

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'Électrotechnique

N° :...../2023

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: Sciences et Technologies

FILIERE: Électrotechnique

SPECIALITE: Commande électrique

Thème

**Commande prédictive de l'association Redresseur à trois niveaux
-Onduleur à trois niveaux -Machine asynchrone**

Présenté Par : BOURBIA MAROUANE

Encadré Par : Dr. LOURCI NABIL

LOTFI KRIKET

Date de soutenance: 03/07/2023

Jury de Soutenance

Président : Pr. LALILI DJAAFER	Grade Professeur	Univ MSB jijel
Encadreur : Dr. LOURCI NABIL	Grade Docteur	Univ MSB jijel
Examineur 1:Pr. LALILI DJAAFER	Grade Professeur	Univ MSB jijel
Examineur 2:Dr. MAKHLOUF BADER	Grade Docteur	Univ MSB jijel

Promotion : 2022 /2023

Remerciement

Nous remercions Allah, le tout puissant, pour nous avoir donné le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire pour affronter toutes les difficultés et les obstacles qui se sont hissés au travers de notre chemin, durant toutes nos années études.

Je remercie mes parents qui m'ont aidé et cru en moi et m'ont soutenu dans ma vie.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur M. Nabil Lourci pour le suivi continué tout le long de la réalisation de ce mémoire, et qui n'a pas cessé de nous donner des conseils et des remarques.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département électrotechnique.

DÉDICACES

- ❖ *Je dédie ce modeste travail aux plus chères personnes au monde, mes parents, pour tout leur amour, encouragements, conseils, sacrifices, et patience.*
- ❖ *Je le dédie ma sœur, mimo et a toute ma famille.*
- ❖ *A mes amis khalil, mohammed ,samy, ahmed , chouaib*
- ❖ *A khaled et tous mes amis de la promotion 2022/2023 commande électrique.*

Marouane

DÉDICACES

- ❖ *Je dédie ce travail aux deux plus chères personnes au monde, mes parents, pour tout leur amour, encouragements, conseils, sacrifices, et patience.*
- ❖ *Je le dédie bien sûr à mes frères, mes sœurs, et à toute la famille.*
- ❖ *A tous mes amis de la promotion 2022/2023 Commande électrique.*
- ❖ *A mes Amis: Ahmed, Ayoub, Walid, Mohamed, Abd Eldjali, Brahim, Salah, Radouane.*

lotfi

Résumé

Les onduleurs multi-niveaux sont de plus en plus utilisés car leur capacité de supporter des tensions d'entrée plus élevées et d'être plus efficaces pour les grandes puissances. Dans ce travail, on va essayer d'appliquer la commande prédictive sur l'onduleur à trois niveaux à diode flottante pour régler certains problèmes par l'utilisation de MATLAB /SIMULINK.

ملخص

تستخدم محولات الجهد متعددة المستويات بشكل متزايد وذلك لقدرتها على تحمل مستويات عالية من الجهد الكهربائي وفي هذا العمل سنقوم بتطبيق منهج التنبؤي للتحكم في العاكس ثلاثي المستويات وذلك لمحاولة حل بعض المشاكل التي ستصادفنا باستعمال `simulink\matlab` وقد أثبتت النتائج فعالية هذا المنهج.

Summary

Multi-level inverters are increasingly being used because of their ability to withstand high voltage, this work focuses on the use of predictive control approach for the control of three-level inverter diode clamped, after using this approach with Matlab /SIMULINK. The obtained simulation results are satisfactory.

Table des matières

Table des matières	I
Liste des figures	III
Liste des tableaux	V
Liste des abréviations et des symboles.....	VI
Introduction générale.....	1
Chapitre I Modélisation de la Machine Asynchrone et de L'onduleur à Trois Niveaux	
Introduction	2
I.1. Description de la machine asynchrone triphasée (MAS)	2
I.1.1. Constitution de la machine asynchrone.....	2
I.1.2. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.....	2
I.2. Hypothèses simplificatrices	3
I.3. Equations des grandeurs de la machine asynchrone.....	3
I.4. Transformation de Park :	5
I.4.1. Application aux équations des tensions	6
I.4.2. Application aux équations des flux	7
I.4.3. Equation Mécanique :.....	9
I.5. Modélisation de l'alimentation :.....	9
I.6. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes :.....	10
I.6.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux :	10
I.6.2. Fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux :.....	11
I.6.3. Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux :.....	11
I.6.4. Commandes complémentaires de l'onduleur	12
I.6.5. Fonctions de connexion :.....	12
I.7. Modèle de connaissance :	13
I.8. Conclusion	14
Chapitre II Cascade : Redresseur à Trois Niveaux - Onduleur à Trois Niveaux - MAS	
Introduction	15
II.1. Commande par modulation de largeur d'impulsions	15
II.2. Principe de base de MLI.....	15
II.3. La commande MLI de l'onduleur trois niveaux	16
II.3.1. Algorithme de commande	17
II.4. Modulation vectorielle.....	17

II.4.1. Modulation vectoriel de l'onduleur 3 niveaux	17
II.4.2. Séquence des états de l'onduleur	21
II.5. Redresseur triphasé a trois niveaux	22
II.5.1. Modélisation du redresseur	23
II.6. Commande par hystérésis en courant	24
II.7. Principe	25
II.8. Algorithme de la commande.....	25
II.9. Cascade redresseur à trois niveaux-onduleur à trois niveaux-MAS.....	26
II.10. Modélisation d'un filtre intermédiaire de la cascade	27
II.11. Résultats de simulation	27
Conclusion.....	31

Chapitre III Commande Prédictive de L'onduleur à Trois Niveaux

Introduction	32
III.1. Principe de la commande prédictive	32
III.2. Modèle prédictif de l'onduleur triphasé à 3 niveaux	33
III.3. Algorithme (1) de la commande prédictive	35
III.4. Résultat de simulation.....	36
III.5. Algorithme (2) de la commande prédictive	39
III.6. Résultat de simulation.....	41
III.7. Algorithme (3) de la commande prédictive	43
III.8. Résultat de simulation.....	44
III.9. Comparaison entre les différences commande appliquées sur l'onduleur.....	47
III.10. Conclusion	48
Bibliographie.....	50
Annexe	52

Liste des figures

Figure I-1 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone	5
Figure I-2 onduleur triphasé à trois niveaux	10
Figure I-3 Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode.....	11
Figure I-4 Structure d'un bras K de l'onduleur triphasé à trois niveaux.....	11
Figure II-1 commande triangulo-sinusoidal à deux porteuses	16
Figure II-2 Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux	19
Figure II-3 Secteurs et régions du diagramme vectoriel	19
Figure II-4 Etats X, Y et Z pour les différentes régions du diagramme vectoriel.....	21
Figure II-5 Redresseur à trois niveaux	23
Figure II-6 Bloc hystérésis	25
Figure II-7 Cascade redresseur à trois niveaux-onduleur à trois niveaux-MAS	26
Figure II-8 La structure du filtre.....	27
Figure II-9 La tension et le courant du réseau alimentant le redresseur.....	28
Figure II-10 Le courant de référence et le courant du réseau alimentant le redresseur .	Erreur !
Signet non défini.	
Figure II-11 La tension de la capacité Uc1 et Uc2.....	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-12 la tension de l'onduleur (Vab) et son spectre d'harmonique .	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-13 Courbes du Courant statorique is (A)	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-14 Courbes du couple Cem (N.m)	Erreur ! Signet non défini.
Figure II-15 Courbe de vitesse (rad /s).....	30
Figure III -1 Principe de la commande prédictive.....	33
Figure III -2 Modèle prédictif de l'onduleur triphasé à 3 niveaux.....	34
Figure III -3 Les principales étapes de la commande prédictive appliquée sur l'onduleur (algorithmes 1)	36
Figure III -4 Les tensions des deux condensateurs Uc1 et Uc2	37
Figure III -5 La tension de l'onduleur (Vab).....	37
Figure III-6 Le courant statorique et le couple de la MAS	38
Figure III -7 Courbes de vitesse (rad /s).....	38
Figure III -8 Les principales étapes de la commande prédictive appliquée sur l'onduleur (algorithmes 2)	40
Figure III -9 Les tensions des deux condensateurs Uc1 et Uc2	41
Figure III -10 La tension de l'onduleur (Vab).....	41

Figure III -11 spectre d'harmoniques de la tension V_{ab}	42
Figure III -12 Le courant statorique et le couple de la MAS	42
Figure III -13 Courbes de vitesse (rad /s)	42
Figure III -14 Les principales étapes de la commande prédictive appliquée sur l'onduleur (algorithmes 3)	44
Figure III-15 La tensions du condensateur U_{c1}	Erreur ! Signet non défini.
Figure III-16 La tensions du condensateur U_{c2}	Erreur ! Signet non défini.
Figure III-17 La tension du l'onduleur (V_{ab})	Erreur ! Signet non défini.
Figure III-18 spectre harmonique de la tension V_{ab}	Erreur ! Signet non défini.
Figure III-19 Le courant statorique et le couple de la MAS	Erreur ! Signet non défini.
Figure III-20 Courbe de vitesse (rad /s)	Erreur ! Signet non défini.

