi_s$                  | Flux statorique  |
| $\Phi_r$                  | Flux magnétique du rotor                               |

|                              |  |
|------------------------------|--|
| $L_f$                        | Inductance de la bobine d'excitation                               |
| $L_s$                        | Inductance cyclique propre statorique                              |
| $[L_{ss}]$                   | Matrice d'inductances statorique                                   |
| $[M_{sf}]$                   | Matrice des inductances mutuelles du couplage stator/ rotor        |
| $[P(\theta)]$                | Matrice de transformation de Park                                  |
| $[V_{an}, V_{bn}, V_{cn}]^T$ | Tension de sortie de l'onduleur                                    |
| $S_i (i=1, 2,3)$             | Grandeurs booléennes de commende (des interrupteurs de l'onduleur) |
| $U_c$                        | Tension continue   |
| $W$                          | Vitesse mécanique de rotor   |
| $W_{ref}$                    | Vitesse de reference   |
| $\omega_s$                   | Pulsation de fréquence statorique                                  |
| $\omega$                     | Pulsation de fréquence rotorique                                   |
| $C_e$                        | Couple électromagnétique délivré par le moteur                     |
| $C_r$                        | Couple résistant   |
| $C_f$                        | Couple de frottement   |
| $R_s$                        | La résistance statorique   |
| $L_d$                        | L'inductance sur l'axe d   |
| $L_q$                        | L'inductance sur l'axe q   |
| $P$                          | Nombre de paires de pôles  |
| $J$                          | Moment d'inertie du moteur   |
| $f$                          | Coefficient de frottement visqueux                                 |
| $C_{cpl}$                    | L'amplitude du comparateur du couple..                             |
| $B_r$                        | L'induction rémanente  |
| $C_e$                        | Le couple estimé   |
| $[(C^*)]_e$                  | Couple de référence.   |
| $U_c$                        | Tension d'entrée de l'onduleur                                     |
| $\Omega$                     | Vitesse mécanique  |
| MCC                          | Machine à courant continu.   |
| MAS                          | Machine Asynchrone.  |
| MSAP                         | Machine Synchronne à Aimants Permanents.                           |
| FOC                          | Field Oriented Control.  |
| DTC                          | Direct Torque Control (Commande Directe du Couple).                |
| GTO                          | GateTurn Off.  |
| MLI                          | Modulation de largeur d'impulsion.                                 |
| PI                           | Proportionnel Intégral.  |

# Liste des figures et des tableaux

## Liste des figures et des tableaux

### Liste des figures:

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure (I.1)</b> : schéma présente constitution de la machine asynchrone [3].   | 6  |
| <b>Figure(I.2)</b> : l'enroulement du stator   | 7  |
| <b>Figure (I.3)</b> : Vue d'un rotor à cage.   | 7  |
| <b>Figure (I.4)</b> : Vue d'un rotor bobiné Figure I.3 : Vue d'un rotor à cage.  | 7  |
| <b>Figure(I.5)</b> : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone.   | 8  |
| <b>Figure (I.6)</b> représentation vectorielle   | 9  |
| <b>Figure (I.7)</b> Types du couplage  | 12 |
| <b>Figure (I.8)</b> Schéma global de l'alimentation de la MAS  | 13 |
| <b>Figure( I.9)</b> Représentation de puissance des composants en fonction de fréquence de commutation   | 14 |
| <b>Figure(I.10)</b> Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie.  | 15 |
| <b>Figure(I.11)</b> Symbole et signal d'un onduleur  | 15 |
| <b>Figure(I.12)</b> Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1 <sup>er</sup> demi-cycle  | 16 |
| <b>Figure( I.13)</b> Signal complet de l'onduleur.   | 16 |
| <b>Figure( I.14)</b> Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux  | 17 |
| <b>Figure (I.15)</b> Topologies des onduleurs NPC.   | 18 |
| <b>Figure( I.16)</b> Topologies des onduleurs NPC à condensateur Flottant  | 20 |
| <b>Figure (I.17)</b> Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade.  | 21 |
| <b>Figure (II.1)</b> : Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée et biphasée équivalente issue de la transformation de Park | 31 |
| <b>Figure (II.2)</b> : Disposition des enroulements suivant les axes d, q.   | 33 |
| <b>Figure (II.3)</b> Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur   | 38 |
| <b>Figure (II.4)</b> Schéma de principe de la technique triangulo – sinusoïdale.   | 46 |

|  |    |
|--|----|
| <b>La figure (III.1)</b> Schéma bloc de la MAS alimentée par un onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type NPC .....       | 52 |
| <b>Figure (III.2)</b> : Schéma de simulation de la MLI sinusoïdale à deux porteuses.....   | 53 |
| <b>Figure (III.3)</b> : Schéma de la simulation de l'onduleur de tension multi-niveaux de type NPC (trois niveaux).....              | 53 |
| <b>La figure (III.4)</b> Schéma de simulation de la Machine Asynchrone .....   | 54 |
| <b>La figure (III.5)</b> La réponse de la MAS à vide alimentée par un onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type NPC ..... | 55 |
| <b>La figure (III.6)</b> La réponse de la MAS en charge à $t=1$ s .....  | 57 |
| <b>La figure (III.7)</b> Les tensions d'alimentation de la machine.....  | 57 |
| <b><u>Liste des tableaux:</u></b>  |    |
| <b>Tableau I.1</b> .....   | 10 |
| <b>Tableau I.2</b> : Avantages et inconvénient de la machine asynchrone.....   | 12 |
| <b>Tableau I.3</b> Nombres de composants nécessaires pour la topologie à trois niveaux.....  | 24 |
| <b>Tableau I.4</b> Nombres de composants nécessaires pour la topologie à cinq niveaux.....   | 24 |
| <b>Tableau I.5</b> Nombres de composants nécessaires pour la topologie à sept niveaux.....   | 24 |
| <b>Tableau I.6</b> Nombres de composants nécessaires pour la topologie à neuf niveaux.....   | 24 |
| <b>Tableau I.7</b> Nombres de composants nécessaires pour la topologie à n niveaux.....  | 25 |
| <b>Tableau II.1</b> Tableau récapitulatif relatif au bras no 1.....  | 39 |
| <b>Tableau II.2</b> Tableau des excitations relatif au bras (i).....   | 41 |

## **Résumé :**

**Titre du mémoire :** Modélisation et simulation de l'association onduleur multi niveaux-machine asynchrone  
**Master :** Electromécanique.

**Auteur :** Ouada laiche ,belkacemi belkacem , mim zakaria

**Mots clés :** *Machine asynchrone, onduleur multi-niveaux, Modélisation, MLI, MATLAB /SIMULINK, NPC.*

**Résumé :** le travail effectué porte sur une étude par modélisation et simulation de la machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension multi-niveaux de type NPC, pour l'amélioration de la qualité du signal électrique et la minimisation des harmoniques. Autrement dit que cet travail c'est une phase inévitable pour le développement électronique des techniques intelligentes, on a atteint les objectifs fixés et nous avons validé les résultats de simulation dans l'environnement *MATLAB/SIMULINK*, et tous les résultats sont effectués et interprétés.

## **Abstract :**

**Report title:** Modeling and simulation of the association of inverter multi level- asynchronous machine

**Master:** Electromechanics.

**Author :** Ouada laiche ,belkacemi belkacem , mim zakaria

**Keywords:** Asynchronous machine, multi-level inverter, Modeling, MLI, MATLAB / SIMULINK, NPC.

**Abstract:** The work carried out relates to a study by modeling and simulation of the asynchronous machine supplied by a multi-level voltage inverter of the NPC type, for the improvement of the quality of the electrical signal and the minimization of harmonics. In other words, this work is an inevitable phase for the electronic development of intelligent techniques, we have achieved the set objectives and we have validated the simulation results in the *MATLAB / SIMULINK* environment, and all the results are carried out and interpreted.

## **ملخص**

**عنوان المذكرة:** النمذجة والمحاكاة للارتباط بين موج توتر متعدد المستويات و الآلة اللاتزامنية .

**ماستر:** كهروميكانيك .

**المؤلفون:** واده العائش , بالقاسمي بالقاسم, ميم زكرياء .

**كلمات مفتاحية:** آلة لاتزامنية, موج توتر متعدد المستويات, نمذجة, MLI, محاكاة/ماتلاب, NPC .

**الملخص** يتعلق العمل المنجز بدراسة عن طريق نمذجة ومحاكاة الآلة غير المتزامنة المزودة بواسطة موج توتر متعدد المستويات من نوع NPC ، لتحسين جودة الإشارة الكهربائية وتقليل التوافقيات. بمعنى آخر ، هذا العمل هو مرحلة حتمية للتطوير الإلكتروني للتقنيات الذكية ، لقد حققنا الأهداف المحددة وقمنا بالتحقق من صحة النتائج بالمحاكاة في بيئة *MATLAB / SIMULINK* ، وتم تسجيل جميع النتائج وتفسيرها .

# **Introduction générale**

## Introduction générale:

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

L'alimentation de ce moteur par un convertisseur de fréquence et les circuits de réglage et de commande sont plus compliqués que ceux du moteur à courant continu. Pour ce type d'applications, le transfert d'énergie électrique entre la source et la machine asynchrone s'opère à travers un convertisseur de puissance tel que l'onduleur. Pour un fonctionnement optimal de la machine asynchrone, les performances requises de ces convertisseurs statiques sont de plus en plus élevées : tant de point de vue de la puissance délivrée que de la qualité de la tension générée.

Néanmoins, l'alimentation en créneaux par l'onduleur à deux niveaux utilisé présente des inconvénients tels que : la limitation en puissance et le taux d'harmoniques élevé, qui limite considérablement le développement du domaine des entraînements alternatifs.

L'étude des machines asynchrones alimentées par des convertisseurs statiques constitue un vaste thème de recherche dans les laboratoires d'électrotechnique. Ces travaux de recherche ont conduit à l'apparition de nouvelles structures de convertisseurs de puissance destinées pour les applications de haute tension appelées convertisseurs multi-niveaux. Grâce à leur topologie, les onduleurs multi-niveaux permettent une association série de plusieurs cellules de commutation, ce qui permet une augmentation du niveau de tension appliqué et également la puissance transitée. Cette structure permet aussi d'avoir une tension de sortie proche de la sinusoïde; grâce aux plusieurs niveaux de tension fournis par ce convertisseur.

Alors l'utilisation de ce type de convertisseur dans les domaines de forte puissance et/ou haute tension permet de résoudre simultanément les difficultés relatives à l'encombrement et à la commande des groupements d'onduleurs à deux niveaux généralement utilisés dans ce type d'applications. Afin de satisfaire certains critères d'optimisation à savoir la réduction des harmoniques, plusieurs types de commande sont développés, poussés par le besoin et les progrès-technologiques.

L'objectif de notre travail est d'apporter une modélisation et une simulation de la MAS alimentée par un onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type NPC contrôlé par une MLI sinusoïdale à deux porteuses triangulaires unipolaire. Le but est de minimiser les harmoniques et assurer une bonne alimentation électrique de la MAS. Pour atteindre les objectifs fixés notre mémoire est structuré comme suit :

Ce mémoire est réparti en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous allons présenter l'état de l'art de notre système, en commence par une généralités sur machines asynchrones, l'alimentation électrique tel que, le redresseur, le filtre LC et l'onduleur de tension à trois niveaux de type NPC.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de notre système (chaque modèle indépendamment). Premièrement, le modèle mathématique de la machine asynchrone, puis la modélisation de l'alimentation électrique de notre machine, principalement l'onduleur de tension triphasé multi-niveaux de type NPC.

Dans le dernier chapitre nous allons valider la simulation numérique de système dans l'environnement MATLAB /SIMULINK, ainsi que la description et la discussion des résultats obtenues.

Finalement, une conclusion générale résumera tous les résultats obtenus dans ce présent mémoire.

# **Chapitre I**

## **État De L'art du Système**

## **I.1.Introduction**

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent. La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans le domaine de forte puissance jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance, ou en utilisant les convertisseurs statiques, et parmi eux les onduleurs multi – niveaux.

En général, les onduleurs de tension multi – niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux.

Le développement de la technologie multi – niveaux a été marqué par deux facteurs. D'un côté, l'évolution technologique des matériaux semi – conducteurs permettant la réalisation de convertisseurs de puissance et de tension plus élevées. D'autre côté, et malgré le contrôle de convertisseurs multi – niveaux est compliqué, l'évolution de processus numérique de signal avec capacité de calcul et vitesse de réaction très élevée et coût réduit ont rendu possible la mise en œuvre de ce contrôle.

Il est à noter que le choix de la meilleure topologie multi – niveaux et de la stratégie de contrôle ou de commande la mieux adaptée à chaque application donnée n'est pas souvent facile à trouver.[29]

## **I.2.Généralités sur la machine asynchrone**

### **I.2.1.Définition de la machine asynchrone**

On appelle machine asynchrone toute machine, qui, ayant  $(2p)$  pôles et étant reliée à un réseau de fréquence  $f$ , ne tourne pas exactement à la vitesse asynchrone  $(60f_s/\pi)$ . On parle généralement des moteurs asynchrones car ces machines sont destinées à fournir de la puissance mécanique à partir du réseau électrique. Parmi les machines asynchrones, on peut distinguer deux types [1]:

- ❖ Les machines d'induction.
- ❖ Les machines à collecteur.

Le moteur d'induction est tellement plus utilisé que les autres que lorsqu'on parle de moteur asynchrone on sous-entend d'induction. La machine d'induction est caractérisée par une armature non alimentée (rotor), parcourue par des courants induits par l'autre armature qui est

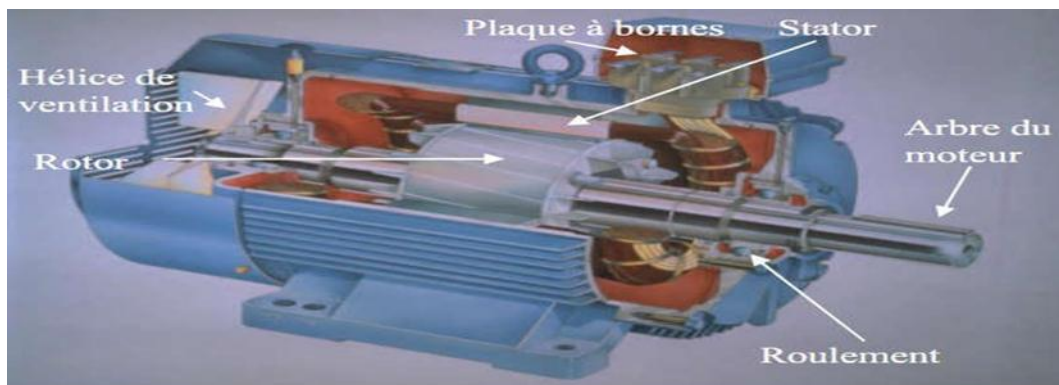
alimentée à partir d'un réseau de fréquence (stator) [2].

### I.2.2. Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure I.1). Contrairement aux machines synchrones et à courant continu, seuls les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. La figure (I.1) représente la machine asynchrone. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes :

- ❖ Le stator : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique
- ❖ Le rotor : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique
- ❖ Les paliers : organes de support, ces derniers constituent la partie mécanique permettant ainsi la mise en rotation de l'arbre moteur. [3]

L'entrefer : Cette partie est amagnétique (c'est le vide entre le rotor et le stator)

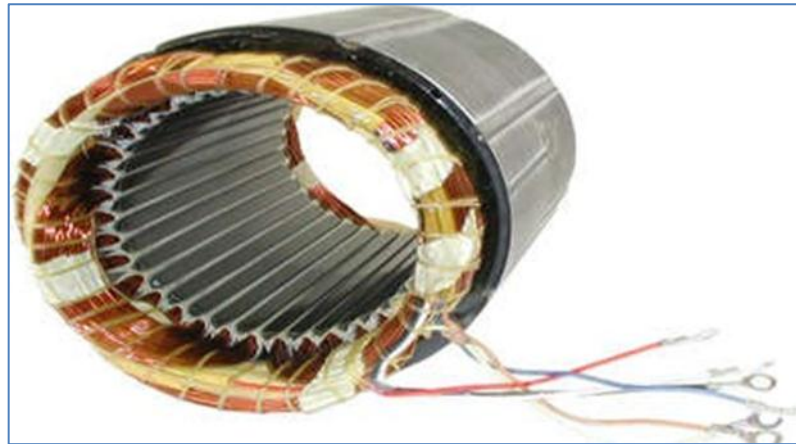


**Figure (I.1) :** schéma présente constitution de la machine asynchrone [3].

#### I.2.2.1 Le stator

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans les quelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le

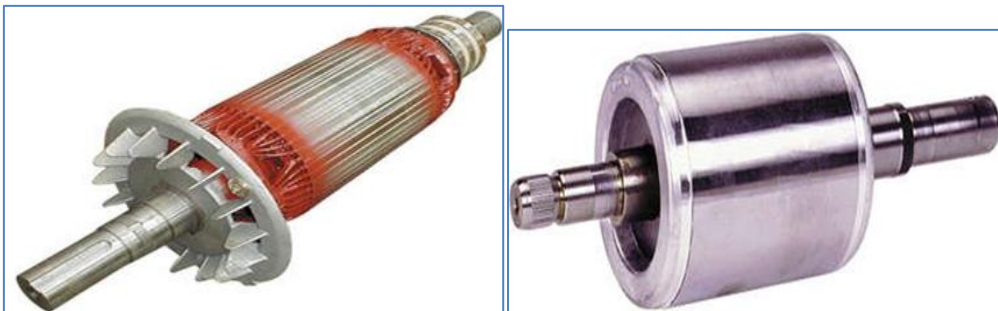
champ tournant (trois enroulements dans le cas moteur triphasé). Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation. [4]



*Figure( I.2) : l'enroulement du stator [4] .*

### **I.2.2.2 Le rotor**

C'est l'élément mobile du moteur. il est constitué d'un empilage des tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles des moteurs asynchrones : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues ». [4]



*Figure( I.4) : Vue d'un rotor bobiné [4]. Figure (I.3) : Vue d'un rotor à cage [4].*

### **I.2.2.3 L'entrefer**

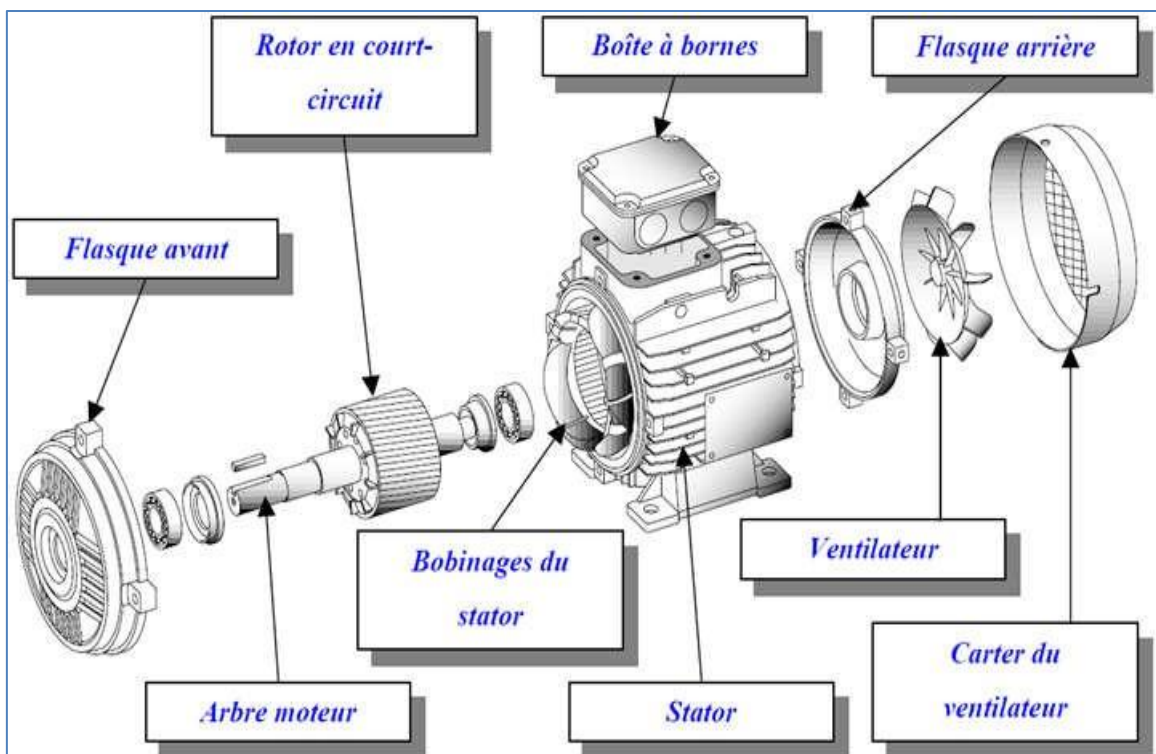
Cette partie amagnétique (c'est un vide entre le stator et le rotor) est d'épaisseur la plus faible (de l'ordre du millimètre), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statoriques. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage. [3]

### I.2.2.4 Les organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor il est supporté par un ou plusieurs paliers. ces derniers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre.