Liste des tableaux

Table I-1 Grandeurs électriques pour chacune des Configurations d'un bras k. 12
Table III -1 Comparaison entre les différences commande appliquées sur l'onduleur 47

Liste des abréviations et des symboles

Paramètres de la modulation de la machine asynchrone

s, r : Indice relatif au stator et rotor respectivement.

d : Indice de l'axe direct.

q : Indice de l'axe quadrature.

$[V_s]_{a,b,c}$: Vecteur tension statorique des phases a, b et c.

$[V_s]_{d,q}$: Vecteur tension statorique dans le repère dq.

$[I_s]_{a,b,c}$: Vecteur courant statorique des phases a, b et c.

$[I_s]_{d,q}$: Vecteur courant statorique dans le repère dq.

$[I_r]_{a,b,c}$: Vecteur courant rotorique des phases a, b et c.

$[I_r]_{d,q}$: Vecteur courant rotorique dans le repère dq.

$[\Phi_s]_{a,b,c}$: Vecteur flux statorique des phases a, b et c.

$[\Phi_s]_{d,q}$: Vecteur flux statorique dans le repère dq.

$[\Phi_r]_{a,b,c}$: Vecteur flux rotorique des phases a, b et c.

$[\Phi_r]_{d,q}$: Vecteur flux rotorique dans le repère dq.

$[]^T$: Indice de transposition.

$[R_s]$: Matrice résistance statorique.

$[R_r]$: Matrice résistance rotorique.

$[L_{ss}]$: Matrice inductance statorique.

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

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

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

$[P(\theta)]^{-1}$: Matrice de Park inverse.

L_s : Inductance propre du stator.

L_r : Inductance propre du rotor.

p : Nombres de paires de pôles.

θ_s : L'angle électrique entre l'axe as et d.

θ_r : L'angle électrique entre l'axe ar et d.

θ : La position angulaire du rotor par rapport au stator.

g : glissement de la machine.

n : Vitesse de rotation mécanique.

Cem : Couple électromagnétique.

Paramètres de la modulation vectorielle de l'onduleur

V_s : Vecteur tension de référence.

V_d : Tension sur l'axe d.

V_q : Tension sur l'axe q.

$V_{d_{pu}}, V_{q_{pu}}$: Grandeurs relatives.

V_{max} : Maximum vecteur tension de référence.

T_e : Période d'échantillonnage.

α : Position angulaire du vecteur VS à l'intérieur d'un secteur.

T_x, T_y, T_z : Durées d'application des vecteurs V_x, V_y et V_z .

d_x, d_y, d_z : Durées T_x, T_y et T_z en grandeurs relatives.

m : Relation entre la période d'échantillonnage T_e et la période T .

Paramètres de la commande prédictive

V_1, V_2, V_3 : Tensions simples aux bornes de la charge de l'onduleur.

$I_{ond1}, I_{ond2}, I_{ond3}$: Courants d'entrée de l'onduleur triphasé à cinq niveaux.

i_{c1}, i_{c2} : Courants condensateurs.

U_{c1}, U_{c2} : Tensions des condensateurs.

$e(i)$: Epsilons des tensions des condensateurs.

$e(i, k)$: Somme des epsilons des tensions des condensateurs.

T_e : Période d'échantillonnage.

Sigles utilisés

MAS : Machine Asynchrone.

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsions.

Introduction générale

Avec le développement industriel, il est devenu une nécessité d'utiliser des machines électriques de puissance de plus en plus forte afin de développer les couples exigés par les différentes applications. Ces machines exigent une forte tension d'alimentation. Les machines électriques étant actuellement alimentées à travers des convertisseurs de puissance, ces derniers doivent être dimensionnés et commandés de manière à supporter des tensions d'alimentation élevées, de qualité convenable.[1]

La moteur asynchrone est de conception simple, robuste, peu coûteuse à l'achat et à l'entretien. Elle supporte de fortes couple de démarrage qui peuvent aller jusqu'à 5 à 7 fois son couple nominal. Elle peut aussi fonctionner dans des milieux critiques (poussières, etc.). La commande d'une machine asynchrone, et particulièrement à cage, est plus complexe que celle d'un moteur asynchrone a rotor bobinée du fait que les grandeurs rotoriques ne sont pas accessibles. Généralement, dans les applications industrielles, on utilise les onduleurs à deux niveaux. Ces convertisseurs sont limités en puissance et en tension. De même, les caractéristiques spectrales des tensions délivrées sont limitées.[2]

Pour résoudre ces problèmes, on utilise les onduleurs multi-niveaux qui ont plusieurs types :

- 1- Onduleur à sources séparées.
- 2- Onduleur à capacités flottantes.
- 3- Onduleur à diodes flottantes.

Dans ce travail, on va s'intéresser à la commande prédictive d'une cascade redresseur à trois niveaux –onduleur à trois niveaux.

Dans le premier chapitre, on va présenter le modèle triphasé du MAS et de sa transformation dans le système biphasé en utilisant le modèle de Park ainsi que la modélisation de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes.

Dans le deuxième chapitre, on va présenter la Commande par modulation de largeur d'impulsion ainsi que la modulation vectorielle de l'onduleur et étudier les résultats de la cascade redresseur (commandé par hystérésis) -onduleur (commandé par MLI)-le moteur asynchrone et donner les différentes interprétations possibles sur les résultats obtenus.

Dans le troisième chapitre, on va étudier les résultats de l'application de la commande prédictive sur la cascade redresseur - onduleur - avec le moteur asynchrone comme une charge.

Une conclusion générale sur ce travail avec des perspectives tire de ce mémoire.

Chapitre I

**Modélisation de la
Machine Asynchrone
et de L'onduleur à
Trois Niveaux**

Introduction

Le moteur asynchrone est la machine la plus utilisée dans le domaine des puissances supérieures à quelques kilowatts car il présente de nombreux avantages tels que sa puissance massique, sa robustesse, sa facilité de mise en œuvre, son faible coût, etc.... L'apparition dans les années 1980 des variateurs permettant de faire varier la fréquence de rotation dans une large gamme a grandement favorisé son développement. En effet, il entre dans la conception de nombreux procédés industriels associant des convertisseurs statiques et des machines électriques (traction électrique, laminoirs, levage, pompage, etc...).[3]

Pour obtenir le fonctionnement optimal de cette machine, on doit l'alimenter par une source de tension aussi proche que possible d'une forme sinusoïdale. Pour améliorer cette tension d'alimentation, on va utiliser un onduleur à trois niveaux à diodes flottantes.

Dans ce chapitre on va modéliser la machine asynchrone et l'onduleur.

I.1. Description de la machine asynchrone triphasée (MAS)

I.1.1. Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone, fait appel à un principe simple de champs tournant qui lui permet un fonctionnement sans contacts électriques glissants. Ceci conduit à une machine très robuste, à l'entretien aisé, qui convient aujourd'hui très bien dans les applications en vitesse variable.