Une isolation électrique de l'un des paliers assure l'élimination des courants dans l'arbre dû aux dissymétries des réluctances du circuit magnétique. Ils sont généralement à roulements [3].

Pour les machines de petite et moyenne puissance. Dans La plupart du temps on trouve aussi un ventilateur de refroidissement [3].

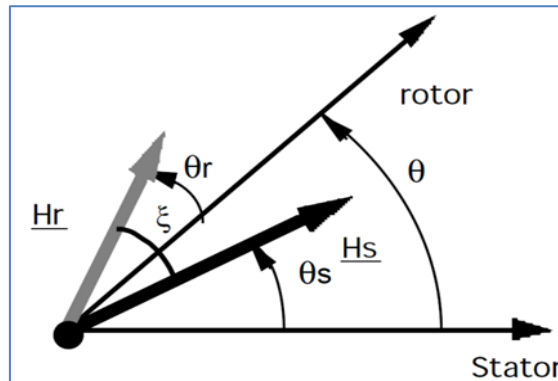


*Figure (I.5) : Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone [3].*

### I.2.3 : Principe de fonctionnement des machines à courant alternatif :

Dans les machines électriques à pôles lisses, le couple électromagnétique est dû à l'interaction de deux champs magnétiques. Dans le cas des machines à courant alternatif de type synchrone et asynchrone, il s'agit de l'interaction de deux champs tournants, le champ tournant créé par le(s) courant(s) qui circule(nt) dans l(es) enroulement(s) du rotor et le champ tournant produit

par les courants sinusoïdaux qui parcourent les enroulements du stator. La figure I.6 précise les positions des vecteurs  $\underline{H}_s$  et  $\underline{H}_r$  représentant respectivement les champs tournants statorique et rotorique.



**Figure (I.6):** représentation vectorielle

La position du rotor par rapport au stator est repérée par l'angle  $\theta$  tel que :

$$\theta = \Omega t + \alpha \quad (1)$$

Le champ tournant statorique se déplace par rapport au stator et sa position est repérée par l'angle  $\theta_s$  :

$$\theta_s = \Omega_s t + \beta \quad (2)$$

En notation complexe, dans le repère lié au stator, le champ produit par les enroulements du stator peut s'exprimer par :

$$\underline{H}_s = H_s e^{j\theta_s} \quad (3)$$

Le champ tournant rotorique se déplace par rapport au rotor et sa position est repérée par l'angle  $\theta_r$  (repère lié au rotor) :

$$\theta_r = \Omega_r t + \gamma \quad (4)$$

En notation complexe, dans le repère lié au rotor, le champ produit par les enroulements du rotor peut s'exprimer par:

$$\underline{H}_r = H_r e^{j\theta_r} \quad (5)$$

Le couple électromagnétique fourni par la machine s'exprime par un produit vectoriel :

$$C_{EM} = k (\vec{H}_s \Delta \vec{H}_r) \quad (6)$$

$$CEM = k H_s H_r \sin(\overrightarrow{H_s}, \overrightarrow{H_r}) \quad (7)$$

$$CEM = k H_s H_r \sin(\theta + \theta_r - \theta_s) \quad (8)$$

$$\text{En } CEM = k H_s H_r \sin[(\Omega + \Omega_r - \Omega_s)t + \gamma - \beta + \alpha] \quad (9)$$

La valeur moyenne du couple électromagnétique est non nul si :

$$\Omega + \Omega_r = \Omega_s \quad (10)$$

Cette relation permet de mettre en évidence le principe de fonctionnement des deux principales machines à courant alternatif :

- Dans le cas de la machine synchrone, le champ rotorique est produit par un enroulement alimenté en courant continu ou par un aimant permanent, la pulsation  $\Omega_r$  est donc nulle. Le rotor tourne à la même vitesse que le champ statorique.

- Dans le cas de la machine asynchrone, le rotor tourne à une vitesse différente de celle du champ statorique. Les courants rotoriques sont alternatifs et  $\Omega_r$  représente la vitesse angulaire de glissement :  $\Omega_r = g \Omega_s$  ( $g$  : glissement).

Tout ceci peut être résumé dans le tableau ci-dessous :

**Tableau I.1**

| <b>Machine synchrone :</b>                          | <b>Machine Asynchrone :</b>                 |
|---|---|
| $\Omega_r = 0 \quad \Omega = \Omega_s \quad (10 a)$ | $\Omega + \Omega_r = \Omega_s \quad (10 b)$ |

Pour contrôler parfaitement le couple électromagnétique de ces machines, il faut donc assurer en permanence l'égalité **10** sur les pulsations et maîtriser l'angle  $\xi$  entre les vecteurs

$\underline{H_s}$  et  $\underline{H_r}$  ( $\xi = \gamma - \beta + \alpha$ ).

$$CEM = k H_s H_r \sin \xi \quad (11)$$

On peut dire que cette relation illustre le fonctionnement de la machine à courant alternatif

## **I.2.4. Couplage des enroulements**

### **I.2.4.1. Définitions**

Tension nominale : C'est la tension à appliquer au récepteur pour un fonctionnement normale de celui-ci ; une tension trop élevée ou trop faible par rapport à cette tension nominale entraîne la destruction ou un mauvais fonctionnement suivant les cas et les types de récepteurs. [7]

Tension simple : C'est la tension mesurée entre une phase et le neutre du réseau ou des récepteurs. [7]

Tension composée : C'est la tension mesurée entre deux phases quelconques du réseau ou des récepteurs. Une tension donnée sans autre précision est toujours la tension composée. [7]

### **I.2.4.2. Types des couplages :**

Couplage étoile (Y) : Un moteur est couplé en étoile quand chacun de ses trois enroulements est soumis à la tension simple du réseau. [7]

Couplage triangle ( $\Delta$ ) : Un moteur est couplé en triangle quand chacun de ses trois enroulements est soumis à la tension composée du réseau. [7]

### **I.2.4.3. Couplage des moteurs asynchrones triphasés**

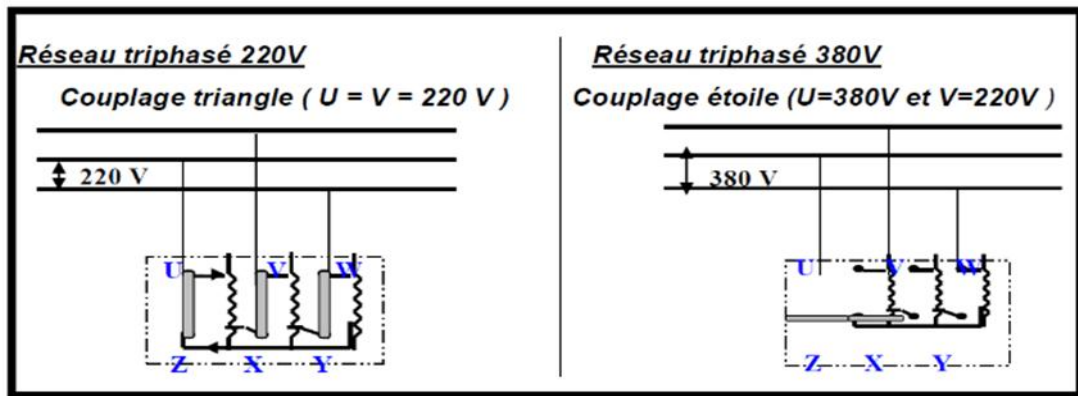
Choix du couplage des moteurs asynchrones triphasés se fait en fonction de la tension nominale de l'enroulement et de la tension du réseau d'alimentation ; un mauvais choix du couplage entraîne la suralimentation ou la sous-alimentation du moteur donc sa destruction ou son dysfonctionnement suivant les cas. Couplage des enroulements un enroulement est calculé pour être normalement utilisé sous une seule tension appelée tension nominale pour un moteur, la tension nominale est de 220V, c'est toujours la plus petite des deux tensions portées sur la plaque signalétique.

La distribution de l'énergie électrique se fait en basse tension 380 V entre deux phases quelconques et 220V entre chaque phase et le neutre. Les trois barrettes livrées avec le moteur permettent de le coupler en étoile ou en triangle.

La plus petite intensité correspond au branchement étoile (intensité nominale d'un enroulement), et la plus forte intensité au branchement triangle (intensité nominale en ligne).

Nous avons donc deux choix de couplage pour le fonctionnement normal du moteur :

- Si nous disposons d'un réseau d'alimentation de 220 V, alors le moteur sera couplé obligatoirement en triangle car en étoile il sera sous alimenté.
- Si nous disposons d'un réseau d'alimentation de 380 V, alors le moteur sera couplé obligatoirement en étoile car en triangle il sera suralimenté. [8]



Figure( I.7): Types du couplage[8]

### I.2.5. Avantages et inconvénients des la machine asynchrone

Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone sont assez nombreux mais les principaux sont résumés dans le tableau suivant [9]:

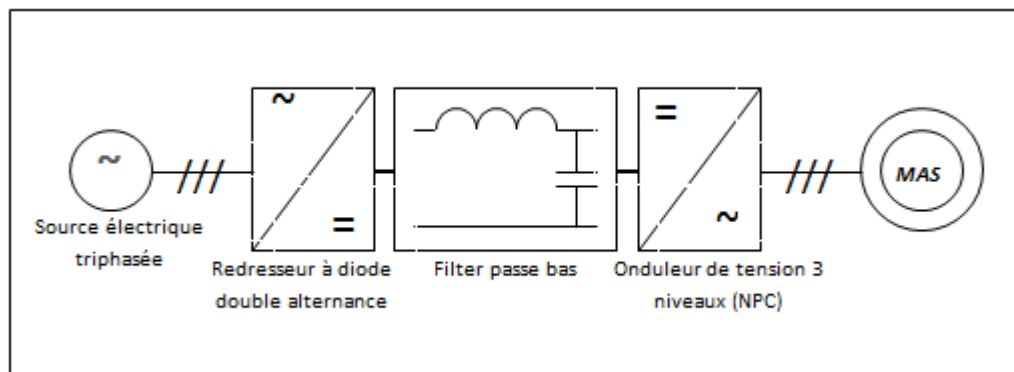
Tableau I.2 : Avantages et inconvénient de la machine asynchrone

| Avantages   | Inconvénient   |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Structure simple.</li> <li>✓ Robuste et facile à construire.</li> <li>✓ Coût réduit.</li> <li>✓ Absence d'un système bagues balais.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Non découplage naturel.</li> <li>✓ Non linéarités.</li> </ul> |

### I.2.6 Système d'alimentation

Généralement la machine asynchrone est alimentée par deux convertisseurs en cascade, le convertisseur coté machine est un onduleur de tension contrôlé par la technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI), et le convertisseur coté réseau est un redresseur triphasé double alternance à diodes, séparés par un filtre passe-bas (LC).

La figure I.8 illustre le schéma synoptique d'une machine asynchrone et de son alimentation.



*Figure( I.8): Schéma global de l'alimentation de la MAS*

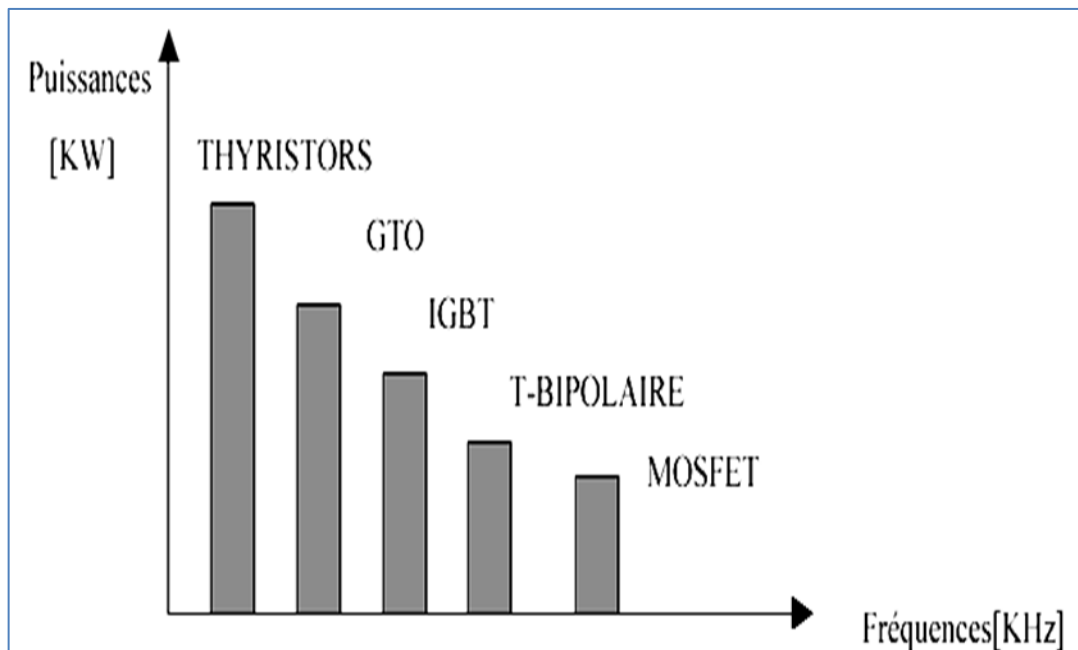
### **I.2.7 les semi-conducteurs des puissance**

Les composants de puissance (interrupteurs) sont déterminés en fonction des niveaux de la puissance et la fréquence de commutation. En règle générale, plus les composants sont rapides (fréquence de commutation élevée), plus la puissance commutée est faible et inversement.

Il est particulièrement vrai que les:

- Transistors MOSFET (transistor à effet champ), ces composants sont très rapides mais de puissances relativement faibles.
  - Transistor bipolaire, moins rapide que les MOSFET mais d'avantage plus puissant (quelque KHz à une dizaine de KW).
  - Transistors IGBT, sont des composants de gamme standard (jusqu'à 20 KHz à des dizaines de KW)
  - Les thyristors GTO, commutent très lentement les grandes puissances.
  - Les Thyristors, sont comandant à l'ouverture mais la fermeture dépend du circuit extérieur.
- [10]

La puissance [KW] comme étant la fonction de fréquence [KHz] peut être schématisée comme suit :



(Figure I.9): Représentation de puissance des composants en fonction de fréquence de commutation [10]

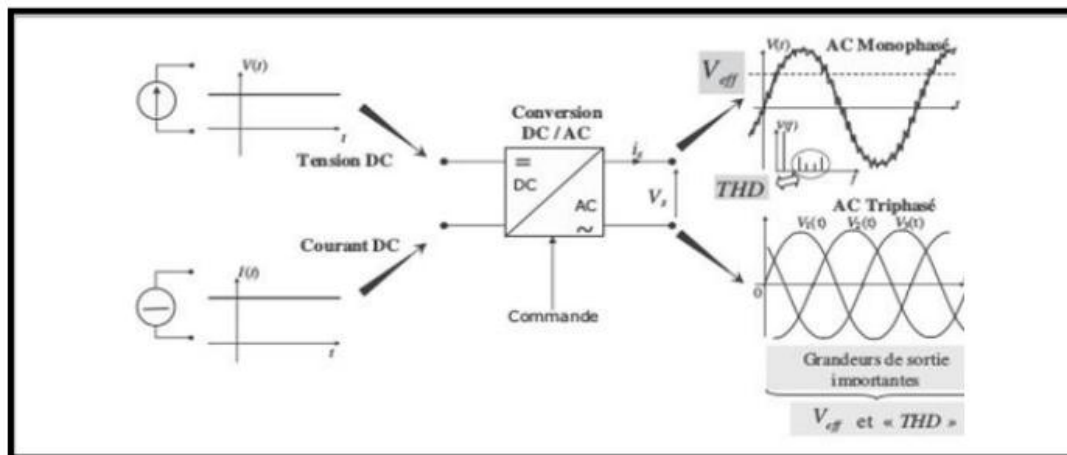
### I.3. Généralités sur L'onduleur de tension

#### I.3.1. Définitions des onduleurs

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables.
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes [11].

En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [12], On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant.



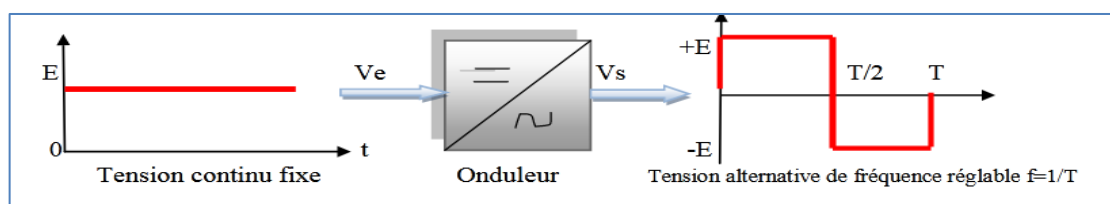
**Figure (I.10):** Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie.

### I.3.2. Principe générale de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue, On peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion.

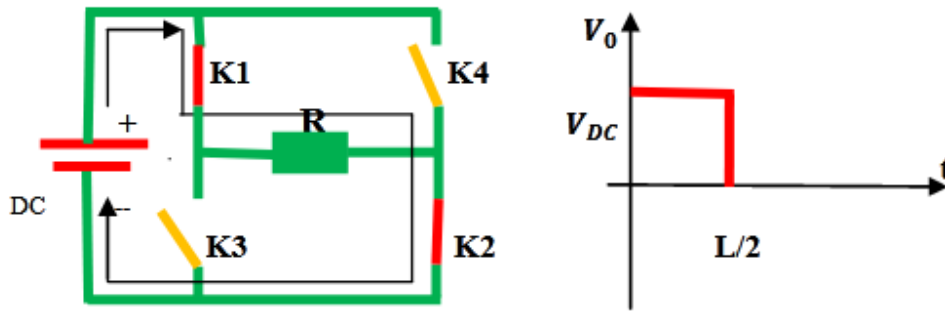
L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la Fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt Temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion.

Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui Suppose Ve l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources[13]



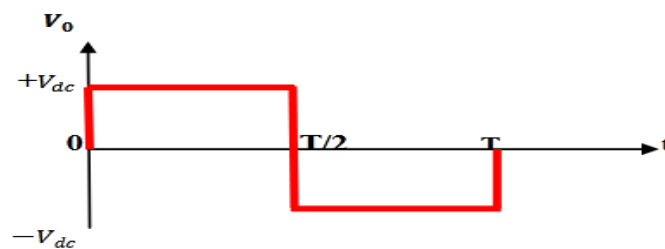
**Figure(I.11):** Symbole et signal d'un onduleur

Quand K1 – K2 sont fermés (On) et K3- K4 sont ouverts (Off) pour  $t_1 < t < t_2$  on obtient une alternance positif  $U(t) = V_{dc}$  comme la montre la figure I.12.



*Figure (I.12): Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1<sup>er</sup> demi-cycle*

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présentée sur la figure I.13



*Figure (I.13): Signal complet de l'onduleur*

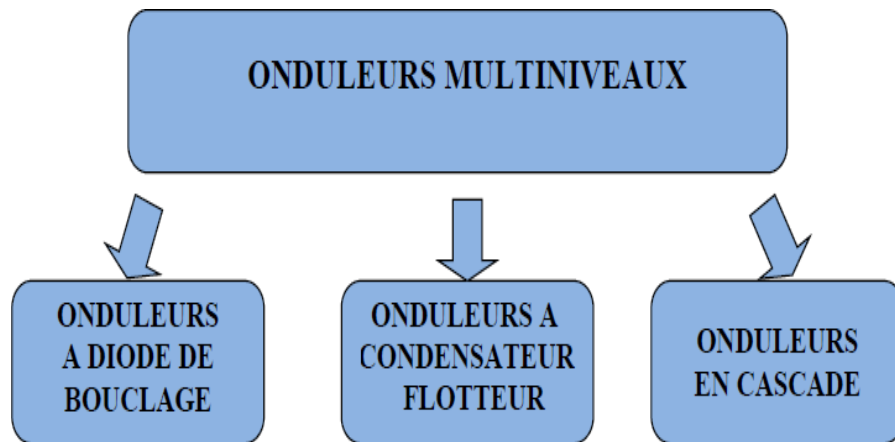
### I.3.3. Différents types des structures des convertisseurs multi – Niveaux

#### I.3.3.1 Intérêt des onduleurs multi-niveaux

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales. Le fait de multiplier le nombre de niveaux intermédiaires permet de réduire l'amplitude de chaque front montant ou descendant de la tension de sortie. Alors l'amplitude des raies harmoniques est par conséquent moins élevée. Dans le cas de modulation de largeur d'impulsion, le recours à un convertisseur multi-niveaux associé à une commande judicieuse des composants de puissance permet en outre de supprimer certaines familles de raies harmoniques [14].

En général, les onduleurs de tension multi-niveaux peuvent être vu comme des synthétiseurs de tension, dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux de tension

discrets . La figure I.14 représente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.



*Figure (I.14): Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux*

### I.3.4. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

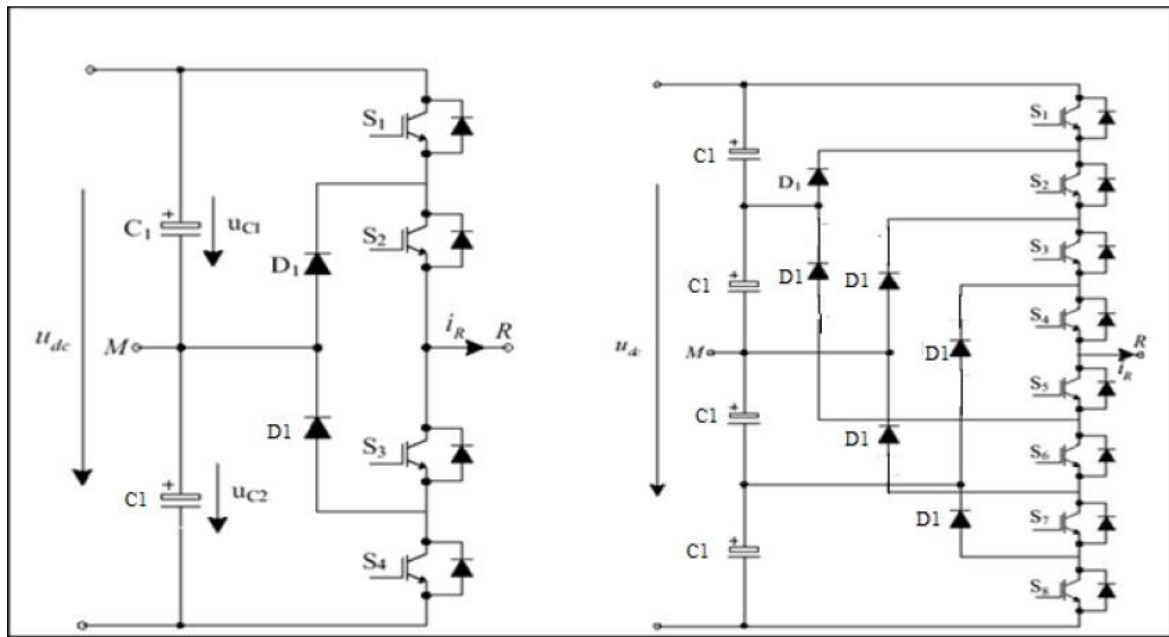
L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux. Le but de cette Partie est de donner une vue générale des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux :

- ❖ la topologie à diode de bouclage (NPC),
- ❖ la topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- ❖ la topologie en cascade,

#### I.3.4.1 Onduleur multi niveaux à diode de bouclage

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi niveaux est le NPC (Neutral Point Clamped). Cette topologie à été initialement proposé par A.Nabac en 1981 pour la génération de N niveaux de tension. La figure I.15 représente la structure d'un convertisseur triphasé à potentiel distribué, dans la quelle les diodes sont utilisés pour réaliser la connexion avec le point de référence 0. afin d'avoir une tension de 220 V, cependant ces diodes non seulement augmentent le cout de ce type du convertisseur mais créent un problème d'encombrement.

Pour l'obtention d'une tension de N niveaux, N-1 capacités. Les tensions aux bornes des condensateurs sont toutes égales à  $E/(N-1)$ , E est la tension totale du bus continu. Chaque couple d'interrupteur (STD, STD') forme une cellule de commutation, les deux interrupteurs sont donc commandés de façon complémentaire. [14]



a) NPC trois niveaux

b) NPC cinq niveaux

**Figure(I.15): Topologies des onduleurs NPC**

Cette topologie présente plusieurs avantages dont quelques-uns sont énumérés ci-dessous :

- ❖ Les composants de puissance à semi-conducteur bloquent une tension inverse égale seulement à la moitié de la tension de la source continue.
- ❖ cette topologie peut être généralisée et les principes employés dans la topologie d'onduleur à trois niveaux peuvent être étendus pour l'utilisation dans des topologies avec n'importe quel nombre de niveaux.
- ❖ Toutes les phases partagent le même bus continu.
- ❖ la fréquence fondamentale assure un haut rendement.
- ❖ La méthode de contrôle est relativement simple.
- ❖ La forme d'onde de trois niveaux résulte dans une meilleure qualité spectrale par rapport à celle d'un onduleur triphasé classique, ce qui rend les filtres passifs peu volumineux.

Par contre, cette topologie présente plusieurs difficultés techniques dans les cas de grande puissance tel que :

- ❖ Pour les topologies avec plus de trois niveaux, les diodes de bouclage peuvent augmenter les contraintes en tension jusqu'à une valeur égale à  $E (N-1)/N$ . Donc, les connexions des diodes en série pourraient être exigées et cela

complicque la conception et soulève des questions de fiabilité et du coût de réalisation.

- ❖ Cette topologie exige des diodes de bouclage à vitesse de commutation élevée qui doivent être capable de supporter le courant de la pleine charge.
- ❖ Différents calibres pour les appareils de commutation sont nécessaires en raison de leur conduction cyclique.

Le maintien de l'équilibre de la charge des condensateurs demeure toujours une question ouverte pour les topologies des onduleurs NPC avec plus de trois niveaux. Bien que le l'onduleur NPC à trois niveaux fonctionne avec un facteur de puissance élevé, il est employé surtout dans les circuits de compensation. Cela est dû au problème d'équilibrage des capacités. [15]

#### **I.3.4.2 Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants**

Dans la topologie multi niveaux proposée par T. Meynard et H. Foch en 1992. La structure de ce convertisseur est similaire à celle de l'onduleur à diode de bouclage sauf qu'au lieu d'utiliser des diodes de blocage, l'onduleur utilise des condensateurs à leur place. D'où l'appellation « Onduleur à Condensateurs Flottants ». Cette structure est proposée pour résoudre d'une part le problème de balancement de tension, et d'autre part le nombre excessif des diodes.

Dans la topologie suivante, Figure. I.16, on représente l'onduleur à condensateur flottant à trois et cinq niveaux.

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages :

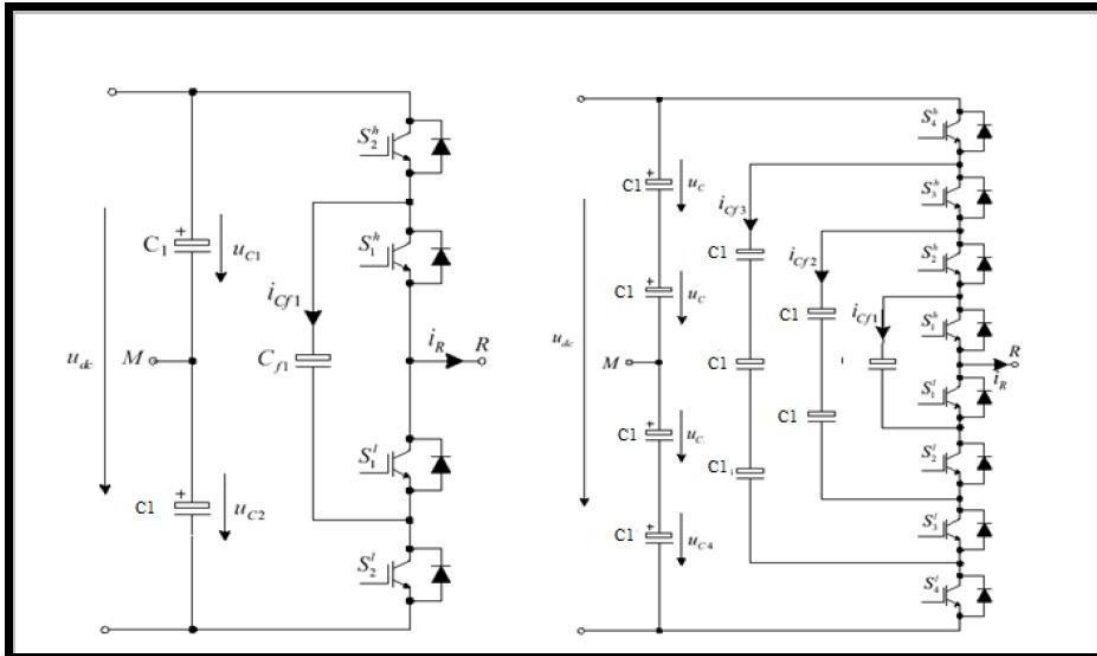
- ❖ Le concept de condensateur Flottant peut être appliqué à un certain nombre de convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC
- ❖ La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquées à cette topologie
- ❖ Les tensions sur les condensateurs sont automatiquement équilibrées par cette stratégie de modulation conventionnelle. Si désiré, les tensions de condensateur peuvent être activement contrôlées par une modification appropriée des signaux de commande.

Le concept peut être facilement appliqué à d'autres types de convertisseurs, aussi bien pour un transfert unidirectionnel de la puissance que bidirectionnel.

- ❖ Sa modularité permet une extension et une adaptation aisées des stratégies de commande à un nombre élevé de niveaux.
- ❖ Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus. [16]

Cette topologie présente quelque inconvénients, tel que:

- ❖ La topologie exige beaucoup de condensateurs à haute tension-beaucoup plus nombreux que d'autres topologies. Ces condensateurs doivent conduire le courant de pleine charge pendant au moins une partie du cycle de commutation. Heureusement si la fréquence de commutation est élevée, ces condensateurs peuvent généralement être relativement faibles en valeur de la capacité.
- ❖ La topologie en 'est pas intrinsèquement tolérante aux pannes. [14]
- ❖ Contrairement au premier cas qui ne nécessite que (N-1) capacité. De plus il est évident que des courants de grandes valeurs efficaces circuleront à travers ces condensateurs.
- ❖ Il ya un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés. [16]



a) trois niveaux

b) cinq niveaux

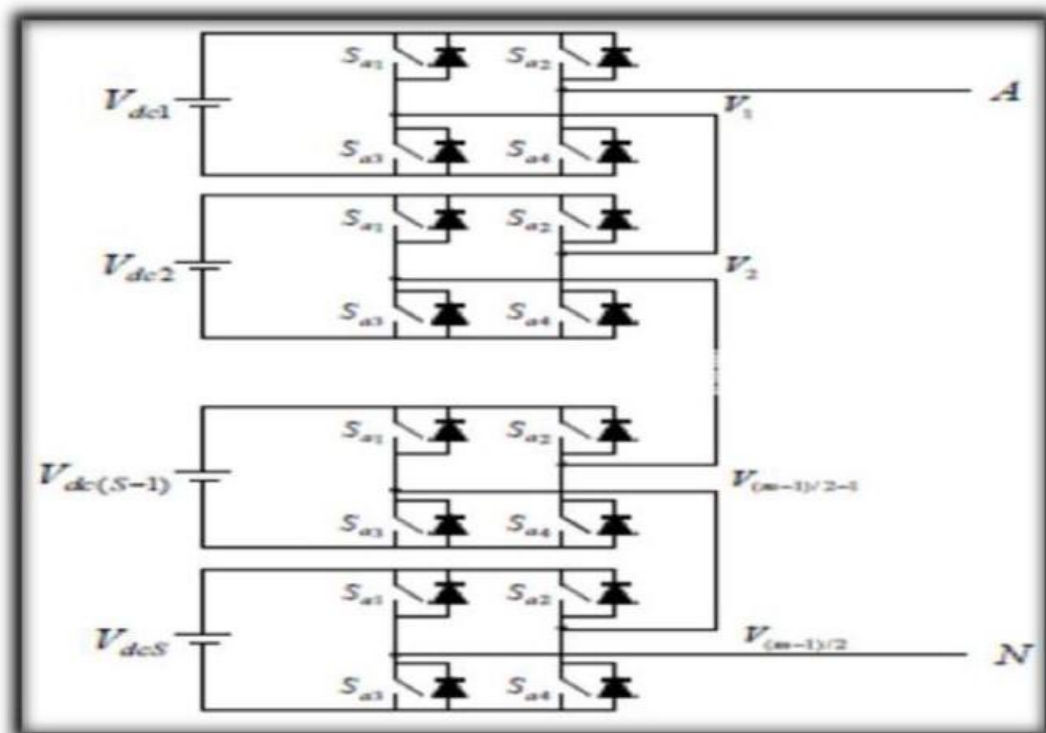
**Figure( I.16):**Topologies des onduleurs NPC à condensateur Flottant

### I.3.4.3 Onduleurs multi niveaux en cascade

En 1975, dans les auteurs ont proposé un convertisseur multi niveaux en cascade qui consistait en la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé ; ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées. La figure I.17 Montre le schéma de base d'un convertisseur N niveaux en cascade formé par l'association en série de  $N-1/2$  ponts à deux niveaux. La tension en sortie d'une telle structure est donnée par la somme des  $N-1/2$  tensions à la sortie de ces ponts.

Une autre alternative consiste à envisager de mettre en série plusieurs ponts monophasé alimentés par une même source de tension continue  $E_c$ . Cette structure est appelée polygonale et l'utilisation d'un transformateur d'isolement à la sortie de chaque pont est obligatoire pour connecter les sortie alternative de chaque pont. [17]

Les complications et le coût des sources isolées pour chaque pont n'est pas un inconvénient sérieux parce qu'il est compensé par les avantages de la construction modulaire. L'avantage principal de cette approche est que la topologie de ce type d'onduleur facilite la maintenance en plus elle permet de donner une façon très pratique pour augmenter le nombre de niveaux [19]. Pour améliorer la résolution de ces convertisseurs sans augmenter le nombre de cellules, il est possible d'alimenter les cellules par des tensions d'entrées différentes. [15]



**Figure (I.17):** Structure d'un convertisseur N niveaux en cascade

Comme toutes structures, l'onduleur multi-niveaux en cascade possède des avantages et Inconvénients dont on peut citer :

### **Avantage**

L'onduleur multi niveaux en cascade est une structure de convertisseurs d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources séparées à courant continu pour produire une forme d'onde d'une tension alternative.

- ❖ Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants.
- ❖ Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire.
- ❖ La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé.
- ❖ Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins De problèmes de sécurité.
- ❖ Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre de sources à Courant continu ( $N = 2s + 1$ ).

### **Inconvénients**

- ❖ Pour un système à trois phases, il faudra plus de commutateurs que dans un onduleur Traditionnel.
- ❖ Nécessité d'équilibrer les sources DC entre les différents niveaux.
- ❖ Besoin de plusieurs connecteurs/câbles pour connecter les sources DC. [14]

#### **I.3.4.4 Autres topologies**

Outre les trois topologies de base discutées précédemment, d'autres topologies de convertisseurs multi niveaux ont été proposées, mais la plupart d'entre elles sont à base de circuits "hybrides", combinaisons de deux topologies de base ou de légères variations de celles-ci. Ces topologies sont :

- a) Le convertisseur asymétrique hybride,
- b) Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement,
- c) Le convertisseur avec commutation douce,

- d) Les convertisseurs reliés par transformateur,
- e) Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC,
- f) Le convertisseur multi niveaux généralisé. [17]

### **I.3.5. Classification des topologies selon leur alimentation**

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation, la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique

Au contraire, les structures telles que les onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation, la tension maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation, elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation. [15]

### **I.3.6. Nombres de composants nécessaires**

A l'aide des tableaux suivants, nous comparons le nombre de commutateurs principaux et de diodes principales, nécessaires pour réaliser le nombre de niveaux de tension, est identique. Pour maintenir des diodes, ce n'est pas nécessaire dans la configuration à condensateur imbriqué et onduleur cascadié, ainsi que les condensateurs d'équilibrage ne sont pas obligatoires dans la configuration à diode clampée et onduleur cascadié. Implicitement, l'onduleur cascadié exige le moindre nombre de composants.

Un autre avantage d'onduleur cascadié est la flexibilité de disposition de circuit. La disposition du circuit de modulation est possible parce que chaque niveau a la même structure, et il n'y a aucune diode clampées supplémentaires ou un condensateur d'équilibrage de tension. Le nombre de niveaux de tension de sortie peut être facilement ajusté en ajoutant ou en enlevant les cellules de pont complet.

Pour le cas le plus simple permettant d'obtenir trois niveaux par branche, nous obtenons :

A l'aide des tableaux suivants, nous comparons le nombre de commutateurs principaux et de diodes principales, nécessaires pour réaliser le nombre de niveaux de tension est identique. Pour maintenir des diodes, ce n'est pas nécessaire dans la configuration à condensateur imbriqué et onduleur cascadié, ainsi que les condensateurs d'équilibrage ne sont pas obligatoires dans la configuration à diode clampée et onduleur cascadié. Implicitement, l'onduleur cascadié exige le moindre nombre de composants. [18]

Un autre avantage d'onduleur cascadié est la flexibilité de disposition de circuit. La disposition du circuit de modulation est possible parce que chaque niveau a la même structure, et il n'y a aucunes diodes clampées supplémentaires ou un condensateur d'équilibrage de tension. Le nombre de niveaux de tension de sortie peut être facilement ajusté en ajoutant ou en enlevant les cellules de pont complet.

Pour le cas le plus simple permettant d'obtenir trois niveaux par branche, nous obtenons :

**Tableau I.3** *Nombres de composants nécessaires pour la topologie à trois niveaux*

| topologies            | n | s | k | D | D <sub>c</sub> | C |
|-----------------------|---|---|---|---|----------------|---|
| NPC                   | 3 | 2 | 4 | 4 | 2              | 0 |
| Condensateur flotteur | 3 | 2 | 4 | 4 | 0              | 1 |
| cascade               | 3 | 1 | 4 | 4 | 0              | 0 |

**Tableau I.4** *Nombres de composants nécessaires pour la topologie à cinq niveaux*

| topologies            | n | s | k | D | D <sub>c</sub> | C |
|-----------------------|---|---|---|---|----------------|---|
| NPC                   | 5 | 4 | 8 | 8 | 12             | 0 |
| Condensateur flotteur | 5 | 4 | 8 | 8 | 0              | 6 |
| cascade               | 5 | 2 | 8 | 8 | 0              | 0 |

**Tableau I.5** *Nombres de composants nécessaires pour la topologie à sept niveaux*

| topologies            | n | s | k  | D  | D <sub>c</sub> | C  |
|-----------------------|---|---|----|----|----------------|----|
| NPC                   | 7 | 6 | 12 | 12 | 30             | 0  |
| Condensateur flotteur | 7 | 6 | 12 | 12 | 0              | 15 |
| cascade               | 7 | 3 | 12 | 12 | 0              | 0  |

**Tableau I.6** *Nombres de composants nécessaires pour la topologie à neuf niveaux*

| topologies            | n | s | k  | D  | D <sub>c</sub> | C  |
|-----------------------|---|---|----|----|----------------|----|
| NPC                   | 9 | 8 | 16 | 16 | 56             | 0  |
| Condensateur flotteur | 9 | 8 | 16 | 16 | 0              | 28 |
| cascade               | 9 | 4 | 16 | 16 | 0              | 0  |

**Tableau I.7** *Nombres de composants nécessaires pour la topologie à n niveaux*

| topologies                   | n | s       | k      | D      | D <sub>c</sub> | C              |
|------------------------------|---|---------|--------|--------|----------------|----------------|
| <b>NPC</b>                   | n | (n-1)   | 2(n-1) | 2(n-1) | (n-1). (n-2)   | 0              |
| <b>Condensateur flotteur</b> | n | (n-1)   | 2(n-1) | 2(n-1) | 0              | (n-1). (n-2)/2 |
| <b>cascade</b>               | n | (n-1)/2 | 2(n-1) | 2(n-1) | 0              | 0              |

Avec :

- ❖ n : le nombre de niveaux de tension obtenus,
- ❖ s : le nombre de sources à courant continu,
- ❖ K : le nombre de commutateurs principaux,
- ❖ D : le nombre de diodes principales,
- ❖ D<sub>c</sub> : le nombre des diodes clampées,
- ❖ C : le nombre de condensateurs d'équilibrage.

Du point de vue du nombre des composants, les onduleurs à cellules cascadiées paraissent être la solution multi-niveau la plus avantageuse, surtout lorsque le nombre de niveaux devient important. C'est effectivement le cas pour les applications monophasées telles que le filtrage actif ou la compensation statique, lorsque le convertisseur n'a pas besoin de fournir d'énergie au système. Pour les applications triphasées et pour un petit nombre de niveaux, les onduleurs NPC sont intéressants, car les condensateurs sont partagés par les différentes branches, ce qui permet un équilibrage de la puissance circulant entre les phases. Cet équilibrage permet une réduction notable de la taille des condensateurs intermédiaires [19].

### **I.3.7. Domaines d'application des convertisseurs multi-niveaux :**

- ❖ Démarrage de la machine d'une grande puissance.
- ❖ Système de lavage.
- ❖ Réglage de la vitesse par la tension de sortie de l'onduleur.
- ❖ Réglage de la vitesse par la variation de la fréquence de l'onduleur.
- ❖ Application dans le domaine de la traction ferroviaire et urbaine (TGV France).
- ❖ Application dans l'alimentation des réseaux de bord et de propulsion des bâtiments maritimes.
- ❖ Application dans le domaine de réseaux électrique.
- ❖ Application dans le domaine de l'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne...etc.). [20]

### **I.3.8. Avantages et inconvénients des onduleurs multi-niveaux :**

Cette topologie présente plusieurs avantages, notamment :

- ❖ La tension de blocage des interrupteurs est partout la même.
- ❖ Puisqu'elle est modulaire l'existence pour un nombre de niveaux élevé est facile.
- ❖ Les condensateurs n'étant jamais mis en série entre niveaux différents, le problème du déséquilibre de leur tension n'existe plus.

La contrainte de cette topologie est la nécessité d'un grand nombre de condensateur, notamment pour une configuration triphasée ce qui augmente le volume de l'onduleur [22].

### **I-4-Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'état de l'art du système, nous avons introduit des généralités sur la machine asynchrone triphasés (constitution, Principe de fonctionnement, caractéristique....), de plus on a donné les avantages et les inconvénients de ces types des machines, puis nous avons présentés une généralité sur les onduleurs de tension. ainsi une étude profonde sur différents types des structures des convertisseurs Multi – Niveaux et nous avons choisi l'Onduleur multi niveaux à diode de bouclage (NPC) comme source d'alimentation de notre machine.

# **Chapitre II**

## **Modélisation du Système**

## **II-1 Introduction :**

La modélisation est une phase primordiale de son développement, les progrès de l'informatique et du génie des logiciels permettent de réaliser des modélisations performantes.

Le modèle mathématique d'une machine électrique est un modèle de représentation de la machine réelle qui permettent de restituer une image de ce que l'on peut observer expérimentalement, elle apporte une aide appréciable dans la résolution des problèmes techniques [23].

De plus, la conception d'une chaîne de commande passe par une phase de modélisation afin de dimensionner et valider les stratégies retenues. Mais, on ne peut parler de la commande de la machine asynchrone, sans qu'on parle du convertisseur qui lui est associé, de son alimentation et de sa commande [23].

En général, les onduleurs de tension multi – niveaux peuvent être vus comme des synthétiseurs de tension dans lesquels la tension de sortie est synthétisée de plusieurs niveaux.

Le développement de la technologie multi – niveaux a été marqué par deux facteurs. D'un côté, l'évolution technologique des matériaux semi – conducteurs permettant la réalisation de convertisseurs de puissance et de tension plus élevées. D'autre côté, et malgré le contrôle de convertisseurs multi – niveaux est compliqué, l'évolution de processus numérique de signal avec capacité de calcul et vitesse de réaction très élevée et coût réduit ont rendu possible la mise en œuvre de ce contrôle.

Ce chapitre est consacré à la modélisation de la machine asynchrone associée par un onduleur multi-niveaux de type NPC.

## **II.2 Modélisation de la machine asynchrone**

La modélisation de la machine asynchrone est un besoin indispensable pour observer et analyser les différentes évolutions de ses grandeurs électromécaniques, électriques et magnétiques d'une part et d'autre part de prévoir le contrôle nécessaire.

Nous utiliserons un modèle de la machine asynchrone pour décrire le comportement dynamique des différentes grandeurs concernées par le système de contrôle (couple électromagnétique, flux magnétique, courants, tensions..... etc), pour ce faire on doit tenir compte de quelques hypothèses simplificatrices [24]

### II.2.1 Hypothèses simplificatrices

Pour mener à bien la modélisation de la machine, certaines hypothèses simplificatrices ont été faites [25].

- ❖ Le circuit magnétique ne sature pas.
- ❖ Entrefer constant ;
- ❖ Effet des encoches négligé ;
- ❖ Répartition sinusoïdale de l'induction dans l'entrefer ;
- ❖ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer ;
- ❖ Pertes ferromagnétiques négligées (pas de courants de *Foucault* ni d'hystérésis) ;
- ❖ Pertes mécaniques négligées ;
- ❖ Influence de l'effet de peau négligée ;
- ❖ Les variations des caractéristiques dues à l'échauffement ne sont pas prises en compte

### II.2.2 Equation générale de la machine asynchrone

Les équations générales de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans un repère triphasé s'écrivent :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (\text{II. 1})$$

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] \quad (\text{II. 2})$$

On spécifie respectivement les vecteurs ou paramètres statoriques par l'indice s et rotoriques par l'indice r. Les indices abc indiquent les phases triphasées. Les paramètres  $R_s$  et  $R_r$  représentent respectivement les résistances statoriques et rotoriques par phase.

Les vecteurs  $[V]$ ,  $[i]$  et  $[\phi]$  sont les vecteurs tensions, courants et flux de chacune des armatures.

Avec :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}, \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}, \quad [i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix}, \quad [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix}, \quad [\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix}$$

$$[\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix}, \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}, \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

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

$$[\varphi_{\text{rabc}}] = [L_r] \cdot [i_{\text{rabc}}] + [M_{\text{sr}}(\theta)] \cdot [i_{\text{sabc}}] \quad (\text{II. 3})$$

$$[\varphi_{\text{sabc}}] = [L_s] \cdot [i_{\text{sabc}}] + [M_{\text{rs}}(\theta)] \cdot [i_{\text{rabc}}] \quad (\text{II. 4})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

$L_s, L_r$ : inductance propre du stator et du rotor .

$$[M_{\text{sr}}] = [M_{\text{rs}}]^t = M_{\text{max}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$[M_{\text{sr}}]$  : La matrice des inductances stator-rotor.

$\theta$  : La position absolue entre stator et rotor.

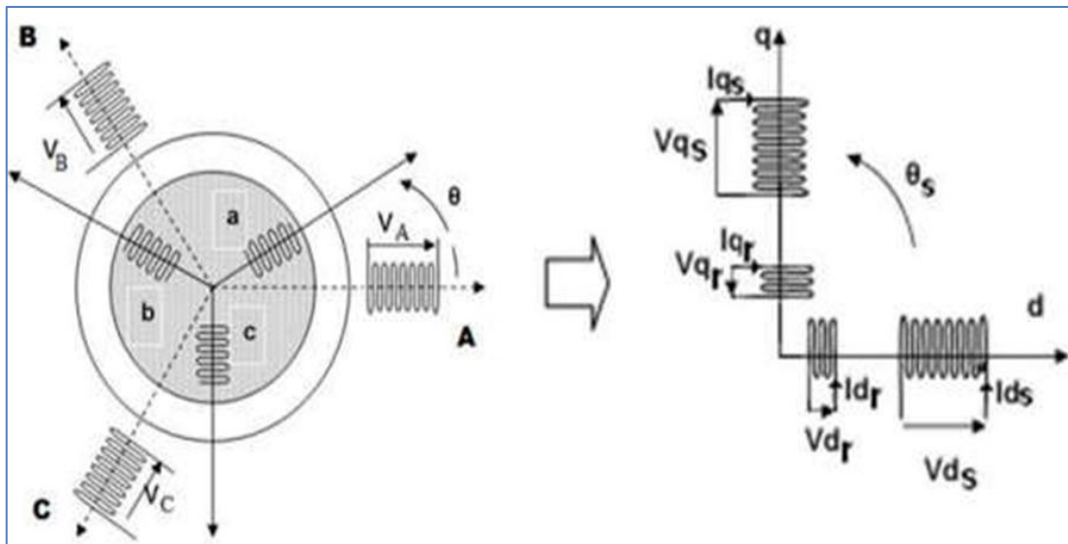
$M_{\text{max}}$  : représente la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle stator- rotor obtenue lorsque les bobinages sont en regard l'un de l'autre.

La modélisation de la MAS passe par la transformation d'un système triphasé au système biphasé et inversement. Et pour des raisons de simplicité, il est classique d'exprimer les différentes équations triphasées de la machine asynchrone dans un repère diphasé tournant dqo.

Dans ce cas, on utilise la transformation de Park. Cette dernière, normée, assure l'invariance de la puissance instantanée entre les repères triphasés et « dqo ».

En choisissant un repère « dqo » diphasé, l'axe d peut être repéré par :  $\theta_s$ : l'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du stator;  $\theta_r$ : l'angle électrique par rapport à l'axe de la phase « a » du rotor ;

$\theta$ : l'angle électrique entre l'axe rotorique et l'axe statorique.



**Figure (II.1) :** Représentation des enroulements de la machine asynchrone triphasée et biphasée équivalente issue de la transformation de Park [26].

Les deux angles sont liés par la relation suivante :

$$\theta = \theta_s - \theta_r = p \cdot \theta \quad (\text{II.5})$$

Où

$\theta$  : est la position mécanique de l'axe rotorique par rapport à l'axe statorique,  $p$  : nombre de paires de pôles.

La transformation de Park, est appliquée de manière identique au vecteur de tensions, de courants et de flux.

Le vecteur  $x_0$  représente la composante homopolaire, normale au plan formé par les vecteurs  $x_a$ ,  $x_b$  " et "  $x_c$ , les vecteurs  $x_d$  " et "  $x_q$  représentent les vecteurs diphasés qui correspondent aux vecteurs  $x_a$ ,  $x_b$  " et "  $x_c$ . La transformation de Park, est définie par :

$$[x_{abc}] = [P(\theta)][x_{dqo}] \quad (\text{II.6})$$

$$[x_{dqo}] = [P(\theta)]^{-1}[x_{abc}] \quad (\text{II.7})$$

Tel que :

$[P(\theta)]$  et  $[P(\theta)]^{-1}$  Sont les matrices de passage direct et inverse, elles sont données par

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 8})$$

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 9})$$

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$V_{sd} = R_s \cdot i_{sd} - \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sq} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} \quad (\text{II. 10})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot i_{sq} + \frac{d\theta_s}{dt} \varphi_{sd} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} \quad (\text{II. 11})$$

$$V_{so} = R_s \cdot i_{so} + \frac{d\varphi_{so}}{dt} \quad (\text{II. 12})$$

De même, en l'appliquant aux équations rotoriques avec un angle de  $\theta_r$  on obtient les équations rotoriques dans le repère dq:

$$V_{rd} = 0 = R_r \cdot i_{rd} - \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rq} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} \quad (\text{II. 13})$$

$$V_{rq} = 0 = R_r \cdot i_{rq} + \frac{d\theta_r}{dt} \varphi_{rd} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} \quad (\text{II. 14})$$

$$V_{ro} = R_r \cdot i_{ro} + \frac{d\varphi_{ro}}{dt} \quad (\text{II. 15})$$

### II.2.3 Equations magnétiques

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{rd} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 16})$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sq} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & M \\ M & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sq} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 17})$$

Avec:

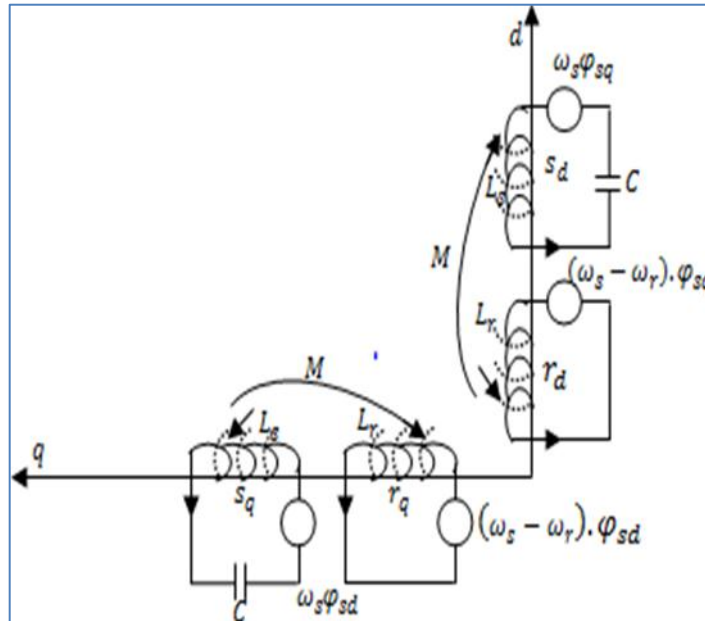
$L_s = l_s + M$ : Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r + M$  : Inductance cyclique rotorique.

$l_s$  : Inductance de fuite statorique.

$l_r$  : Inductance de fuite rotorique.

$M$  : Inductance mutuelle



**Figure( II.2) :** Disposition des enroulements suivant les axes  $d, q$ .

Plusieurs solutions pour orienter le repère « dq » par rapport aux repères triphasés sont possibles. Dans notre cas, on se fixe les axes  $d$  et  $q$  solidaires du champ tournant de la machine. En régime permanent, cette solution fait correspondre des grandeurs continues aux grandeurs sinusoïdales [24].

Dans cette configuration, en régime sinusoïdal permanent, on a :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s : \text{La vitesse angulaire des axes } d,q \text{ est égale à la pulsation statorique ;}$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r : \text{La vitesse angulaire des axes } d,q \text{ est égale à la pulsation rotorique}$$

Ces deux pulsation sont reliées à la vitesse mécanique du rotor ( $\Omega$ ) par l'équation suivant :

$$\omega_s - \omega_r = p \quad (\text{II.18})$$

Ainsi, en partant des équations (II.9), (II.10), (II.11), (II.12), et en utilisant la relation (II.16) qui lie les flux aux courants, on obtient l'équation matricielle suivante qui en globe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère  $d,q$  :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ 0 & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di_{st}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 19})$$

Cette relation représente les équations de la machine asynchrone, dans le repère de PARK solidaire du champ tournant, en régime permanent sinusoïdal.

L'expression du couple électromagnétique dans le repère de PARK est donnée par:

$$C_{em} = P \cdot M (i_{rd} \cdot i_{sq} - i_{rq} \cdot i_{sd}) \quad (\text{II. 20})$$

L'équation mécanique de la machine asynchrone est donnée comme suit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e - C_r \quad (\text{II. 21})$$

Avec :

J : moment d'inertie de la machine [Kgm<sup>2</sup>].

f: coefficient de frottement. [N.m /rad. s<sup>-1</sup>].

Cr: Couple résistant impose al arbre de la machine [N.m].

Ce: Couple électromagnétique développe par la machine [N.m].

p : nombre de paires de pôles.

$\Omega$  : vitesse mécanique donnée par :  $\Omega = \omega/p$

#### II.2.4. Modélisation de la machine asynchrone par la représentation d'état

La représentation d'état est un outil utile à la description des systèmes, à leur analyse, et à la synthèse de lois de commande sophistiquées. C'est une vision élargie de la théorie des systèmes reposant sur le concept d'énergie. En fait, à partir d'un instant donné, les systèmes dépendent non seulement des entrées extérieures mais également de son état énergétique à cet instant [10].

##### II.2.4.1 Le système d'équation d'état

Les grandeurs, fonction du temps, représentant les états énergétiques du système sont les composantes du vecteur d'état . Les équations qui régissent le système sont:

$$\begin{cases} [X]^* = [A][X] + [B][U] \\ [Y] = [C][X] + [D][U] \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec:

[X] : vecteur d'état.

[U] : vecteur des entrées.

[Y] : vecteur des sorties.

[A] : matrice d'évolution.

[B] : matrice d'application de la commande.

[C] : matrice d'observation.

[D] : matrice de transmission directe.

Ce formalisme est beaucoup utilisé dans le domaine de l'automatique.