Dans ce mémoire, on se limite à étudier la machine à induction en fonctionnement moteur. Ce dernier est composé d'une partie fixe dite "stator" et une partie tournante dite "rotor".[4]

I.1.2. Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone

Le fonctionnement d'une machine asynchrone est basé sur le principe de l'interaction électromagnétique du champ tournant créé par le courant triphasé fourni à l'enroulement statorique par le réseau, et des courants induits dans l'enroulement rotorique lorsque les conducteurs de ce dernier sont coupés par le champ tournant. De cette façon, le fonctionnement d'une machine asynchrone est analogue à celui d'un transformateur : le stator étant comparable à l'enroulement primaire et le rotor à l'enroulement secondaire qui, dans le cas général, peut tourner à la vitesse de rotation donnée par le rapport suivant:

$$n_1 = \frac{f}{p} * 60 \quad \text{I-1}$$

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

Le rapport :

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

est appelé glissement d'une machine asynchrone. [5]

I.2. Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine asynchrone est établie sous les hypothèses simplificatrices suivantes :

1. La machine asynchrone est considérée comme symétrique : toutes les phases ont des caractéristiques électriques identiques.
2. Les pertes sont négligées : on suppose que la machine ne dissipe pas d'énergie sous forme de chaleur.
3. Le champ magnétique est considéré comme constant : on suppose que la saturation du noyau n'a pas d'effet significatif sur le comportement de la machine.
4. Le glissement est constant : on suppose que le glissement ne varie pas en fonction de la charge.

Ces hypothèses simplificatrices permettent de simplifier considérablement la modélisation et l'analyse de la machine asynchrone, mais elles peuvent également introduire des erreurs dans les prévisions de performance de la machine réelle. Il convient donc de les utiliser avec précaution et de prendre en compte les limitations qu'elles imposent.

I.3. Equations des grandeurs de la machine asynchrone

Les équations des tensions statoriques écrites dans un référentiel stationnaire lié au stator, peuvent être exprimées, en utilisant la notation matricielle par : [6]

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s] \quad \text{I-3}$$

Les équations des tensions rotoriques écrites dans un référentiel tournant lié au rotor, peuvent être exprimées par :

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r] \quad \text{I-4}$$

Où :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} ; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} ; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} ; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{bmatrix}$$

$$[\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{bmatrix} ; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad \text{I-5}$$

$$[\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{sr}][I_s] \quad \text{I-6}$$

$$\text{où : } [L_{ss}] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} ; \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix}$$

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

Nous obtenons les deux expressions suivantes :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] \frac{d}{dt} [I_s] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}] [I_r] \} \quad \text{I-7}$$

$$[V_r] = [R_r] \cdot [I_r] \frac{d}{dt} [I_r] + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}]^T [I_r] \} \quad \text{I-8}$$

Lorsqu'on met en équation le comportement d'un système électromécanique, il peut arriver que l'on se retrouve avec des équations différentielles à coefficients variables, ce qui rend leur étude analytique difficile en raison du grand nombre de variables en jeu. Pour résoudre ce problème, on utilise des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants. Ces transformations doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles afin d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé, qui reste valable pour la machine réelle. La transformation de R.H. Park est l'une des transformations couramment utilisées dans ce contexte.

I.4. Transformation de Park :

La transformation de Park consiste à transformer le système d'axes des enroulements statoriques et rotoriques (système triphasé équilibré), à un système d'axes des enroulements orthogonaux équivalents. Ce passage est rendu possible par la matrice de Park $P(\theta_s)$ pour la transformation des grandeurs physiques. Cette transformation nous donne un système d'équations différentielles à coefficients non variables.[6]

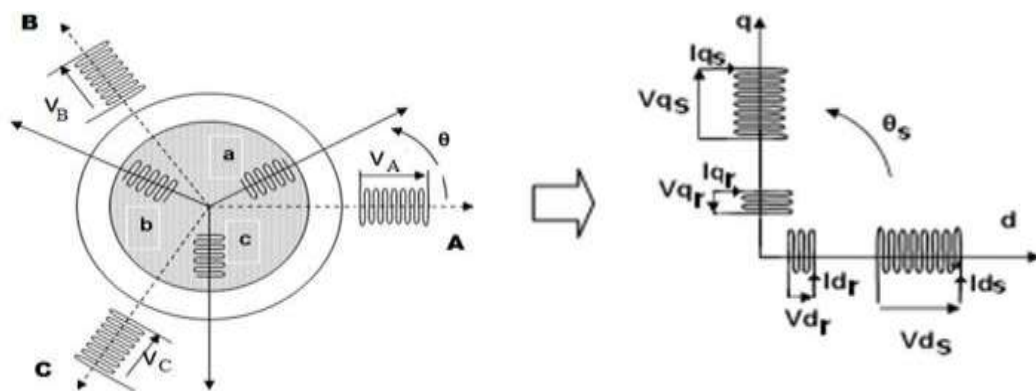


Figure I-1 Transformation de Park appliquée à la machine asynchrone

Donc :

- Les grandeurs V_s , I_s , et Φ_s sont définies dans un repère immobile lié au stator de système d'axes (A, B, C) situés dans un même plan et décalés deux à deux d'un angle de $2\pi/3$.

- Les grandeurs V_r , I_r , et Φ_r sont définies dans un repère attaché à la partie tournante de système d'axes (A, B, C) situés dans un même plan et décalés deux à deux d'un angle de $2\pi/3$.

Ainsi, le rotor tourne à la vitesse $w = \frac{d\theta}{dt}$, par rapport au stator immobile.

Les matrices de Park et inverse sont définies sous la forme suivante :

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

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

Le lien entre les deux repères est donné par les équations suivantes :

$$V_{dqs} = [p(\theta_s)]V_s \quad ; \quad I_{dqs} = [p(\theta_s)]I_s \quad ; \quad \Phi_{dqs} = [p(\theta_s)]\Phi_s$$

$$V_{dqr} = [p(\theta_r)]V_r \quad ; \quad I_{dqr} = [p(\theta_r)]I_r \quad ; \quad \Phi_{dqr} = [p(\theta_r)]\Phi_r$$

I.4.1. Application aux équations des tensions

$$[P(\theta_s)]^{-1}[V_{dqs}] = [R_s][P(\theta_s)]^{-1}[I_{dqs}] + \frac{d}{dt} \left\{ [P(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{dqs}] \right\} \quad \text{I-11}$$

$$[V_{dqs}] = [R_s][I_{dqs}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{dqs}] + \frac{d}{dt} \left\{ [P(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{dqs}] \right\} \quad \text{I-12}$$

$$\frac{d}{dt}[P(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{d\theta_s}{dt} \begin{bmatrix} -\sin(\theta) & -\cos(\theta) & 0 \\ -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \\ -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 0 \end{bmatrix} \quad \text{I-13}$$

Après un calcul direct :

$$[P(\theta_s)] \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{d\theta_s}{dt} & 0 \\ \frac{d\theta_s}{dt} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{I-14}$$

Sachant que : $\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$

Alors on aboutit au système d'équations suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} \quad \text{I-15}$$

D'une manière similaire on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{I-16}$$

I.4.2. Application aux équations des flux

$$[P(\theta_s)]^{-1} [\Phi_{dqs}] = [L_{ss}] [P(\theta_s)]^{-1} [I_{dqs}] + [M_{sr}] [P(\theta_r)]^{-1} [I_{dqr}] \quad \text{I-17}$$

$$[\Phi_{dqs}] = [P(\theta_s)] [L_{ss}] [P(\theta_s)]^{-1} [I_{dqs}] + [P(\theta_s)] [M_{sr}] [P(\theta_r)]^{-1} [I_{dqr}] \quad \text{I-18}$$

Après un calcul :

$$[P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1} = \begin{bmatrix} l_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - 2M_s \end{bmatrix} \quad \text{I-19}$$

et :

$$[P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1} = \frac{3}{2} M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s - \theta_r - \theta) & \sin(\theta_s - \theta_r - \theta) & 0 \\ -\sin(\theta_s - \theta_r - \theta) & \cos(\theta_s - \theta_r - \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{I-20}$$