#### II.2.4.2 Modèle d'état de la machine asynchrone alimentée en tension

Nous supposons que la machine est alimentée en tension sinusoïdal, les équations différentielles (II.10) (II.11) (II.13) (II.14), et les relations (II.16), (II.17) décrivent d'une manière générale le fonctionnement de la machine et permettent de concevoir une représentation d'état alors le modèle de la machine est décrit par l'équation d'état suivante:

$$\begin{cases} \frac{dI_{sd}}{dt} = -\left\langle \frac{1}{T_s \sigma} + \frac{(1-\sigma)}{T_r \sigma} \right\rangle I_{sd} + \omega_c I_{sq} + \frac{1}{T_r L_m} \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \varphi_{rd} + \frac{1}{L_m} \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega \varphi_{rq} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sd} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} = -\omega_c I_{sd} - \left\langle \frac{1}{T_s \sigma} + \frac{(1-\sigma)}{T_s \sigma} \right\rangle I_{sq} - \frac{1}{L_m} \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega \varphi_{rd} + \frac{1}{T_r L_m} \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \varphi_{rq} + \frac{1}{\sigma L_s} V_{sq} \\ \frac{d\varphi_{rd}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} I_{sd} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rd} + \omega_{sl} \varphi_{rq} \\ \frac{d\varphi_{rq}}{dt} = \frac{L_m}{T_r} I_{sq} - \omega_{sl} \varphi_{rd} - \frac{1}{T_r} \varphi_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

$$\text{Avec: } T_r = \frac{L_r}{R_r} ; T_s = \frac{L_s}{R_s} ; \sigma = 1 - \frac{L_m}{L_s L_r}.$$

### II.2.4.3 Forme d'état du modèle de la machine asynchrone dans le repère (d, q) lié au champ tournant

La représentation d'état de la machine asynchrone dans le repère (d, q) lié au champ tournant peut se mettre sous la forme condensée:

$$[X]^* = [A][X] + [B][U]$$

$$[A] = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{T_s} + \frac{(1-\sigma)}{T_r \sigma}\right) & \omega_c & \frac{1}{T_r L_m} \frac{(1-\sigma)}{\sigma} & \frac{1}{L_m} \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \omega \\ -\omega_c & -\left(\frac{1}{T_s \sigma} + \frac{(1-\sigma)}{T_r \sigma}\right) & -\frac{1}{L_m} \frac{(1-\sigma)}{\sigma} & \frac{1}{T_r L_m} \frac{(1-\sigma)}{\sigma} \\ \frac{L_m}{T_r} & 0 & -\frac{1}{T_r} & \omega_{sl} \\ 0 & \frac{L_m}{T_r} & -\omega_{sl} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad [X] = \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix}, \quad [U] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix}$$

## II.3. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux

Pour ce faire, on va étudier le modèle d'un bras de l'onduleur, puis on va généraliser l'approche [27].

### II.3.1. Modèle de fonctionnement d'un bras de l'onduleur

La tension polaire  $V_{AM}$  entre la borne  $A$  de la charge et le point neutre  $M$  est entièrement défini par l'état des quatre interrupteurs bidirectionnels en courant ( $K$ ) du bras d'onduleur; cette tension doit prendre les trois potentiels ( $-U_C, 0, +U_C$ ) d'où l'appellation onduleur triphasé à trois niveaux.

### II.3.2. Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur

Les configurations possibles d'un seul bras de 04 interrupteurs est de  $2^4 = 16$  états que l'on peut représenter par un quadruplet de 0 et de 1 suivant l'état des interrupteurs K1, K2, K3 et K4 [10].

Une analyse topologique d'un bras d'onduleur montre cinq configurations électriques possibles:

❖ **Configuration 0:** (C11C12C13C14) = (0 0 0 0)

Les interrupteurs (K1, K2) et (K3, K4) sont bloqués et la tension de sortie  $V_{AM}$  est imposée par la charge; cette configuration est indésirable pour la commande de l'onduleur.

❖ **Configuration 1:** (C11C12C13C14) = (1 1 0 0)

Les interrupteurs (K1, K2) sont passants et (K3,K4) sont bloqués et la tension de sortie:

$$V_{AM} = +U_C = +E / 2.$$

❖ **Configuration 2:** (C11C12C13C14) = (1 0 0 0)

L'interrupteur K1 est passant et (K2, K3, K4) sont bloqués et la tension de sortie:

$$V_{AM} = 0.$$

❖ **Configuration 3:** (C11C12C13C14) = (0 0 1 1)

Les interrupteurs (K1,K2) sont bloqués et (K3,K4) sont passants et la tension de sortie:

$$V_{AM} = -U_C = -E / 2.$$

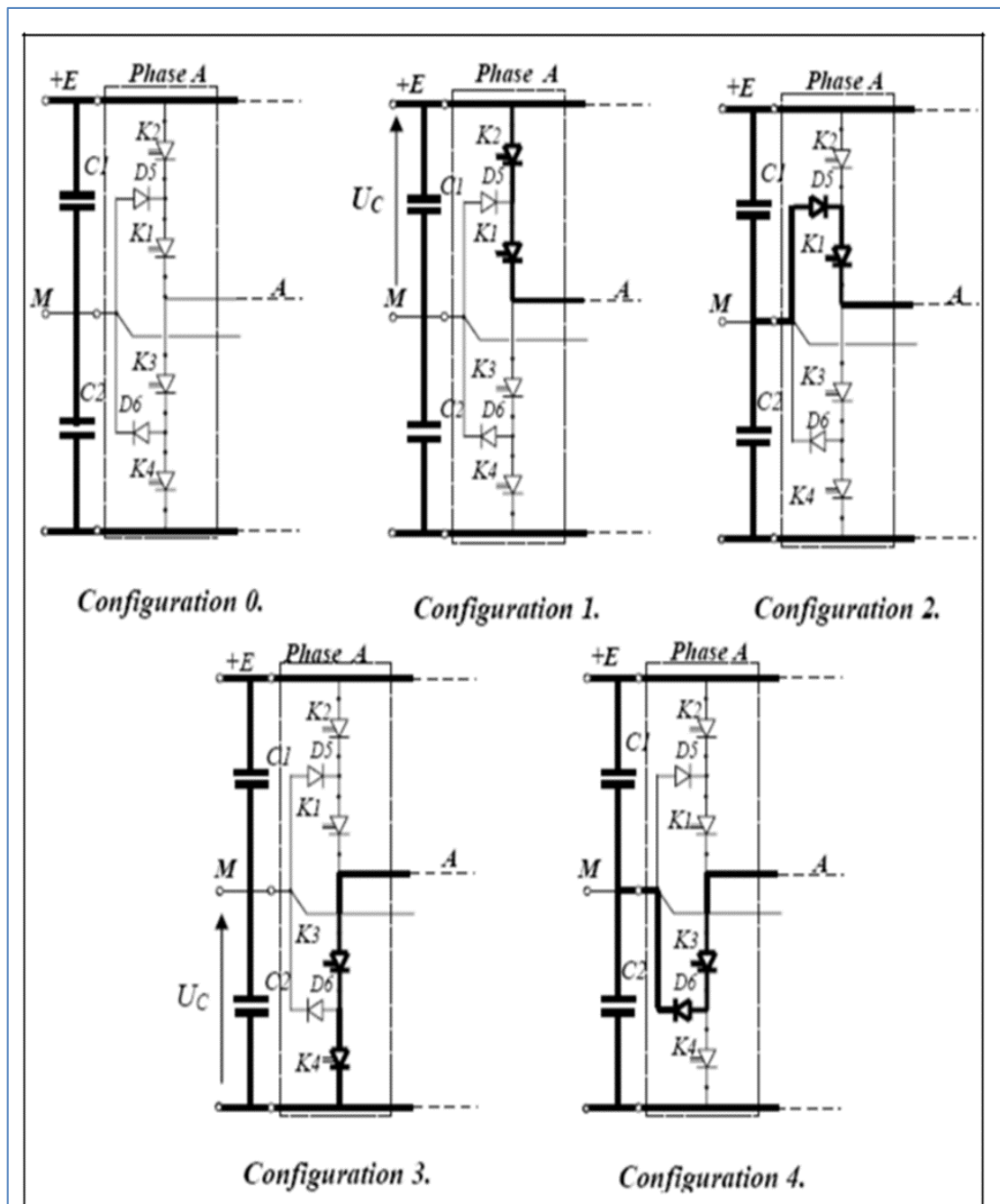
❖ **Configuration 4:** (C11C12C13C14) = (0 0 1 0)

L'interrupteur K3 est passant et (K2, K1, K4) sont bloqués et la tension de sortie:

$$V_{AM} = 0.$$

Les autres configurations sont à éviter, car:

- ❖ Soit, elles provoquent le court-circuit des sources continues.
- ❖ Soit, elles n'assurent pas la connexion de la charge au point neutre des sources continues.



Figure( II.3): Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur [27]

Le tableau ci-dessous récapitule les cinq configurations électriques possibles:

Tableau II.1 Tableau récapitulatif relatif au bras no 1

| Configuration | Commande                                       | Tension<br>$V_{AM}$                                      | Courant continu                                 | Observation                                  |
|---------------|--|--|---|--|
| <b>Conf 0</b> | $C_{ij} = 0$<br><br>$i=1,3$<br><br>$j=1,4$     | <i>Imposée</i><br><br><i>Par la</i><br><br><i>charge</i> | $I_{d0} = I_{d1} = I_{d2} = 0$<br><br>$I_A = 0$ | Configuration non désirable pour la commande |
| <b>Conf 1</b> | $C_{11} = C_{12} = 1$<br>$C_{13} = C_{14} = 0$ | $+U_C$   | $I_{d1} = I_A$<br>$I_{d0} = I_{d2} = 0$         | Niveau de tension<br>$(+U_C)$                |
| <b>Conf 2</b> | $C_{11} = 1$<br>$C_{12} = C_{13} = C_{14} = 0$ | $0$  | $I_{d1} = I_{d2} = 0$<br>$I_{d0} = I_A$         | Niveau de tension (0)                        |
| <b>Conf 3</b> | $C_{11} = C_{12} = 1$<br>$C_{13} = C_{14} = 0$ | $-U_C$   | $I_{d1} = I_{d0} = 0$<br>$I_{d2} = I_A$         | Niveau de tension<br>$(-U_C)$                |
| <b>Conf 4</b> | $C_{13} = 1$<br>$C_{11} = C_{12} = C_{14} = 0$ | $0$  | $I_{d1} = I_{d2} = 0$<br>$I_{d0} = I_A$         | Niveau de tension (0)                        |

Avec:

$i = 1,3$  :numéro du bras

$j = 1,4$  :numéro de l'interrupteur du bras  $i$

- ❖ On doit éliminer la configuration 0, car elle déconnecte totalement la charge de la source continue.
- ❖ Garder les (4) configurations utiles qui vont permettre de générer les trois niveaux de tension  $(-U_C, 0, +U_C)$  relative à la tension du bras d'onduleur  $(V_{AM})$ .
- ❖ Pour avoir un mode commandable du bras d'onduleur, on doit chercher une commande complémentaire optimale.

### II.3.3. modèle de commande de l'onduleur

#### II.3.3.1. fonction de connexion

- ❖ A chaque interrupteur  $(K_{ij})$ , on lui associe une fonction de connexion  $F_{ij}$ , définit par:

[27]

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } K_{ij} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } K_{ij} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{II. 25})$$

Avec:

- ❖  $i=1,3$ : numéro du bras
- ❖  $j=1,4$ : numéro de l'interrupteur du bras

### II.3.3.2. relation entre les fonctions de connexion

Si on utilise la commande complémentaire pour un bras ( $i$ ): [27]

$$C_{i1} = \overline{C_{i4}} \& C_{i2} = \overline{C_{i3}} \quad (\text{II.26})$$

Alors on peut en déduire les relations entre les fonctions de connexion des différents interrupteurs ( $K_{ij}$ ) du bras ( $j$ ):

$$\begin{cases} F_{i1} = 1 - F_{i4} \\ F_{i2} = 1 - F_{i3} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

On se basant sur cette commande complémentaire, on peut remarquer que pour chaque bras d'onduleur ( $i$ ), on peut définir deux cellules de commutation à deux interrupteurs chacune:

- ❖ Cellule n° 1 constituée par la paire d'interrupteurs:  $K_{i1} \& K_{i4}$
- ❖ Cellule n° 2 constituée par la paire d'interrupteurs:  $K_{i2} \& K_{i3}$  On peut définir des fonctions de commutation pour chaque cellule:

$F_i^1$ : Fonction de commutation relative à la cellule n°1

$F_i^2$ : Fonction de commutation relative à la cellule n°2

On peut exprimer les fonctions de connexion des interrupteurs comme suit:

$$F_{i1}(t) = \frac{1}{2} [1 + F_i^1(t)] \quad (\text{II.28})$$

$$F_{i2}(t) = \frac{1}{2} [1 + F_i^2(t)] \quad (\text{II.29})$$

$$F_{i4}(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + F_i^1 \left( t - \frac{T}{2} \right) \right] \quad (\text{II.30})$$

$$F_{i3}(t) = \frac{1}{2} \left[ 1 + F_i^2 \left( t - \frac{T}{2} \right) \right] \quad (\text{II.31})$$

### II.3.3.3. fonction de connexion des demi – bras

On définit la fonction de connexion du demi – bras par  $F_{im}^b$ , tel que [27]:

$$\text{❖ Pour le demi – bras du haut, } m= 1 \text{ et } F_{i1}^b = F_{i1} \cdot F_{i2} \quad (\text{II. 32})$$

$$\text{❖ Pour le demi – bras du bas, } m= 0 \text{ et } F_{i0}^b = F_{i3} \cdot F_{i4} \quad (\text{II. 33})$$

$$\left[ \begin{array}{l} F_{im}^b = 1 \\ \forall m = 0,1 \end{array} \right] \Leftrightarrow \left[ \begin{array}{l} F_{i1} = F_{i2} = 1 \\ \text{ou} \\ F_{i3} = F_{i4} = 1 \end{array} \right] \Leftrightarrow \left[ \begin{array}{l} K_{i1} \& K_{i2} \text{ sont fermés} \\ \text{ou} \\ K_{i3} \& K_{i4} \text{ sont fermés} \end{array} \right] \quad (\text{II. 34})$$

$$\left[ \begin{array}{l} F_{im}^b = 0 \\ \forall m = 0,1 \end{array} \right] \Rightarrow [ \text{ dans tous les cas} ] \quad (\text{II. 35})$$

#### II.3.3.4. table d'excitation des interrupteurs

Si on considère la commande complémentaire optimale qui permet d'avoir les niveaux  $(-U_C, 0, +U_C)$ :

**Tableau II.2** *Tableau des excitations relatif au bras (i)*

| $V_{iM}$ | $F_{i1}$ | $F_{i2}$ |
|----------|----------|----------|
| $+ U_C$  | 1        | 1        |
| 0        | 1        | 0        |
| $- U_C$  | 0        | 0        |

#### II.3.4. modèle de connaissance de l'onduleur

##### II.3.4.1. les fonctions de conversion [27]

a. calcul des tensions polaires  $V_{AM}, V_{BM}, V_{CM}$

Calcul des tensions de sortie de l'onduleur triphasé par rapport au point milieu source (M) de la continue

$$V_{AM} = V_A - V_M = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{c1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{c2} \quad (\text{II.36})$$

$$V_{BM} = V_B - V_M = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{c1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{c2} \quad (\text{II.37})$$

$$V_{CM} = V_C - V_M = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{c1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{c2} \quad (\text{II.38})$$

En utilisant les fonctions de connexion des demis – bras, on obtient:

$$V_{AM} = F_{11}^b \cdot U_{C1} - F_{10}^b \cdot U_{C2} \quad (\text{II. 39})$$

$$V_{BM} = F_{21}^b \cdot U_C - F_{20}^b \cdot U_{C2} \quad (\text{II. 40})$$

$$V_{CM} = F_{31}^b \cdot U_{C1} - F_{30}^b \cdot U_{C2} \quad (\text{II. 41})$$

On obtient:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C2} \quad (\text{II. 42})$$

La forme matricielle obtenue révèle que l'onduleur à trois niveaux est équivalent à une mise en série de deux ondulateurs à deux niveaux

De plus si on suppose que:  $U_{C1} = U_{C2} = U_C = E / 2$  (  $E$  : tension continu délivrée par l'étage continu), on aboutit à:

$$V_{AM} = (F_{11}^b - F_{10}^b) \cdot U_C \quad (\text{II. 43})$$

$$V_{BM} = (F_{21}^b - F_{20}^b) \cdot U_C \quad (\text{II. 44})$$

$$V_{CM} = (F_{31}^b - F_{30}^b) \cdot U_C \quad (\text{II. 45})$$

Ou la forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_C \quad (\text{II. 46})$$

b. calcul des tensions composées à la sorties de l'onduleur

$$V_{AB} = V_{AM} - V_{BM} = (F_{11}^b - F_{10}^b) \cdot U_C - (F_{21}^b - F_{20}^b) \cdot U_C \quad (\text{II. 47})$$

$$V_{BC} = V_{BM} - V_{CM} = (F_{21}^b - F_{20}^b) \cdot U_C - (F_{31}^b - F_{30}^b) \cdot U_C \quad (\text{II. 48})$$

$$V_{CA} = V_{CM} - V_{AM} = (F_{31}^b - F_{30}^b) \cdot U_C - (F_{11}^b - F_{10}^b) \cdot U_C \quad (\text{II. 49})$$

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_C \quad (\text{II. 50})$$

c. calcul des tensions simples à la sortie de l'onduleur

On suppose une charge équilibrée et couplée en étoile et soit (N ) le neutre de la charge; on obtient:

$$V_{AN} = V_A - V_N = V_A \quad (\text{II.51})$$

$$V_{BN} = V_B - V_N = V_B \quad (\text{II.52})$$

$$V_{CN} = V_C - V_N = V_C \quad (\text{II.53})$$

D'après le diagramme vectoriel des tensions (simples et composées), on obtient:

$$\begin{aligned}
V_A &= \frac{V_{AB} - V_{CA}}{3} \\
V_B &= \frac{V_{BC} - V_{AB}}{3} \\
V_C &= \frac{V_{CA} - V_{BC}}{3}
\end{aligned} \tag{II.54}$$

D'où les tensions simples:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_c \tag{II.55}$$

d. calcul des courants sources

Le but est de trouver les expressions des courants sources continus ( $I_{d1}$ ,  $I_{d2}$  et  $I_{d0}$ ) en

fonction des courants alternatifs de la charge ( $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ ), en utilisant les fonctions de connexions des interrupteurs (II-6):

$$I_{d1} = (F_{11} \cdot F_{12}) \cdot I_A + (F_{21} \cdot F_{22}) \cdot I_B + (F_{31} \cdot F_{32}) \cdot I_C \tag{II.56}$$

$$I_{d2} = (F_{13} \cdot F_{14}) \cdot I_A + (F_{23} \cdot F_{24}) \cdot I_B + (F_{33} \cdot F_{34}) \cdot I_C \tag{II.57}$$

$$I_{d0} = (F_{11} \cdot F_{13}) \cdot I_A + (F_{21} \cdot F_{23}) \cdot I_B + (F_{31} \cdot F_{33}) \cdot I_C \tag{II.58}$$

En introduisant la notion de fonction de connexion des demis – bras (II-13 et 14):

$$I_{d1} = F_{11}^b I_A + F_{21}^b \cdot I_B + F_{31}^b \cdot I_C \tag{II.59}$$

$$I_{d2} = F_{10}^b \cdot I_A + F_{20}^b \cdot I_B + F_{30}^b \cdot I_C \tag{II.60}$$

L'équation au nœud, permet d'écrire:

$$I_{d0} = I_A + I_B + I_C - I_{d1} - I_{d2} \tag{II.61}$$

Si on remplace les courants continus ( $I_{d1}$  et  $I_{d2}$ ) par leurs expressions relatives, on obtient:

$$I_{d0} = I_A + I_B + I_C - (F_{11}^b + F_{10}^b)I_A - (F_{21}^b + F_{20}^b)I_B - (F_{31}^b + F_{30}^b)I_C \tag{II.62}$$

On aboutit à la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 1 - F_{11}^b - F_{10}^b & 1 - F_{21}^b - F_{20}^b & 1 - F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \tag{II.63}$$

### II.3.4.2. matrice de conversion simple [N(t)]

Si on choisi comme variables d'états pour l'ensemble, sources de tension continues, onduleur

de tension à trois niveaux et charge triphasée à caractère inductive, le vecteur d'état suivant:

$$X = [U_{C1} \quad U_{C2} \quad I_A \quad I_B \quad I_C]^T \quad (\text{II.64})$$

Et comme variables d'entrées, le vecteur suivant:

$$U_{SM} = [V_A \quad V_B \quad V_C \quad I_{d1} \quad I_{d2} \quad I_{d0}]^T \quad (\text{II.65})$$

On obtient, la matrice de conversion simple  $[N(t)]$ , définie par la relation:

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.66})$$

Avec l'introduction des expressions des tensions simples (II-36), on définit la matrice de conversion simple:

$$[N(t)] = \begin{bmatrix} \frac{2F_{11}^b - F_{21}^b - F_{31}^b}{3} & \frac{-(2F_{10}^b - F_{20}^b - F_{30}^s)}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2F_{21}^b - F_{11}^s - F_{31}^b}{3} & \frac{-(2F_{21}^b - F_{10}^b - F_{30}^s)}{3} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{2F_{31}^b - F_{21}^s - F_{11}^b}{3} & \frac{-(2F_{30}^s - F_{20}^s - F_{10}^b)}{3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_0^b) & (1 - F_{21}^b - F_{22}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (\text{II.67})$$

### II.3.4.3. matrice de conversion composée $[M(t)]$

Si on utilise les tensions composées, le vecteur des entrées devient:

$$U_{COM} = [U_{AB} \quad U_{BC} \quad U_{CA} \quad I_{d1} \quad I_{d2} \quad I_{d0}]^T \quad (\text{II.68})$$

On obtient, la matrice de conversion composée  $M(t)$ , définie par la relation:

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \\ I_{d1} \\ I_{d2} \\ I_{d0} \end{bmatrix} = [M(t)] \begin{bmatrix} U_C \\ U_{C2} \\ I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (\text{II.69})$$

Avec l'introduction des expressions des tensions composées (II-31), on définit la matrice de conversion composée:

$$[M(t)] = \begin{bmatrix} (F_{11}^b - F_{21}^b) & -(F_{10}^b - F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{21}^b - F_{31}^b) & -(F_{20}^b - F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{31}^b - F_{11}^b) & -(F_{30}^b - F_{10}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b - F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b - F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b - F_{30}^b) \end{bmatrix} \quad (II.70)$$

### II.3.5. Stratégie de commande de l'onduleur a trois niveaux

#### II.3.5.1. les différentes stratégies de commande de l'onduleur

Les différentes stratégies de commande de l'onduleur à trois niveaux, peuvent être classées comme suit:

- ❖ Commande à pleine onde
- ❖ Commande à modulation de largeurs d'impulsions (MLI sinusoïdale)
- ❖ La modulation vectorielle

##### II.3.5.1.1. Commande classique à pleine onde [28] [27]

La tension de sortie est formée de créneaux rectangulaire, riche en harmoniques. Le filtrage de cette tension rectangulaire, à la fréquence industrielle, est lourd, coûteux et les résultats médiocres. D'où la nécessité de la modulation de largeur d'impulsion.

##### II.3.5.1.2. Commande à modulation de largeurs d'impulsions (MLI sinusoïdale) [27]

La MLI consiste alors à former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable, en adoptant une fréquence de commutation supérieure à celle des grandeurs de sortie de l'onduleur, ainsi elle permet:

- ❖ De repousser vers, des fréquences élevées, les harmoniques de la tension de sortie; ce qui facilite le filtrage.
- ❖ De faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie.

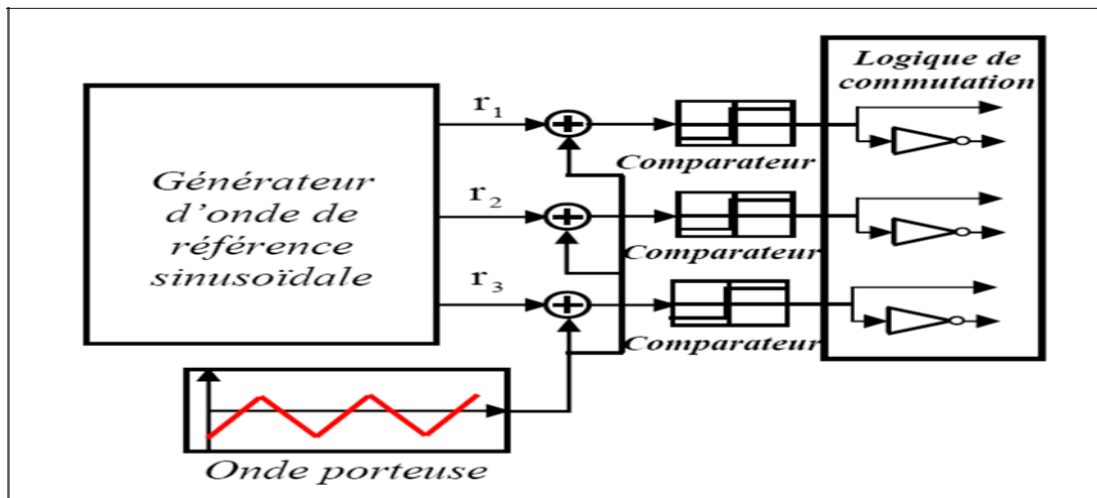
Cependant, l'essor de la modulation MLI est lié aux progrès du développement des interrupteurs semi - conducteurs de puissance, la montée en fréquence de découpage limite la puissance transmise et augmentent les pertes par commutations.

Les caractéristiques de la modulation sinusoïdale sont [28] [27]

- ❖ L'indice de modulation  $m$  égal au rapport de la fréquence  $f_p$  de la porteuse à la fréquence  $f_r$  de la référence:  $m = f_p / f_r$
- ❖ Le coefficient à tension crête  $U_{pm}$  de la porteuse:  $r = V_m / U_{pm}$
- ❖ Le facteur d'évaluation des performances de la MLI, le facteur de distorsion totale des harmoniques de la tension de sortie  $THD_v$ , définit 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:

$$THD_v = \frac{(\sum_{i=2}^n V_i^2)^{1/2}}{(\sum_{i=1}^n V_i^2)^{1/2}} \quad (\text{II.71})$$

La commande triangulo – sinusoïdale de base [28] [27], consiste à utiliser les intersections d'une onde de référence ou modulante, généralement triangulaire ou en dents de scie, unipolaires ou bipolaires. Cette technique exige une commande séparée pour chaque phase de l'onduleur. La détermination des instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs est réalisée en temps réel, par une électronique de commande analogique ou numérique ou parfois hybride. La figure ci-dessous illustre le principe de base de cette technique.



Figure( II.4): Schéma de principe de la technique triangulo – sinusoïdale [27]

### II.3.5.2. commande à MLI à deux porteuses en dent de scie unipolaires

#### II.3.5.2.1. définition des ondes porteuses

Cette stratégie exploite l'équivalence de l'onduleur à trois niveaux à deux onduleurs à deux niveaux. On utilise deux porteuses identiques, triangulaires unipolaires, déphasées, dans le temps, d'une demi période de hachage ( $1/2 f_p$ ) et décalées l'une par rapport à l'autre d'un niveau de tension  $U_{pm}$ , afin de réduire le taux d'harmoniques des tensions de sorties. Les

porteuses triangulaires offrent des tensions de sortie ayant une symétrie par rapport au quart et à la demi période [27]. Les deux ondes porteuses sont définies par les équations suivantes:

$$U_{p1}(t) = \begin{cases} 2U_{pm} \cdot \frac{t}{T_p}; & \text{pour } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ 2U_{pm} \left(1 - \frac{t}{T_p}\right); & \text{pour } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad (II.72)$$

ET

$$U_{p2}(t) = U_{p1}(t) - U_{pm}$$

### II.3.5.2.2. algorithme de commande

Pour un bras ( $i$ ), la stratégie de commande se résume en deux étapes: [27]

- ❖ Etape 1 : détermination des signaux intermédiaires  $V_{i1}$ ,  $V_{i0}$

$$\begin{cases} (V_{ref,i} \geq U_{p1}) \Rightarrow V_{i1} = +U_c \\ (V_{ref,i} < U_{p1}) \Rightarrow V_{i1} = 0 \end{cases} \text{ et } \begin{cases} (V_{ref,i} \geq U_{p2}) \Rightarrow V_{i0} = 0 \\ (V_{ref,i} < U_{p2}) \Rightarrow V_{i0} = -U_c \end{cases} \quad (II.73)$$

- ❖ Etape 2 : détermination du signal  $V_{i2}$  et des signaux de commande  $C_{ij}$  des interrupteurs

$$\begin{cases} V_{i2} = +U_c \Rightarrow C_{i1} = 1, C_{i2} = 1 \\ V_{i2} = -U_c \Rightarrow C_{i1} = 0, C_{i2} = 0 \\ V_{i2} = 0 \Rightarrow C_h = 1, C_{i2} = 0 \end{cases} \text{ avec } \begin{cases} V_{i2} = V_{i0} + V_{i1} \\ C_{i3} = C_{i2} \\ C_{i4} = C_{i1} \end{cases} \quad (II.74)$$

## II.4 Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la modélisation de la machine asynchrone alimentée par un onduleur triphasé multi-niveaux de type NPC, nous avons commencé par les équations électriques et mécaniques sous des hypothèses simplificatrices et utilisation de la transformation de park qui permet le passage de la représentation triphasée au celle biphasée pour simplifier les équations et les système mathématiques.

Ensuite, nous avons présenté la modélisation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC et voir les trois configurations possibles qui sont mises en œuvre. Ainsi que les deux matrices de conversion simple et composée.

Enfin, on a établi quelques stratégies de commande des onduleurs à trois niveaux, et nous avons basé a la commande à MLI à deux porteuses triangulaire unipolaires.

**Chapitre III**

**Simulation et Interprétation**

**des Résultats**

## III-1 Introduction

Le principe est semblable à celui utilisé pour la simulation analogique mais tout ce qui était réalisé avec du "matériel" sera remplacé par un logiciel exécuté par un ordinateur.

Le réglage des paramètres effectué à l'aide du clavier est beaucoup plus aisé que sur les simulateurs analogiques, une liaison "physique" avec l'extérieur est possible grâce aux cartes de conversion analogique numérique d'entrée et numérique de sortie.

Donc les performances des logiciels par exemple Matlab, Matrix, Syssi,..., nous permet de simuler les modèles non linéaires, ces logiciels permet aussi de :

- ❖ Tracer le schéma fonctionnel sur l'écran de l'ordinateur.
- ❖ Entrer en mémoire les valeurs des coefficients des fonctions de transfert.
- ❖ Simuler les entrées.
- ❖ Enregistrer les grandeurs significatives.
- ❖ Tracer les réponses temporelles ou fréquentielles à l'écran puis les sortir sur "papier" à l'aide d'une imprimante en mode graphique.

Dans cette étude nous avons utilisé le *MATLAB/SIMULINK* comme moyen de simulation de notre système.

### III.2. Présentation de l'environnement *MATLAB/SIMULINK*TM:

*MATLAB* est un logiciel destiné principalement au calcul scientifique, à la modélisation et à la simulation. Le noyau de calcul est associé à l'environnement *SIMULINK*, permettant une modélisation basée sur des schémas-blocs.

Des bibliothèques spécialisées sont disponibles (les "Toolboxes") pour la plupart des domaines scientifiques nécessitant des moyens de calcul importants : automatique, traitement de signal, mathématiques appliquées, télécommunications, etc.....

Des modules temps réel, développés autour des produits *dSPACE* (*Real Time Interface*, *TRACE*, *COCKPIT*) sont également proposés et rendent l'environnement de travail particulièrement attractif : l'utilisateur dispose en effet de tous les outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision.

#### III.2.1. Matlab:

Un système interactif et convivial de calcul numérique et de visualisation graphique, destiné aux ingénieurs et scientifiques. Il possède un langage de programmation à la fois puissant et

simple d'utilisation. Il permet d'exprimer les problèmes et solutions d'une façon aisée, contrairement à d'autres langages de programmation. Il intègre des fonctions d'analyse numérique, de calcul matriciel, de traitement de signal, de visualisation graphique 2D et 3D, etc....., il peut être utilisé de façon interactive ou en mode programmation. En mode interactif, L'utilisateur à la possibilité de réaliser rapidement des calculs sophistiqués et d'en présenter les résultats sous forme numérique ou graphique. En mode programmation, il est possible d'écrire des scripts (*programmes*) comme avec d'autres langages l'utilisateur peut aussi créer ses propres fonctions pouvant être appelées de façon interactive ou par des scripts. Ces fournissent à *MATLAB* un atout inégalable : son extensibilité. Ainsi, l'environnement *MATLAB* peut facilement étendu. Dans *MATLAB*, l'élément de base est la matrice. L'utilisateur ne s'occupe pas des allocations de mémoire ou de redimensionnement comme dans les langages classiques. Les problèmes numériques peuvent être résolus en un temps record, qui ne représente qu'une infime du temps à passer avec d'autres langages comme le Basic, C, C++ ou le fortran. *MATLAB* s'est imposé dans les milieux universitaire et industriel comme un outil puissant de modélisation, de simulation et de visualisation de problèmes numériques. Dans le monde universitaire *MATLAB* est utilisé pour l'enseignement de l'algèbre linéaire, traitement du signal, l'automatique, etc., ainsi que dans la recherche scientifique. Dans le domaine industriel, il est utilisé pour la résolution et la simulation de problèmes d'ingénierie et de prototypage. *MATLAB* est une abréviation de *MATrixLABoratoire*. écrit à l'origine, en Fortran, par *CleveMoler*, *MATLAB* était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets *LINPACK* et *EISPACK*.

### III.2.2. Simulink :

(*SIMULENK*)est un programme pour la simulation des systèmes dynamique linéaires et non linéaires ; une (*MATLAB*),dans laquelle la définition des modèles se fait par schémas blocs (diagramme structurel). Le diagramme structurel permet la représentation graphique d'un système d'équations linéaires et non linéaires. Il met en évidence la structure du système et permet de visualiser les interactions entre les différentes grandeurs internes et externes. On distingue alors particulièrement bien les contre- réactions, les couplages réciproques, les non-linéarités, etc. les éléments qui composent le diagramme structurel représentent des opérations mathématiques, à savoir addition, soustraction, multiplication avec un coefficient, intégration et différentiation, ainsi que la multiplication et la division de deux variables et la fonction non linéaire d'une variable. *SIMULINK* possède une interface outils nécessaires à l'élaboration d'une application sur procédé réel, de la simulation à la supervision graphique

pour visualiser les résultats sous forme de graphiques ou de valeurs numériques en cours de simulation. Les paramètres régissant le fonctionnement des systèmes peuvent être modifiés en ligne, c'est-à-dire en cours de simulation, et l'on peut observer leur effet immédiatement. *SIMULINK* est bâti autour d'une bibliothèque de blocs (bibliothèques) classés par catégories. Les principales bibliothèques sont montrées dans le tableau.

### III.3. Simulation et interprétation des résultats:

Après l'étude théorique de la machine asynchrone et son alimentation, nous présentons une analyse par simulation numérique sous l'environnement *Matlab - Simulink*.

Dans cette partie, nous avons simulé la *MAS* associée à un onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type *NPC*, contrôlé par une *MLI* sinusoïdale à deux porteuses triangulaires unipolaires.

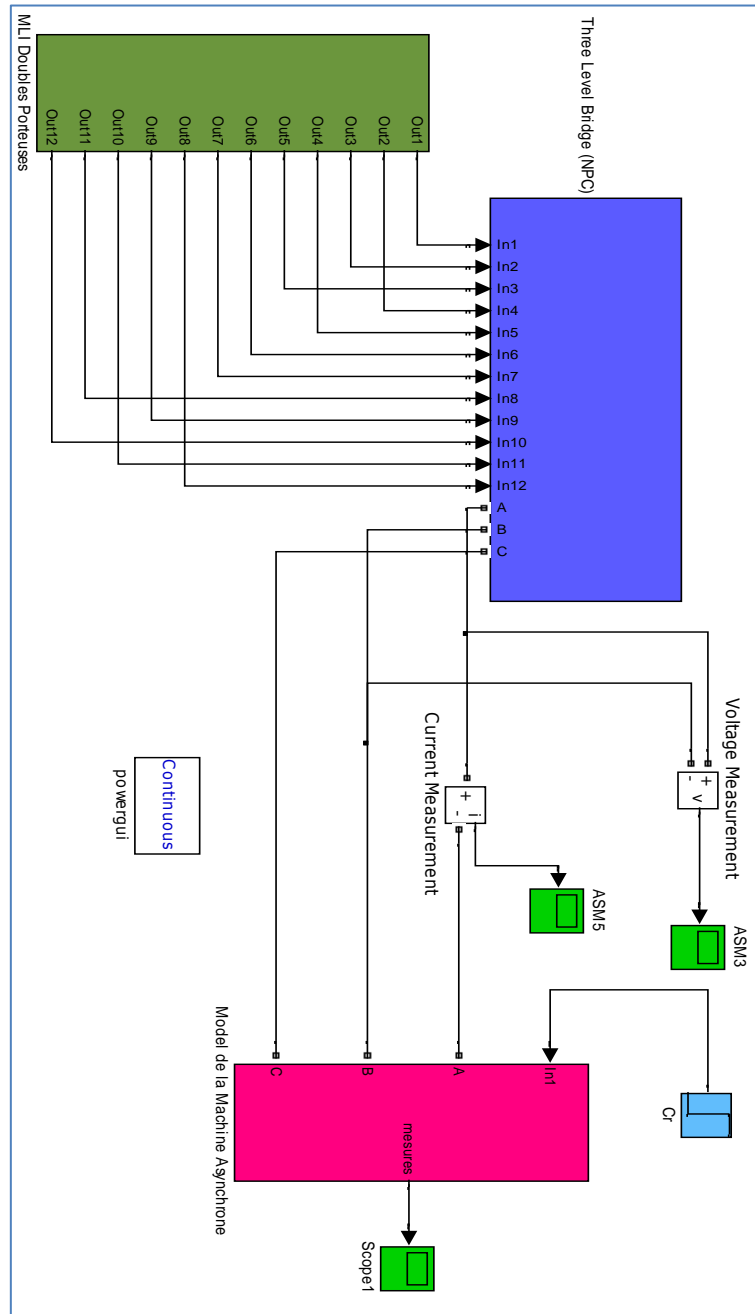
L'objectif de cette partie de simulation est d'utiliser l'onduleur multi-niveaux comme un outil pour minimiser les harmoniques à l'entrée de la machine asynchrone et aussi pour la variation de la vitesse de notre machine (boucle ouverte).

On présente d'abord l'association convertisseur – machine à vide, puis application d'une charge de 15 (*N. m*) à  $t=1$  (s).

On va choisir les deux paramètres de réglage pour la commande de l'onduleur:

- ❖ Fréquence des porteuses  $f_p=4.85$  *GHz*, C'est-à-dire un indice de modulation  $m=97$
- ❖ Coefficient de réglage  $r=0.886$ .