D'après l'égalité :

$$[P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1} = \frac{3}{2} M_{sr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{I-21}$$

On introduit les inductances cycliques :

$$\begin{cases} L_s = l_s - M_s \\ L_s = l_s - M_s \\ L_m = \frac{3}{2} M_{sr} \end{cases} \quad \text{I-22}$$

L'expression (1.17) devienne :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} \quad \text{I-23}$$

De la même manière on aura :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_m & 0 \\ 0 & L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \end{bmatrix} \quad \text{I-24}$$

Equations des tensions :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} - \frac{d\theta_s}{dt} \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \frac{d\theta_r}{dt} \Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{I-25}$$

Equations des flux :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + L_m \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + L_m \cdot I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_s \cdot I_{dr} + L_m \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_s \cdot I_{qr} + L_m \cdot I_{qs} \end{cases} \quad \text{I-26}$$

I.4.3. Equation Mécanique :

Le couple électromagnétique développé est donné par:

$$C_{em} = p [I_s]^T \frac{d}{dt} M_{sr} [I_r] = p (\Phi_{ds} \cdot I_{qs} - \Phi_{qs} \cdot I_{ds}) = \frac{pL_m}{L_r} (\Phi_{dr} \cdot I_{qs} - \Phi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad \text{I-27}$$

I.5. Modélisation de l'alimentation :

Pour alimenter les machines à courant alternatif, les onduleurs sont largement utilisés pour convertir la tension continue en tension alternative. Cependant, les onduleurs à deux niveaux présentent des inconvénients tels qu'un taux élevé d'harmoniques de tension et des limites de tension d'entrée pour les fortes puissances, en raison des capacités limitées des interrupteurs. Afin de pallier ces problèmes, les onduleurs multi-niveaux ont été développés. Ils utilisent plusieurs niveaux de tension de sortie et des cellules de commutation supplémentaires pour générer une tension de sortie plus élevée. Les onduleurs multi-niveaux sont capables de supporter des tensions d'entrée plus élevées et d'être plus efficaces pour les grandes puissances.

Il existe plusieurs structures pour les onduleurs de tension multi-niveaux, parmi lesquelles :

- Les onduleurs à diodes flottantes.
- Les onduleurs à capacités flottantes.
- Les onduleurs superposés à sources séparées.

Dans ce travail, on s'intéresse à la structure à diodes flottantes, qui est la plus utilisée.

I.6. Modélisation de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes :

I.6.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux :

L'onduleur triphasé à trois niveaux à diodes flottantes étudié se compose de trois bras symétriques constitués chacun de quatre interrupteurs en série, plus deux diodes permettant l'obtention du zéro de la tension V_{KM} ($k=1,2,3$) notées DD_{K0} et DD_{K1} . Chaque interrupteur est composé d'un transistor et d'une diode montée en tête bêche, il est donc constituée de douze interrupteurs bidirectionnels en courant, pour assurer le transfert d'énergie réversible, ainsi que six interrupteurs unidirectionnels en courant (diodes) reliés au point milieu des sources continues.[7]

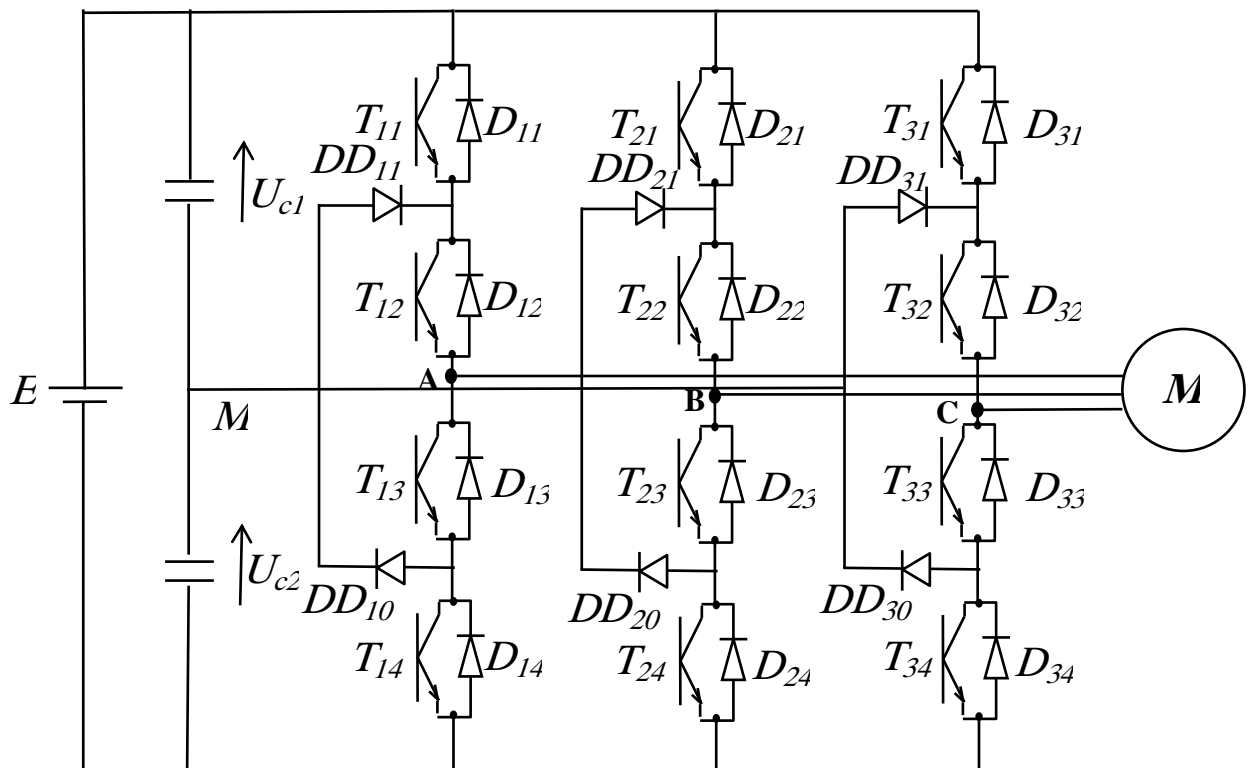


Figure I-2 onduleur triphasé à trois niveaux

I.6.2. Fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux :

Pour simplifier la complexité de la structure de l'onduleur à trois niveaux et puisque les trois bras de l'onduleur sont symétrique on va présenter un seul bras (Figure I-4) et un seul interrupteur bidirectionnel TD_{ks} (Figure I-3).[7]

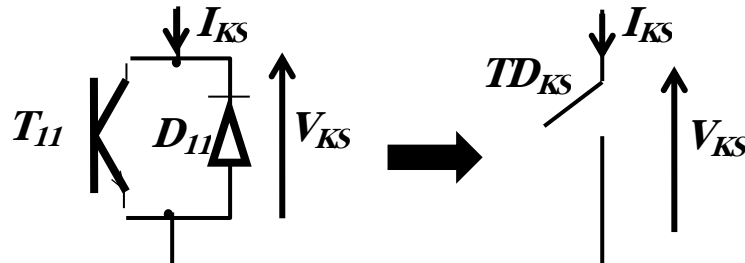


Figure I-3 Interrupteur bidirectionnel équivalent de la paire Transistor – diode

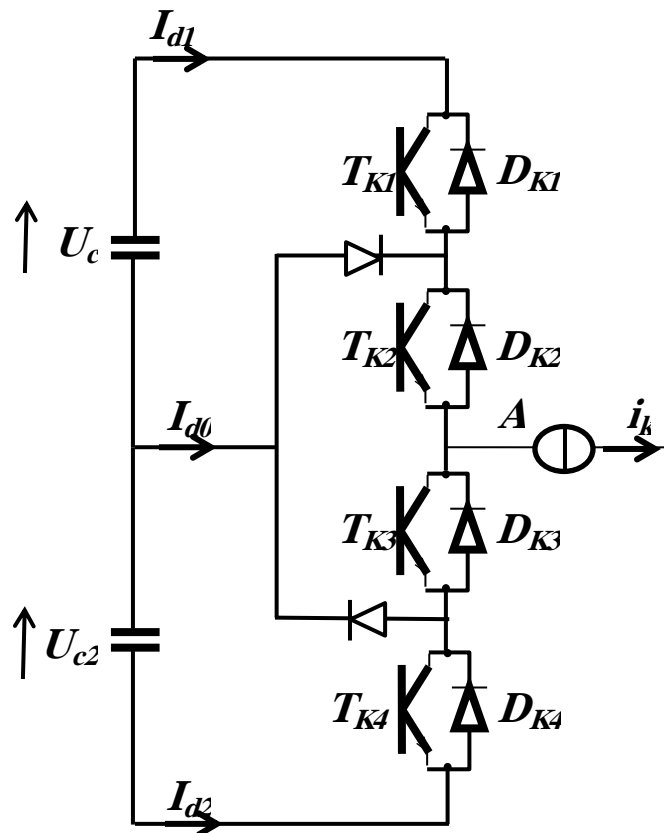


Figure I-4 Structure d'un bras K de l'onduleur triphasé à trois niveaux.

I.6.3. Différentes configurations d'un bras d'onduleur à trois niveaux :

Un bras de l'onduleur définit trois configurations possibles. Le tableau (I-1) donne les grandeurs électriques caractérisant chacune de ces configurations

La configuration	L'état d'interrupteur 1	L'état d'interrupteur 2	Les tension des nœuds V_{KM} (k=A,B,C)
C_1	1	1	$V_{KM}=U_{C1}$
C_2	0	1	$V_{KM}=0$
C_3	0	0	$V_{KM}= -U_{C2}$

Table I-1 Grandeurs électriques pour chacune des Configurations d'un bras k.

I.6.4. Commandes complémentaires de l'onduleur

Dans le contexte de l'onduleur à trois niveaux, la commandabilité est une propriété importante qui assure que les transitions entre les configurations ne sont plus dépendantes de la commande interne (les grandeurs électriques), mais uniquement de la commande externe (les transitions). Cette propriété est supposée être satisfaite dans la suite du chapitre.

Afin d'éviter la conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un même bras de l'onduleur à trois niveaux, ce qui pourrait causer leur destruction en raison de la croissance du courant lors d'un court-circuit ou une surtension en cas d'ouverture de tous les interrupteurs, il est nécessaire de définir un commande complémentaire qui peut être appliquée à chaque bras[8] :

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K3}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K4}} \end{cases}$$

avec :

B_{ks} est le signal de la commande du transistor T_{ks} du bras k.

I.6.5. Fonctions de connexion :

La fonction de connexion F_{ks} traduit l'état ouvert ou fermé de l'interrupteur TD_{ks} , elle vaut 1 lorsque l'interrupteur est fermé et 0 dans le cas contraire [9] :

$$F_{ks} = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur } TD_{ks} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si l'interrupteur } TD_{ks} \text{ est ouvert} \end{cases}$$

En traduisant la commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs, du bras k, on obtient :

$$\begin{cases} B_{K1} = \overline{B_{K4}} \\ B_{K2} = \overline{B_{K3}} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} F_{K1} = 1 - F_{K4} \\ F_{K2} = 1 - F_{K3} \end{cases}$$

La fonction de connexion du demi-bras est désignée par F_{km}^b

k : désigne le numéro du bras (k=1, 2,3)

m : indique la position du demi-bas (m=1 pour le demi-bras du haut et m=0 pour le demi-bras du bas).

Les fonctions de connexion des demi-bras peuvent être déterminées à partir des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} \cdot F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} \cdot F_{k4} \end{cases}$$

I.7. Modèle de connaissance :

Cette modélisation sera effectuée en considérant l'onduleur triphasé à trois niveaux avec une charge triphasée couplée en étoile avec neutre isolé.

Les potentiels des nœuds A, B et C de l'onduleur triphasé à trois niveaux, par rapport au point milieu M de la source de tension d'entrée sont donnés par le système suivant [2] :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \quad \text{I-28}$$

$$(\text{lorsque } U_{c1} = U_{c2} = U_c) \Rightarrow \begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_c \quad \text{I-29}$$

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé a trois niveaux, s'expriment comme suit :

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad \text{I-30}$$

Les tensions simples s'expriment grâce aux fonctions de connexion des demi-bras selon le système ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2} \right\} \quad \text{I-31}$$

Les expressions des courants d'entrée de l'onduleur à trois niveaux sont données par :

$$\begin{cases} i_{d1} = F_{11}^b \cdot i_1 + F_{21}^b \cdot i_2 + F_{31}^b \cdot i_3 \\ i_{d2} = F_{10}^b \cdot i_1 + F_{20}^b \cdot i_2 + F_{30}^b \cdot i_3 \end{cases} \quad \text{I-32}$$

avec :

$$i_{d0} = -(F_{11}^b + F_{10}^b) \cdot i_1 - (F_{21}^b + F_{20}^b) \cdot i_2 - (F_{31}^b + F_{30}^b) \cdot i_3 \quad \text{I-33}$$

I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé le modèle de la machine asynchrone, à savoir les équations électriques, magnétiques et l'équation mécanique.

En résumé, la transformation de Park nous permet de réduire la complexité du modèle de la machine et par conséquent, simplifie son analyse lorsqu'elle est alimentée par une tension de l'onduleur a trois niveaux.

Deuxièmement, on a présenté la structure de l'onduleur à trois niveaux à diodes flottantes et sa modélisation.

Chapitre II

**Cascade : Redresseur à
Trois Niveaux-
Onduleur
à Trois Niveaux- MAS.**

Introduction

Dans ce chapitre on va créer une alimentation qui contient le réseaux électrique triphasé - redresseur triphasé à trois niveaux -filtre- onduleur triphasé a trois niveaux et la machine asynchrone comme un consommateur de puissance.

On va présenter la commande par modulation de largeur d'impulsion et la modulation vectorielle de l'onduleur et présenter le redresseur, Et étudier les résultats la cascade redresseur (la commande hystérésis) –onduleur (la commande MLI)-le moteur asynchrone et donner les différentes interprétations possible sur les résultats.

II.1. Commande par modulation de largeur d'impulsions

La modulation de largeur d'impulsions (en anglo-saxon pulse width modulation) consiste à adapter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et à former chaque alternance d'une tension de sortie d'une succession de créneaux de largeurs convenables. Cette technique peut être considérée comme une extension du principe de la commande par découpage où la durée des impulsions n'est plus régulière mais choisie de façon à supprimer le maximum d'harmoniques de rangs faibles difficiles à filtrer.[10]

II.2. Principe de base de MLI

Le principe de base de la modulation de largeur d'impulsions est basé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi la tension de sortie de l'onduleur est formée par une succession de créneaux d'amplitude égale à la tension d'alimentation (continue) et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la reproduction d'un signal MLI est de comparer un signal triangulaire appelé porteuse de haute fréquence à un signal de référence sinusoïdal appelé modulante et qui constitue l'image du signal recueilli à la sortie de l'onduleur. [10]

Les points d'intersection entre la modulante et la porteuse engendrent l'enclenchement/déclenchement constituant ainsi une impulsion de durée variable et l'ensemble de ces impulsions reconstitue, de ce fait, le fondamental de la sinusoïde de référence.[11]

II.3. La commande MLI de l'onduleur trois niveaux

Pour l'onduleur trois niveaux, on va utiliser deux porteuses identiques en fréquence et en phase, décalées l'un par rapport à l'autre par un niveau de tension avec trois signaux de référence déphasés de 120 degrés. Chaque deux va commander l'un des trois bras.