### III.3.1. Les blocs de la simulation



**Figure (III.1) :** Schéma bloc de la MAS alimentée par un onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type NPC

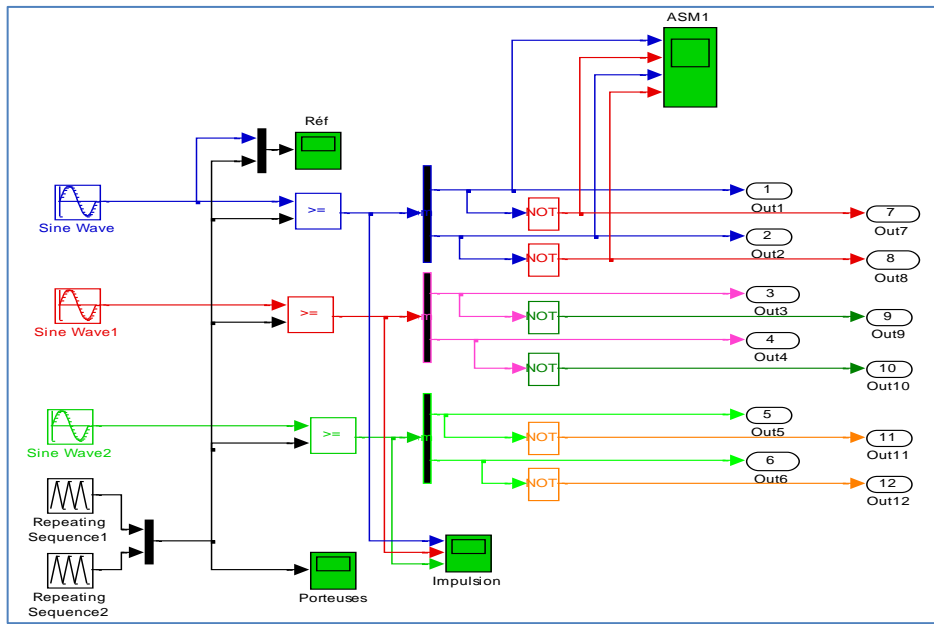


Figure (III.2) : Schéma de simulation de la MLI sinusoïdale à deux porteuses

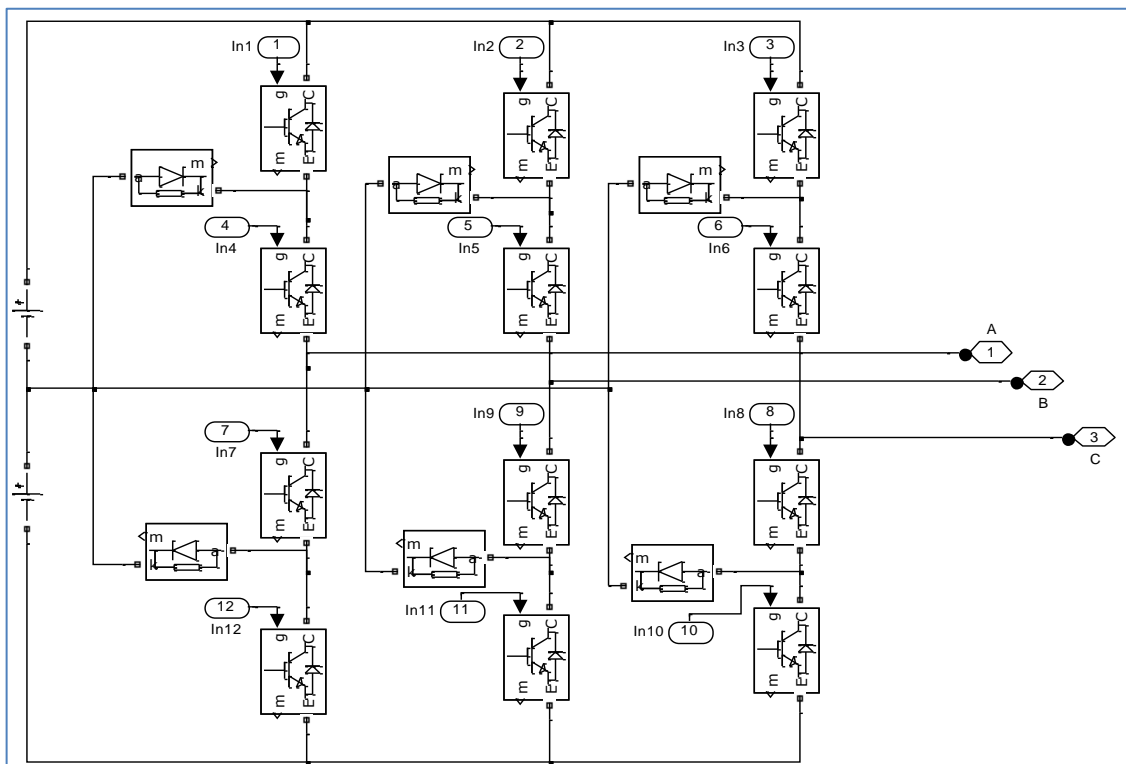


Figure (III.3) : Schéma de la simulation de l'onduleur de tension multi-niveaux de type NPC (trois niveaux)

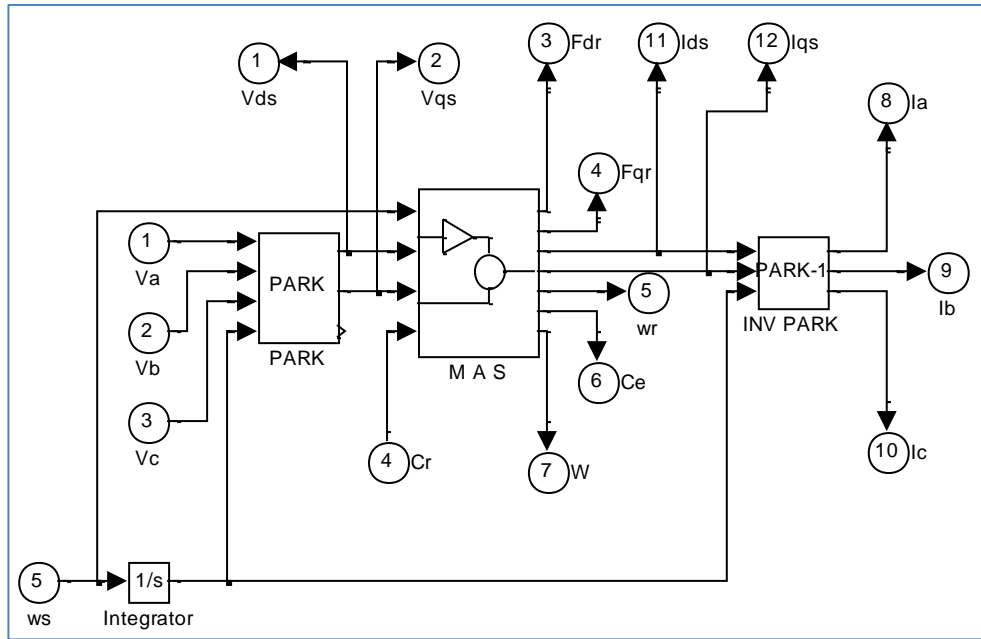
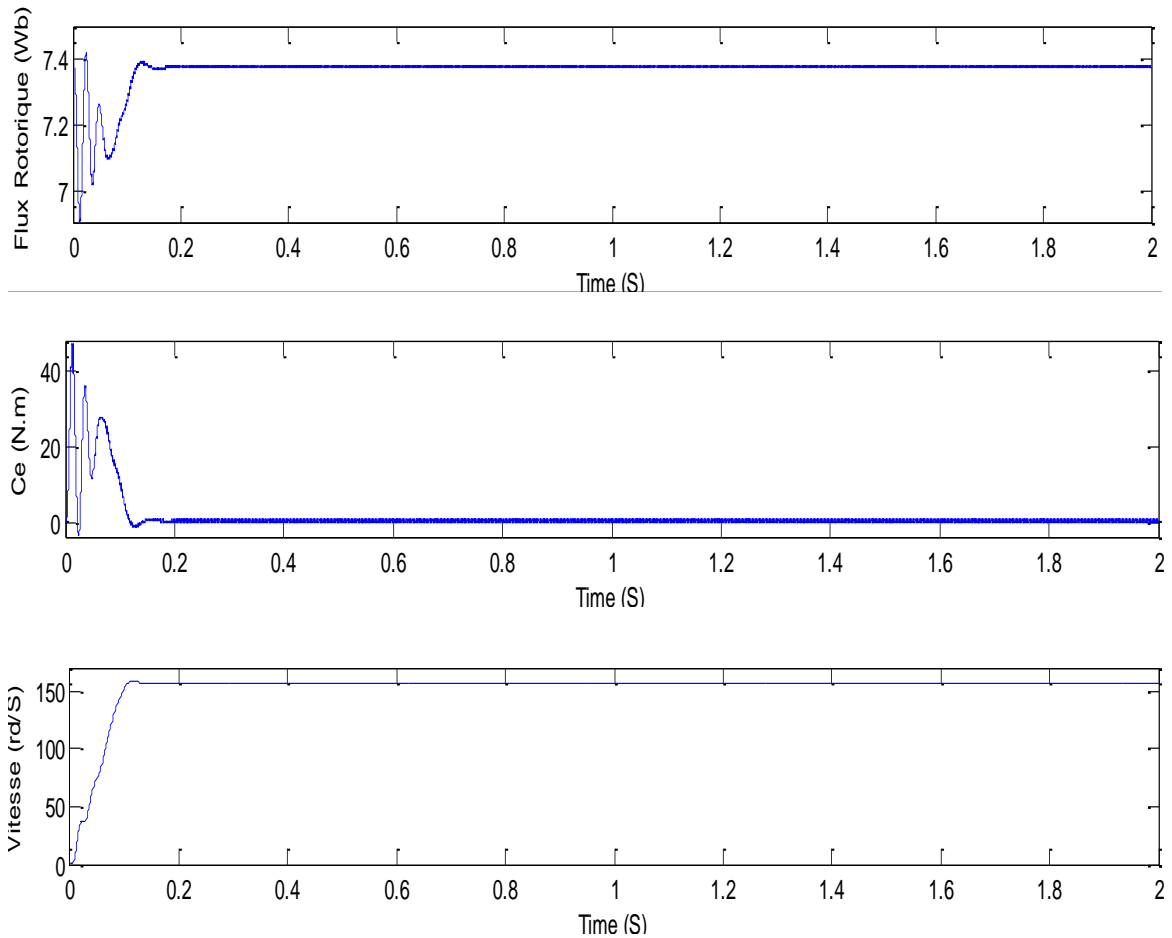
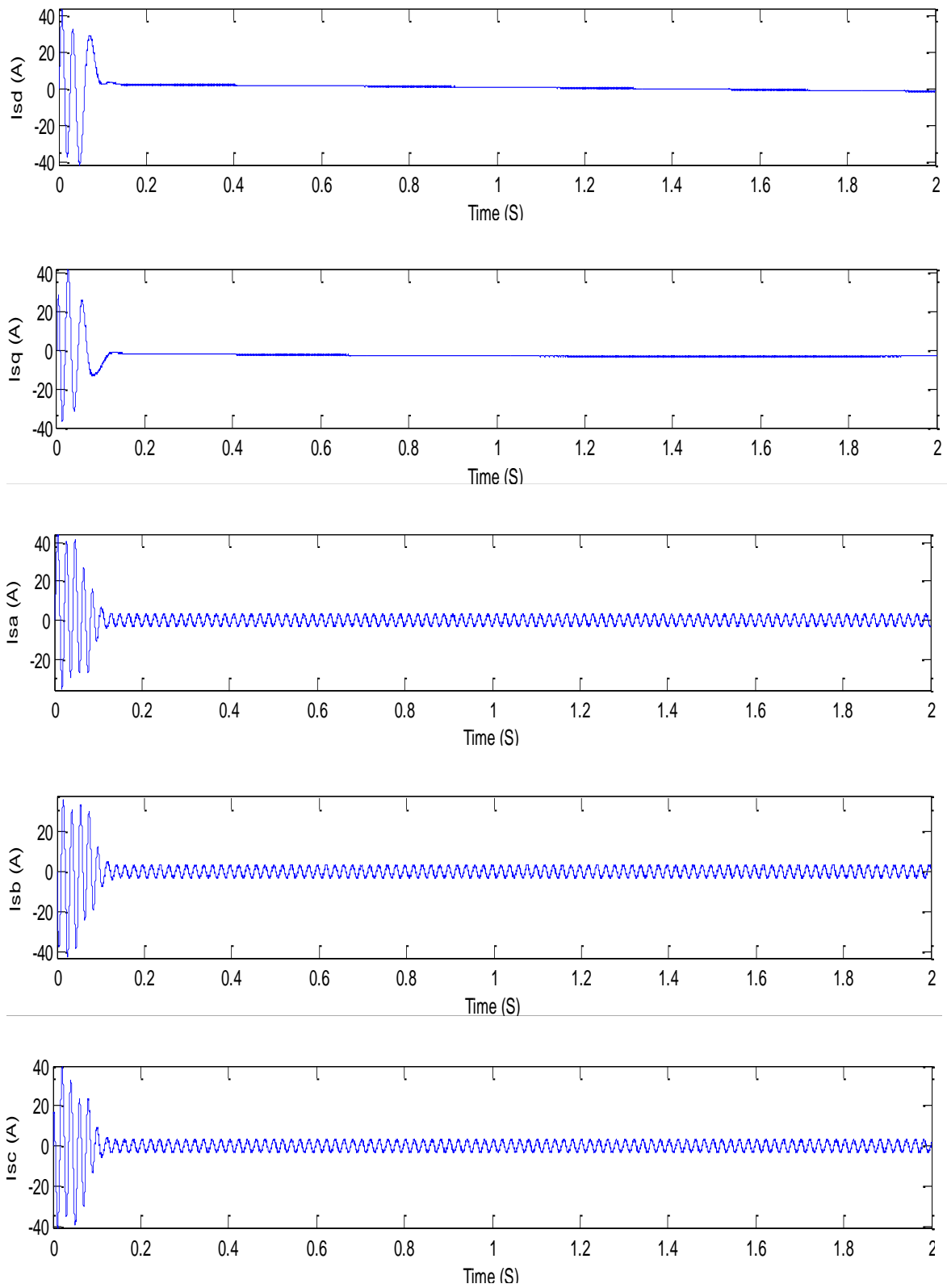


Figure (III.4) Schéma de simulation de la Machine Asynchrone

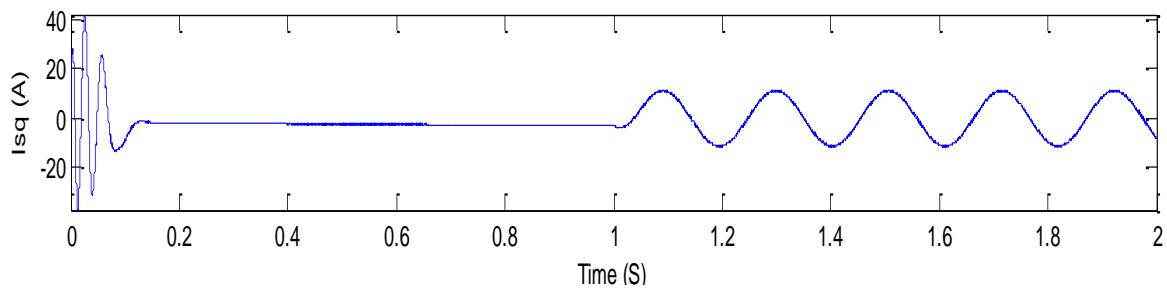
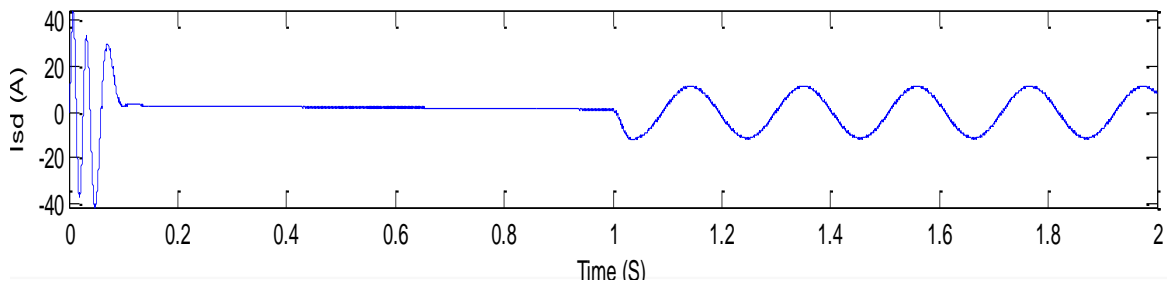
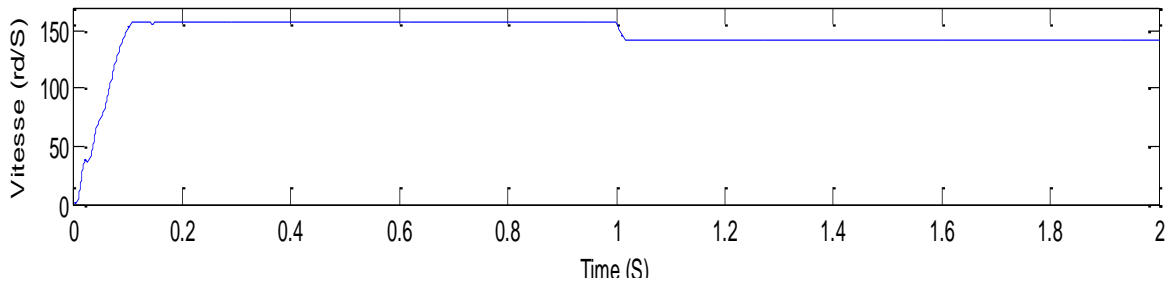
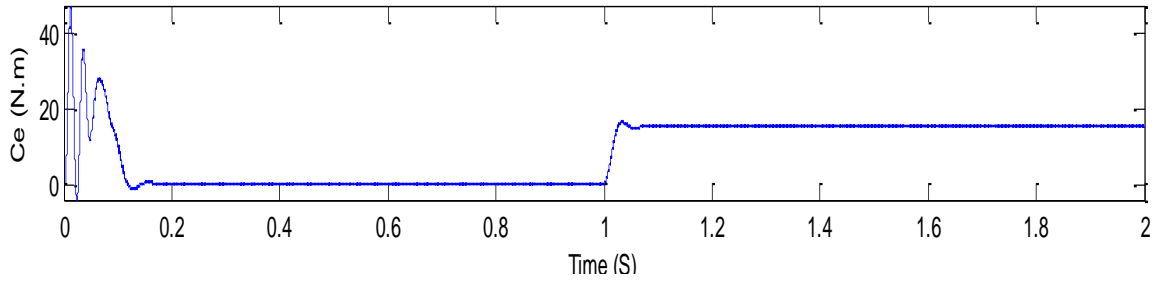
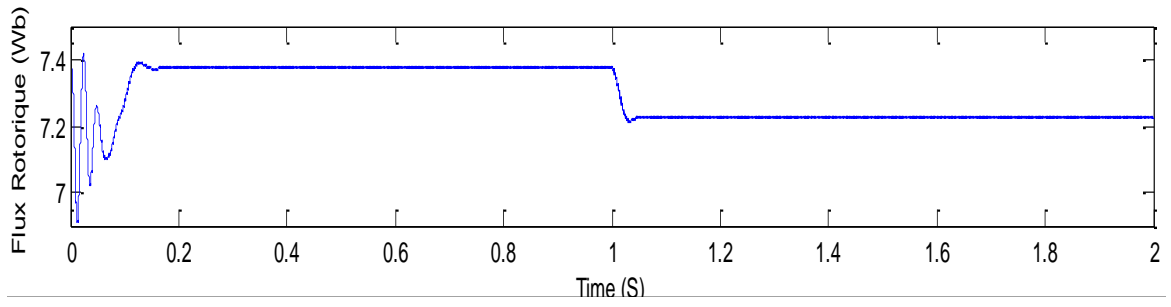
**III.3.2. Résultats de la simulation à vide:**