La MLI triangulo-sinusoïdal se base sur deux paramètres qui caractérisent la commande :

- L'indice de modulation m qui le rapport de la fréquence de la porteuse F_p sur celle de la référence F_r . Si m est entier la modulation est synchrone. Elle est asynchrone dans le cas contraire.

$$m = \frac{F_p}{F_r} \quad \text{II-1}$$

- Le taux de modulation r qui est le rapport de amplitude des tensions de la référence V_{rm} sur celle de la porteuse V_{pm} .

$$r = \frac{V_{rm}}{V_{pm}} \quad \text{II-2}$$

Dans ce travail on prend :

$$\begin{cases} F_r = 60 \text{ Hz} \\ F_p = 540 \text{ Hz} \end{cases}, m = 9$$

$$\begin{cases} V_{rm} = 0.95 \\ V_{pm} = 1 \end{cases}, r = 0.95$$

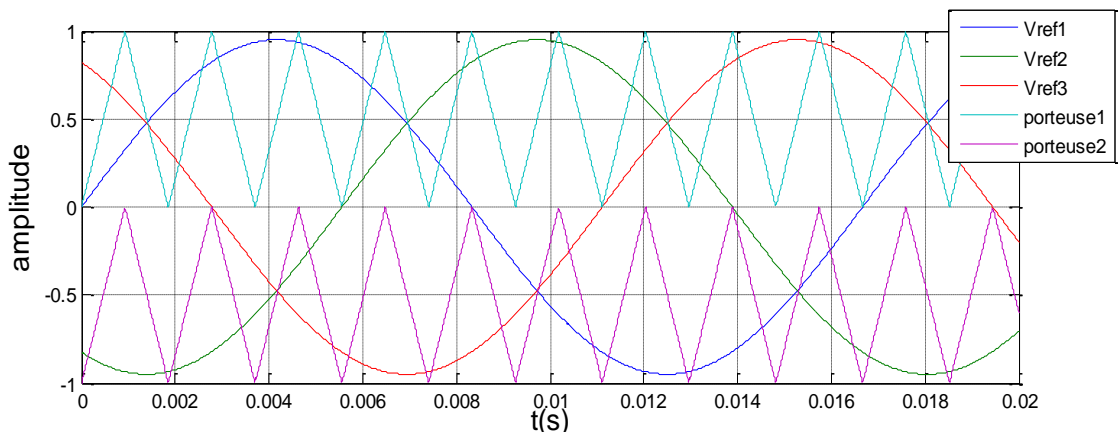


Figure II-1 commande triangulo-sinusoïdal à deux porteuses

II.3.1. Algorithme de commande

L'algorithme de commande de la MLI triangulo-sinusoidale à deux porteuses peut être résumé en deux étapes :

Étape 1 : Détermination des tensions intermédiaires (V_{k1} , V_{k2}) :

$$\begin{cases} (V_{refk} > U_{p1}) \Rightarrow V_{k1} = Uc \\ (V_{refk} < U_{p1}) \Rightarrow V_{k1} = 0 \\ (V_{refk} > U_{p2}) \Rightarrow V_{k2} = 0 \\ (V_{refk} < U_{p2}) \Rightarrow V_{k2} = -Uc \end{cases} \quad \text{II-3}$$

Étape 2 : Détermination du signal V_{kM} ($k=A,B,C$) les tensions des nœuds et des ordres de commande B_{ks} des interrupteurs :

$$\begin{cases} V_{km} = V_{k1} + V_{k2} \\ V_{km} = Uc \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 1 \\ V_{km} = -Uc \Rightarrow B_{k1} = 0, B_{k2} = 0 \\ V_{km} = 0 \Rightarrow B_{k1} = 1, B_{k2} = 0 \\ \text{avec} \Rightarrow B_{k3} = \overline{B_{k2}} \\ B_{k4} = \overline{B_{k1}} \end{cases} \quad \text{II-4}$$

II.4. Modulation vectorielle

La technique de modulation vectorielle est une variante de la commande par modulation de largeur d'impulsion qui se base sur la représentation vectorielle des tensions dans le plan complexe. Elle est devenue très populaire au cours de ces dernières années, en particulier pour des applications d'entraînement d'une machine asynchrone. [12]

Nous allons l'appliquer à l'onduleur triphasé à trois niveaux.

II.4.1. Modulation vectoriel de l'onduleur 3 niveaux

$$V_{ref1} = m * Vm * \sin(\omega t) \quad \text{II-5}$$

$$V_{ref2} = m * Vm * \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{II-6}$$

$$V_{ref3} = m * V_m * \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \quad \text{II-7}$$

Dans la modulation vectorielle, on représente ces trois tensions de référence par un seul vecteur V_S à l'aide de la transformation de CLARK normalisée :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ref1} \\ V_{ref2} \\ V_{ref3} \end{bmatrix} \quad \text{II-8}$$

$$V_S = V_{ref1} e^{j\theta} + V_{ref2} e^{-j\frac{2\pi}{3}} + V_{ref3} e^{j\frac{2\pi}{3}} = V_d + V_q = r * V_m * e^{j\theta}$$

V_m : L'amplitude maximale de V_S .

$0 \leq r \leq 1$: Taux de modulation.

θ : Position angulaire de vecteur V_S dans le plan $d - q$.

Ce vecteur prend dix-neuf positions discrètes dans le plan d-q suivant les états de l'onduleur. Ces positions sont indiquées sur le diagramme vectoriel de l'onduleur (Fig. II-2).

Ils sont rangées sur deux hexagones: douze positions sur l'hexagone externe (correspondantes aux états PNN, PON, PPN, OPN, NPN, NPO, NPP, NOP, NNP, ONP, PNP et PNO), six positions sur l'hexagone interne (correspondantes aux états (POO-ONN), (PPO-OON), (OPO-NON), (OPP-NOO), (OOP-NNO) et (POP-ONO)), en plus d'une position à l'origine du diagramme, correspondante aux états PPP, OOO et NNN. Chaque position sur l'hexagone interne est produite par deux états distincts. Ces états sont appelés états redondants, et les vecteurs correspondants sont appelés vecteurs redondants. Les positions discrètes du vecteur de tension de sortie V_S divise le diagramme vectoriel en six secteurs triangulaires, les sommets de ces secteurs triangulaires étant l'origine du diagramme vectoriel et les apex de l'hexagone externe. Chaque secteur est composé de quatre régions triangulaires (Fig. II-3). On a ainsi 24 régions dans la totalité du diagramme vectoriel.[1]

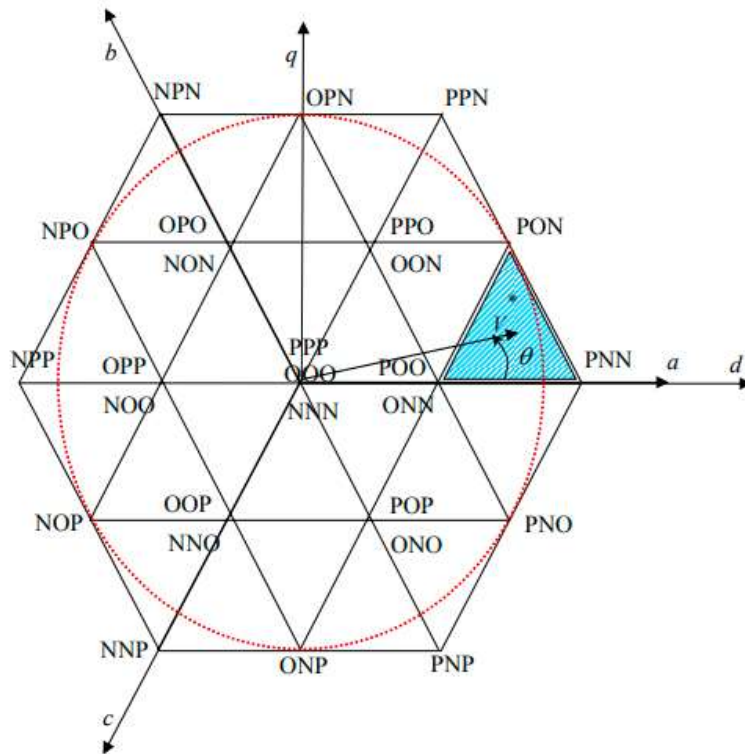


Figure II-2 Diagramme vectoriel de l'onduleur à trois niveaux

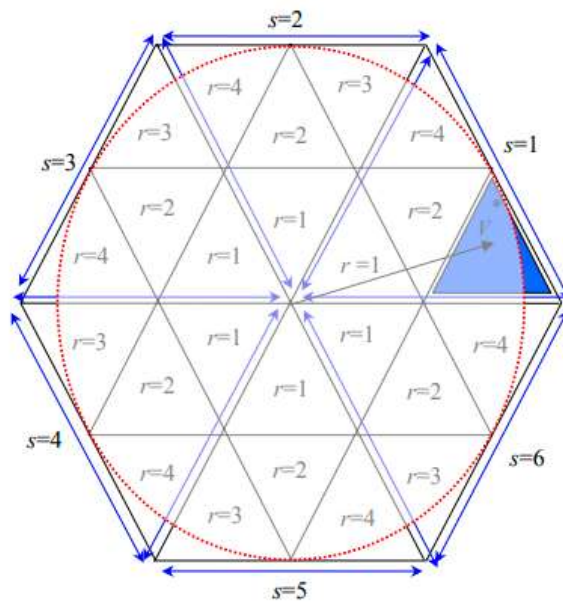


Figure II-3 Secteurs et régions du diagramme vectoriel

A partir des coordonnées V_q , V_d et de la position angulaire θ , on déduit dans quel secteur (s), et dans quelle région (r) se situe le vecteur V_S dans le plan d-q (Fig II-3) Le secteur triangulaire s se déduit de la manière suivante :

$$s = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq \theta < \frac{\pi}{3} \\ 2 & \text{si } \frac{\pi}{3} \leq \theta < 2 * \frac{\pi}{3} \\ 3 & \text{si } 2 * \frac{\pi}{3} \leq \theta < \pi \\ 4 & \text{si } \pi \leq \theta < 4 * \frac{\pi}{3} \\ 5 & \text{si } 4 * \frac{\pi}{3} \leq \theta < 5 * \frac{\pi}{3} \\ 6 & \text{si } 5 * \frac{\pi}{3} \leq \theta < 2 * \pi \end{cases} \quad \text{II-9}$$

La région triangulaire r à l'intérieur de chaque secteur se déduit en utilisant les équations de ses trois côtés. Par exemple, les côtés de la région r = 3 à l'intérieur du secteur s=1 (région hachurée dans la (Fig II-3), ont les équations suivantes (on désigne par V_d et V_q leurs grandeurs relatives $V_d / \sqrt{((V_d)^2 + (V_q)^2)}$ et $V_q / \sqrt{((V_d)^2 + (V_q)^2)}$:

$$\begin{cases} V_{q_{pu}} = V_q / \sqrt{(V_d)^2 + (V_q)^2} \\ V_{d_{pu}} = V_d / \sqrt{(V_d)^2 + (V_q)^2} \end{cases} \quad \text{II-10}$$

$$\begin{cases} V_{q_{pu}} = 0 \\ V_{q_{pu}} = \sqrt{3} * V_d \\ V_{q_{pu}} = -\sqrt{3} * V_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \end{cases} \quad \text{II-11}$$

Ainsi, le vecteur V_S se situe dans la région r = 3 du secteur s =1 lorsque les deux composantes V_d et V_q vérifient les inéquations suivantes:

$$\begin{cases} V_q \geq 0 \\ V_q \leq \sqrt{3} * V_d - \sqrt{\frac{3}{2}} \\ V_q \leq -\sqrt{3} * V_d + \sqrt{\frac{3}{2}} \end{cases} \quad \text{II-12}$$

II.4.2. Séquence des états de l'onduleur

Sur une période d'échantillonnage T_s , le vecteur tension de référence V_s doit coïncider avec la moyenne des vecteurs V_x , V_y et V_z représentant les apex du triangle contenant V_s :

$$V_s = M \cdot V_{\max} \cdot e^{i\alpha} = \frac{T_x \cdot V_x + T_y \cdot V_y + T_z \cdot V_z}{T_s} = d_x \cdot V_x + d_y \cdot V_y + d_z \cdot V_z \quad \text{II-13}$$

α : C'est la position angulaire du vecteur V_s à l'intérieur d'un secteur ($\alpha = \theta[\pi/3]$)

$T_x T_y T_z$: sont les durées d'application des vecteurs V_x , V_y et V_z respectivement à la sortie de l'onduleur.

$$T_x + T_y + T_z = 1 \quad \text{et} \quad d_x + d_y + d_z = 1 \quad \text{II-14}$$

Les vecteurs V_x , V_y et V_z dépendent de la position du vecteur V_s dans le plan d-q . Par exemple, le vecteur V_s représenté sur le diagramme vectoriel de la (Fig. II-2) se situe dans la région $r = 3$ du secteur $s = 1$. Ainsi, le vecteur V_s est celui généré par l'état PNN (appelé alors état X), le vecteur V_y est celui généré par l'état PON (appelé état Y) et le vecteur V_z est celui généré par l'état POO (appelé Z_1) ou l'état ONN (appelé Z_2). La (Fig. II-4) indique les états X, Y et Z pour les différentes régions du diagramme vectoriel.[1]

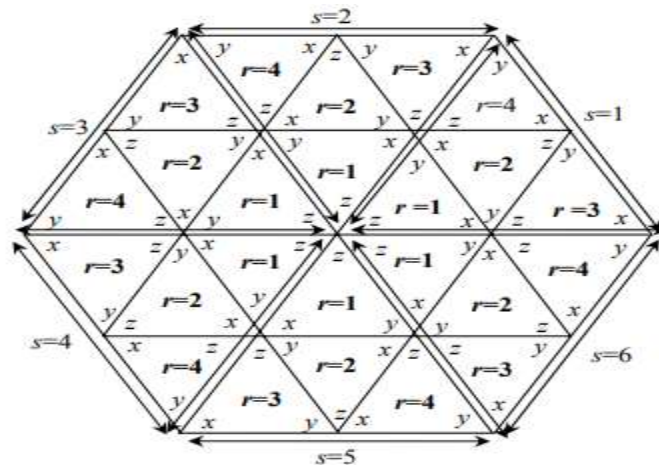


Figure II-4 Etats X, Y et Z pour les différentes régions du diagramme vectoriel.

L'équation (II-14) et la décomposition de l'équation (II-13) suivant les deux axes permet de déduire les rapports d_x , d_y et d_z , par suite les durées T_x , T_y et T_z .

Par exemple pour la région $r=1$ du secteur $s=1$, la décomposition de l'équation (II-13) donne :

$$\begin{cases} \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot m \cdot \cos \theta = \frac{1}{2} dx + \frac{1}{4} dy \\ \frac{\sqrt{3}}{2} m \cdot \sin \theta = \frac{\sqrt{3}}{4} dy \end{cases}$$

La résolution de ce système donne :

$$\begin{cases} d_x = 2 \cdot m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \\ d_y = 2 \cdot m \cdot \sin \alpha \\ d_z = 1 - d_x - d_y \end{cases}$$

Les durées T_x , T_y et T_z :

$$\begin{cases} T_x = T_s \left(2 \cdot m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{3} - \alpha\right) \right) \\ T_y = (2 \cdot m \cdot \sin \alpha) T_s \\ T_z = T_s (1 - d_x - d_y) \end{cases}$$

Cette décomposition s'applique pour tous les régions du diagramme vectoriel : pour passer d'un secteur à l'autre, il suffit de positionner l'axe d sur le début du secteur concerné.

II.5. Redresseur triphasé a trois niveaux

Le redresseur à trois niveaux est une structure d'onduleur réversible qui permet à la fois de convertir l'énergie de la source continue en énergie de tension alternative (comme on a déjà vu précédemment) et de convertir l'énergie de la source de tension alternative en énergie de tension continue (mode redresseur). En mode redresseur, le redresseur à trois niveaux utilise des interrupteurs de puissance (IGBT, MOSFET) pour contrôler la direction du courant électrique et produire une tension de sortie continue.