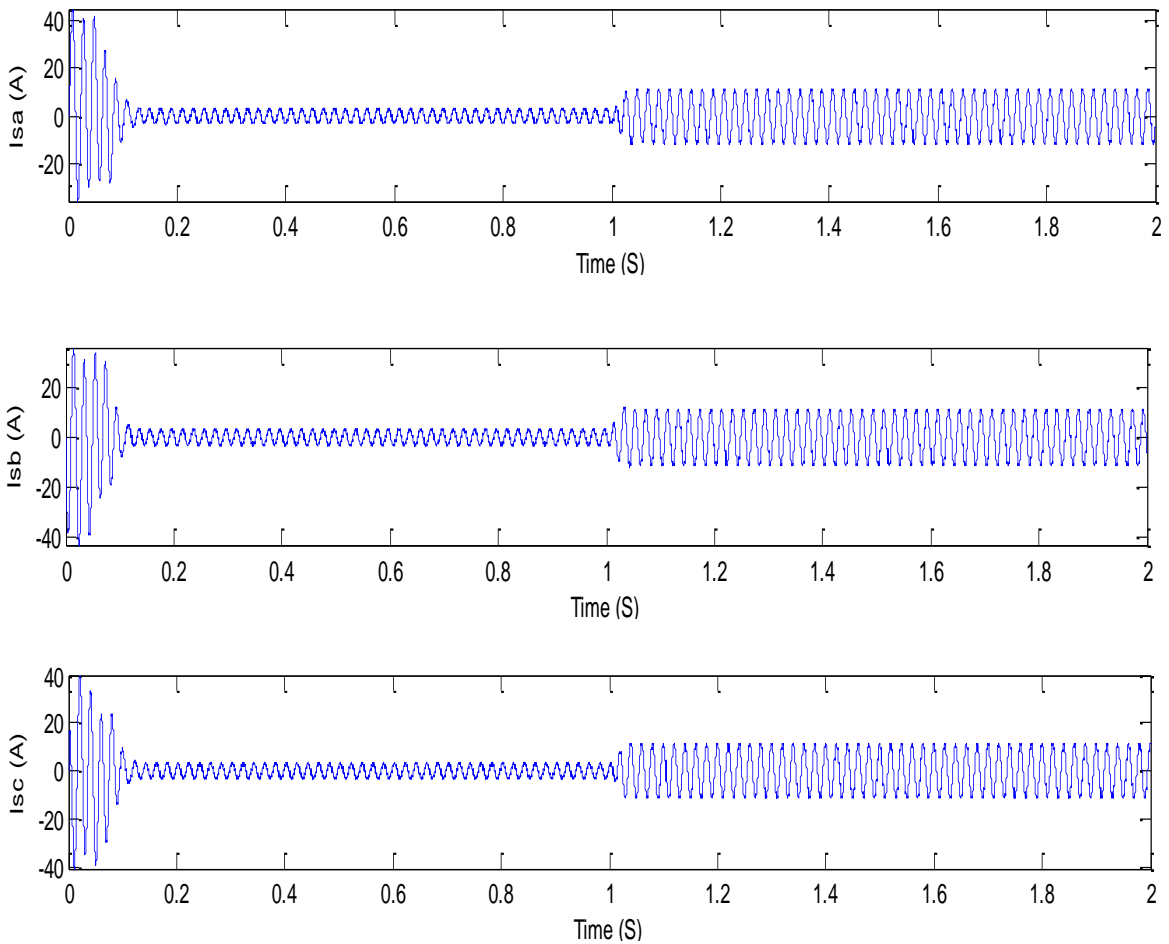




**Figure (III.5) :** La réponse de la MAS à vide alimentée par un onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type NPC

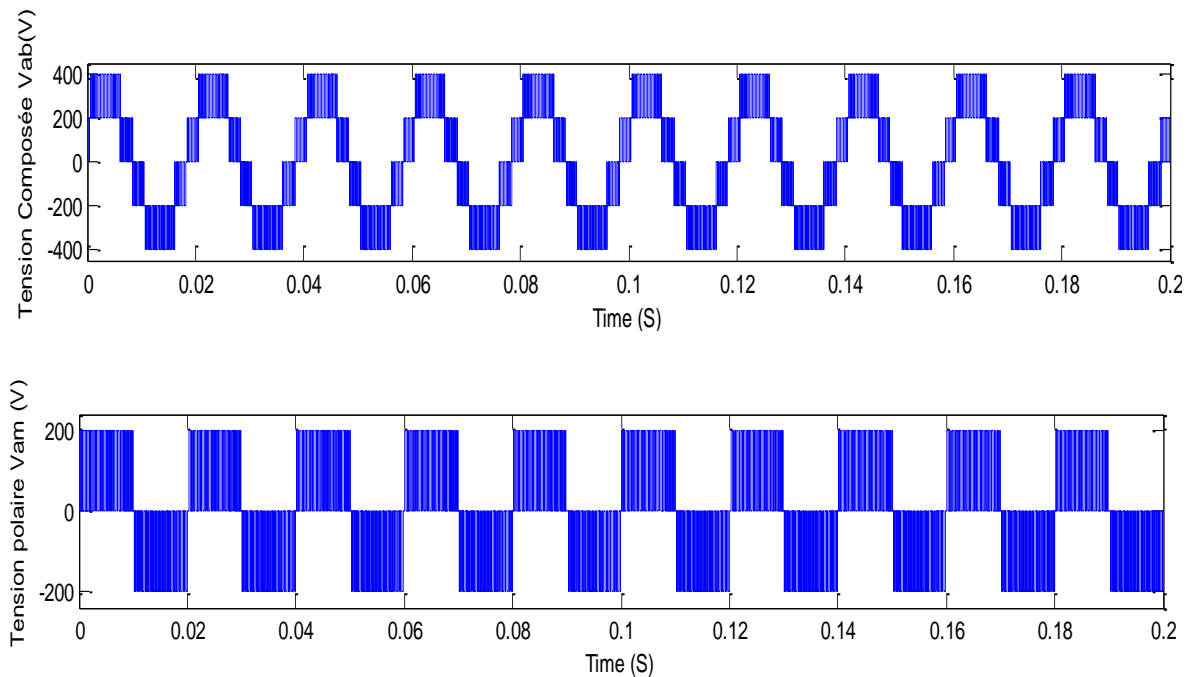
**III.3.3. Résultats de la simulation en charge à  $t=1$  s :**





*Figure (III.6) : La réponse de la MAS en charge à  $t=1$  s*

**III.3.4. Résultats de la simulation des tensions d'alimentation de la machine:**



*Figure (III.7) : Les tensions d'alimentation de la machine*

### III.3.5. Discussion:

**a. à vide:** La figure(III.5)présente les résultats de simulation de la MAS à vide, alimentée par un onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type NPC contrôlé par une MLI sinusoïdale à deux porteuses triangulaires unipolaire, cette figure montre que:

- ❖ Le courant de démarrage vaut 40 (A) c'est-à-dire cinq fois la valeur normale (8.2 A), cet courant d'alimentation des enrôlements statorique est moins riche d'harmoniques.
- ❖ Le couple de démarrage atteindre la valeur 48 (N.m) puis se stabilise vert le zéro après un temps de réponse (régime transitoire) de 0.15 (S).
- ❖ La vitesse aussi, atteinte sa valeur normale 157 (rad/sec) après un temps de réponse de 0.15s.

**b. En charge:** la seconde essai la figure (III.6) on applique une charge de 15 (N.m) à l'instant  $t=1(S)$ , cette charge provoque une diminution en vitesse, flux et une augmentation de la valeur des courants statoriques et celle du couple électromagnétique. Il est aussi très important de souligner que la variation du couple dépende la variation du flux, ce qui montre le couplage entre le flux et le couple.

### c. Tensions d'alimentation de la machine:

La figure(III.7) présente la tension composée entre deux phases (a) et (b) à la sortie de l'onduleur et présente aussi la tension polaire entre la phase (a) à la sortie de l'onduleur et le point milieu (M) de la source continue à l'entrée de notre convertisseur. On constate bien les trois niveaux de tensions (-UC, 0, +UC).

Le taux de distorsion d'harmonique est minimal (THD = 0.23% ) grâce à :

- ❖ L'utilisation de onduleur multi-niveaux comme convertisseur statique.
- ❖ Le choix des semi-conducteurs (pour notre cas sont les MOSFETs).
- ❖ Les bonnes paramètre de l'MLI, indice de modulation et coefficient de réglage.

### III.4. Conclusion:

Ce chapitre est uniquement consacré à la simulation numérique sous l'environnement *Matlab - Simulink*, et la discussion des résultats obtenues . notre système c'est l'association de la machine asynchrone avec un onduleur de tension multi-niveaux de type *NPC*, contrôlé par une *MLI* sinusoïdale à deux porteuses triangulaires unipolaires.

On a présenté la simulation numérique de la *MAS* et son alimentation, premièrement à vide et en suite en charge à  $t=1s$ , nous avons montré le couplage entre le couple et les deux composantes de flux, qui provoque la non linéarité de la commande de la *MAS*, en suite on a présenté les deux tensions d'alimentation (simple et polaire) de la machine.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Dans le domaine de la vitesse variable, la machine asynchrone assure actuellement une part très importante et toujours croissante du marché grâce à sa simplicité, sa robustesse et son faible coût de fabrication. Malgré tous ces avantages, l'alimentation en énergie électrique de bonne qualité pour ce type des machines reste l'objectif le plus important.

Les travaux présentés dans ce mémoire, ont été consacré à l'étude, la modélisation et la simulation numérique de la machine asynchrone alimenté par un onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type *NPC* contrôlé par une *MLI* sinusoïdale à double porteuses triangulaire unipolaires.

Dans un premier temps, et avant d'aborder cette étude, nous avons commencé par une généralité sur la machine asynchrone et leur alimentation (Redresseur, filtre, onduleur), principalement les onduleurs multi-niveaux, nous avons aussi présenté les avantages et les inconvénients de chaque élément de notre système.

Puis, nous avons présenté la modélisation de notre système en commence par la modélisation de la machine asynchrone, La modélisation de la *MAS* est basée sur la transformation de Park, ce qui permet de simplifier les équations de la machine électrique, les résultats obtenus montrent bien la validité du modèle de Park pour la détermination des différentes caractéristiques de la machine. Puis nous avons présenté la modélisation de alimentation de la machine c'est-à-dire le redresseur triphasé non commandé, le filtre LC et l'onduleur de tension à trois niveaux de type *NPC*, cette partie, nous a permet de mettre en évidence, l'apport d'un onduleur à trois niveau dans la conduite de la *MAS*. On a commencé par présenter la structure topologique d'un onduleur de tension triphasé à trois niveaux de type *NPC*, dit à diode de bouclage, en passant en revue ses avantages par rapport à un onduleur classique à deux niveaux. En définissant le modèle de l'interrupteur bidirectionnel en courant, on a pu déterminer son modèle en mode commandable, en optant pour une commande complémentaire optimale des interrupteurs. Par la suite on a présenté les différentes stratégies de modulation pour la commande de l'onduleur, ensuite, on a opté pour une modulation sinusoïdale à deux porteuses triangulaires unipolaires, permettant, ainsi, de réduire le taux d'harmoniques des tensions de sortie.

On a présenté la simulation numérique de la *MAS* et son alimentation, premièrement à vide et en suite en charge à  $t=1s$ , nous avons montré le couplage entre le couple et les deux composantes de flux, qui provoque la non linéarité de la commande de la *MAS*, en suite on a présenté les deux tensions d'alimentation (*simple et polaire*) de la machine.

En fin, nous avons validé la simulation numérique de système dans l'environnement MATLAB /SIMULINK, ainsi que la description et la discussion des résultats obtenues. Dans ce chapitre nous avons présenté la simulation numérique de la MAS et son alimentation, premièrement à vide et en suite en charge à  $t=1s$ , nous avons montré le couplage entre le couple et les deux composantes de flux, qui provoque la non linéarité de la commande de la MAS, en suite on a présenté les deux tensions d'alimentation (*simple et polaire*) de la machine. L'association convertisseur-machine a été simulée pour voir les impacts de ce convertisseur sur la machine, et aussi pour montrer le couplage entre le couple et le flux.

Comme nous avons dit au troisième chapitre et d'après les analyses des résultats de simulation obtenue on constate que on a atteint les objectifs fixés qui sont principalement:

- Le premier c'est d'assurer une alimentation électrique permanente et de bon qualité (THD < 0.25%) c'est-à-dire la minimiser des harmoniques électrique.
- Le second est testé le fonctionnement dynamique de la machine asynchrone.

Nous avons conclu aussi que cet système pose quelque problème, lord du régime transitoire la machine asynchrone est considéré comme générateur des harmoniques, de plus les de grandeurs, flux et couple électromagnétique sont fortement couplées.

Donc en perspective nous proposons les points suivants:

- ❖ Appliquer une commande numérique et moderne pour contrôler en boucle fermé notre système tel que la commande vectorielle des machines asynchrones pour assurer le découplage entre le flux et le couple électromagnétique.
- ❖ Utilisation des onduleurs de tension avec des niveaux élevés (cinq ou sept niveaux), pour améliorer les performances spectrales des grandeurs de sortie ainsi que la conduite de la machine asynchrone.
- ❖ Introduire la *MLI* vectorielle, comme stratégies de commande de l'onduleur multi niveaux.
- ❖ Utilisation des réseaux des neurones ou la logique floue, comme stratégies de contrôle de la vitesse des machines asynchrones pour améliorer les performances de la commande.

# **ANNEXE**

---

## ANNEXE

### Paramètres de la Machine Asynchrone

#### 1- Caractéristique principale de la machine

Puissance nominale 4kw

Couple de charge nominale 25 N.m

Courant nominale 15/8.6A

Tension nominale 220/380 V

Fréquence statorique nominale 50 HZ

Vitesse nominale de rotation du rotor 1440 tr/min

Facteur de puissance nominale 0.437

Nombre de paire de pôles 2

#### 2 - Paramètres électriques

Résistance d'une phase du stator

Résistance d'une phase du rotor

Inductance propre d'une phase statorique

Inductance propre d'une phase rotorique

Inductance mutuelle

#### 3 – Paramétrés mécaniques

Moment d'inertie des masses tournantes

Coefficient de frottement

# Références

## Références:

[1] **Hamadi Safi Allah,** " Commande par retour d'état linéarisation d'une machine asynchrone et sans défaut ", Thèse de master ,Université –Msila,2015.

[2] **Abdelli, R** " Perturbations singulières appliquées au modèle de machine asynchrone avec défauts au stator et au rotor ", mémoire de magister, école nationale polytechnique d'Alger, 2007.

[3].: **Cherier.F, Amade. G,** « Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone » mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara-Boumerdès, 2009.

[4].: **E. Gaucheron,** «Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger», <http://www.schneider-electric.com>,avril2018

[5] **R.PERRET** « Entraînement électrique2 ». Edition Lavoisier 2007.

[6] **N.ARKAB, Y.BOUZIDI, F.MEHOUBI** « Identification des paramètres d'une machine asynchrone à rotor bobiné » Mémoire D.E.U.A, U.M.M.T.O 2007.

[7] **Claude CHEVASSU,** "MACHINES ÉLECTRIQUES Cours et Problèmes", école national supérieur maritime, France 2012.

[8]: **LOUHLIM,** " cours du câblage des armoires électriques institue supérieur de formation professionnel d'Annaba 2017".

[9]: **boudjlat walid, himoura abdelkader,**" étude et simulation d'une machine asynchrone alimente par un onduleur de tension a commande mli", mémoire de master, Université badji mokhtar-annaba , juin 2017.

[10]**GUERFI Youcef,**" Régulation des onduleurs multi niveaux par un régulateur à logique floue", MEMOIRE DE MAGISTER, Université badji mokhtar-annaba , 2008/2009.

[12] **Abdelkader Boukaroura**« Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph », mémoire Présenté pour l'obtention du Diplôme de magister en électrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif.2009

[11] **HESPUL** « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances »,2007

- [13] **Kamel Merabet** « Commande d'un onduleurs triphasés basée sur la dispersion de la tension Triphasée », mémoire présente à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Partielle de la maitrise en génie électrique Maitrise. Université du Québec, 2011.
- [14] **Houria Ben Zemammouch** « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010.
- [15] **MANSOURI Abdallah** « Commande des Onduleurs Multi niveaux», Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de MASTER, UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.2016.
- [16] **FaïçalMnif** « Etude et Réalisation des lois de commande par mode de Glissement et par approche Géométrique: Application à un Onduleur De Tension Monophasés », Thèse présente à l'université du Québec a Trois-Rivières Comme Exigence Pour l'obtention du Déplume de maitrise sciences appliquées en électronique industrielle, Université du Québec.1991.
- [17] **Ammiche Abdennour** «Commande des onduleurs multi-niveaux de tension à diode flottante » mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en génie électrique. Université de m'sila 2012/2013.
- [18] **BRIGHEN Haroun et HALAIMIA Safouane**,«Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale», MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master, UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA-Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie des Mines,2016.
- [19] **C.A. Martins, T.A. Meynard, X. Roboam, A.S. Carvalho**, «Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale», mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de master en électromécanique minières. UNIVERSITE LARBI TEBSSI-TEBESSA2015/2016.
- [20] **B. K. Bose**, "Power Electronics and AC Drives", Edition Practice Hall, 1986
- [21] **BAKOUCHE Yacine, BOUSEKKINE Yacine**, " Etude des performances d'une MADA alimentée par deux onduleurs à trois niveaux", MEMOIRE DE MASTER, Université A.MIRA Bejaïa , 2017/2018.
- [22] **B.REBAOUI** " Étude du déséquilibre de l'alimentation d'un onduleur multi niveaux", Mémoire Magister, 2014 Université d'Oran, Algérie.
- [23] **Sabour.K, Elazazi.S**, « Commande vectorielle da la machine asynchrone à double

alimentation » mémoire master, université AKLI Mohaned Oulhadj de Bouira, année 2015

[24] : **Ben smail Samia** « Optimisation Et Gestion d'Energie D'un Système Hybride A Energies Renouvelables », thèse de doctorat, Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information(LTII), Université A.MIRA-BEJAIA,201/2017

[25] : **K. Idjdarene** « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes », Thèse en cotutelle entre l'Université de Bejaia, Algérie et l'Université Lille 1,France, 2010.

[26] **Bendemmagh Walid** « Commande de la machine asynchrone par la cascadehyposynchrone à base des logiciels simplorer et matlab » mémoire de master,Université de Sétif 1 2013.

[27] **O. Fadli**, " *Modélisation et Commande Non Linéaire de l'Association: Machine synchrone a Aimants Permanents – Onduleur de Tension à Trois Niveaux* ", Thèse de Magister, Université de Batna, 2006

[28] **F. Labrique, G. Seguiet R. Bausier**, " *Les convertisseurs de l'électronique de puissance, Volume 4 : La conversion continu - Alternatif* ", Lavoisier, 1995..

[29].**GHERBI Faouzi. HEMICI Ali, GHOULI Djemoui** ," Modélisation et Simulation de la Commande Vectorielle Directe de la Machine Asynchrone Alimentée par un Onduleur Multi-Niveaux de Tension ", MEMOIRE DE MASTER, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued2018-2019.