II.5.1. Modélisation du redresseur

La structure du redresseur triphasé à trois niveaux qu'on va utiliser est représentée sur la (Fig. II-5) C'est un redresseur de courant à trois niveaux à MLI.[13]

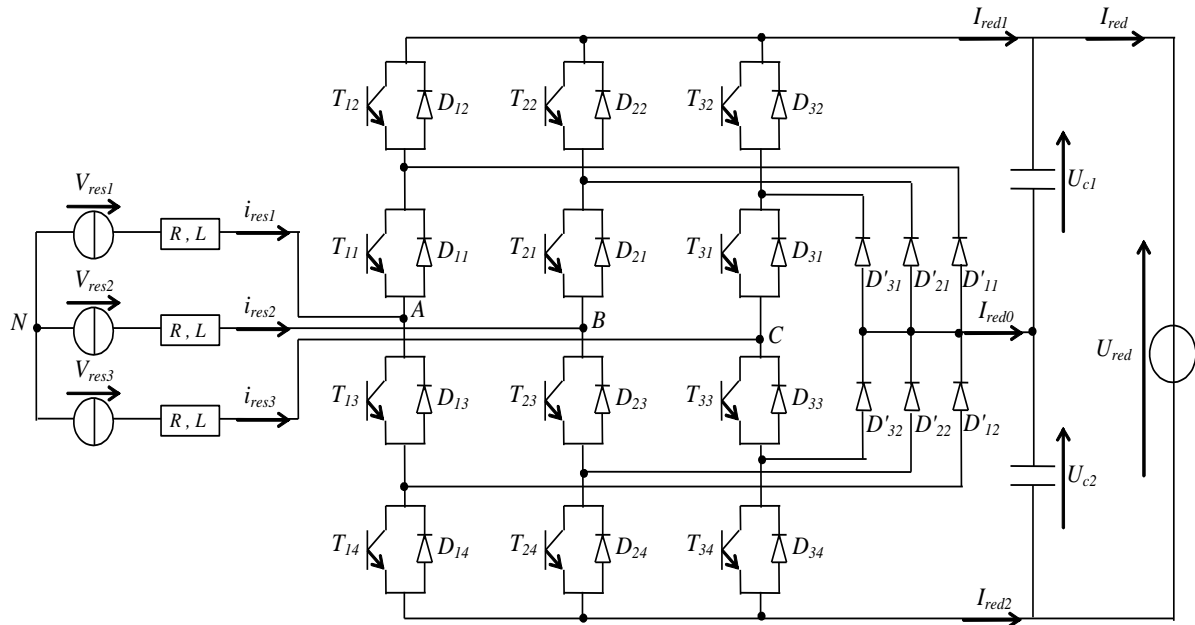


Figure II-5 Redresseur à trois niveaux

Le rôle de ce convertisseur est de générer une tension de sortie continue aux bornes de la capacité à partir d'une source alternative triphasée.

La commande complémentaire associée à un bras k de ce redresseur est donnée par :

$$\begin{cases} F_{k3} = 1 - F_{k1} \\ F_{k4} = 1 - F_{k2} \end{cases}, \quad (\mathbf{k=1,2,3}) \tag{II-15}$$

Pour le redresseur de courant à trois niveaux, on définit, en plus, les fonctions de connexion des demi bras comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} F_{k4} \end{cases}, \quad (\mathbf{k=1,2,3}) \tag{II-16}$$

Les potentiels des nœuds A, B et C :

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} \cdot U_{c2}$$

Les différentes tensions simples s'expriment au moyen des fonctions de connexion des demi-bras par le système suivant :

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad \text{II-17}$$

Les différentes tensions composées sont données également par :

$$\begin{bmatrix} u_{12} \\ u_{23} \\ u_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{c1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{c2} \right\} \quad \text{II-18}$$

Les courants de sortie du redresseur peuvent s'écrire en fonction des fonctions de connexion des demi bras et des courants d'entrée comme suit :

$$\begin{cases} I_{red_1} = F_{11}^b i_{res_1} + F_{21}^b i_{res_2} + F_{31}^b i_{res_3} \\ I_{red_2} = F_{10}^b i_{res_1} + F_{20}^b i_{res_2} + F_{30}^b i_{res_3} \\ I_{red_0} = -(I_{red_1} + I_{red_2}) \end{cases} \quad \text{II-19}$$

II.6. Commande par hystérésis en courant

La technique de commande par hystérésis en courant consiste à définir des valeurs de seuil supérieur et inférieur autour de la valeur de référence souhaitée. Lorsque le courant mesuré dépasse le seuil supérieur, les dispositifs de puissance sont désactivés, et lorsque le courant mesuré tombe en dessous du seuil inférieur, les dispositifs de puissance sont activés. Cela crée une "boucle d'hystérésis" où le courant est autorisé à varier dans une certaine plage autour de la valeur de référence souhaitée.[14]

Cette commande est couramment utilisée dans des applications telles que le contrôle de moteur, les convertisseurs de puissance et les systèmes de charge de batterie, où un contrôle précis et fiable du courant est essentiel.

II.7. Principe

Dans un redresseur triphasé à trois niveaux, les interrupteurs de puissance sont contrôlés pour permettre le flux de courant dans les charges connectées. La commande par hystérésis en courant hystérésis peut être utilisée pour contrôler le courant dans chaque phase du redresseur triphasé en ajustant la commutation des interrupteurs de puissance.

Le principe de fonctionnement de la commande par hystérésis en courant dans un redresseur triphasé à trois niveaux implique la mesure du courant, la comparaison avec la référence de courant, la détermination des seuils, la commutation des interrupteurs de puissance et le réglage des seuils pour maintenir le courant dans chaque phase dans une plage acceptable.[15]

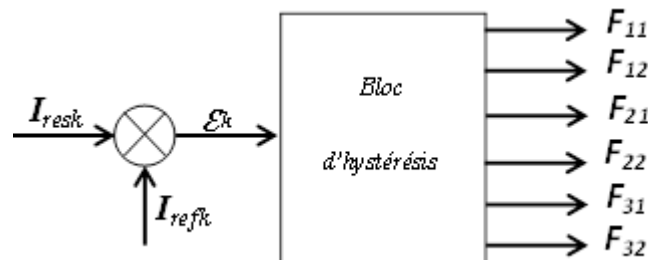


Figure II-6 Bloc hystérésis

Les courants de référence sont donnés par le système suivant:

$$\begin{cases} i_{ref1} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \sin(\omega t) \\ i_{ref2} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \sin(\omega t - 2\pi / 3) \\ i_{ref3} = \sqrt{2} \cdot I_{eff} \sin(\omega t - 4\pi / 3) \end{cases} \quad \text{II-20}$$

II.8. Algorithme de la commande

Pour les redresseurs à trois niveaux, un algorithme de commande de la stratégie d'hystérésis se résume pour une phase K (K bras de l'onduleur) par le système suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si : } (\varepsilon_k \geq \Delta i \text{ et } \varepsilon_k \leq 2 \Delta i) \text{ ou } (\varepsilon_k \leq -\Delta i \text{ et } \varepsilon_k \geq -2 \Delta i) , \text{ alors : } F_{k1} = 0, F_{k2} = 1 \\ \text{Si : } \varepsilon_k > 2.\Delta i , \text{ alors : } F_{k1} = 0, F_{k2} = 0 \\ \text{Si : } \varepsilon_k < -2.\Delta i , \text{ alors : } F_{k1} = 1, F_{k2} = 1 \\ \text{Sinon : la commande des interrupteurs reste inchangée} \end{array} \right.$$

Δi : la bande hystérésis.

ε_k : la différence entre le courant de référence et du réseaux .

II.9. Cascade redresseur à trois niveaux-onduleur à trois niveaux-MAS

La Cascade redresseur à trois niveaux-onduleur à trois niveaux-MAS est la configuration courante pour le contrôle de la vitesse des moteurs électriques.

Le redresseur à trois niveaux commandé par la commande par hystérésis convertit l'alimentation alternative en courant continu. Ensuite, l'onduleur à trois niveaux commandé par la MLI convertit le courant continu en courant alternatif à fréquence variable pour alimenter la machine asynchrone. La machine asynchrone fonctionnant en moteur convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Le contrôle de la vitesse de la machine asynchrone est réalisé en ajustant la fréquence et l'amplitude du courant alternatif fourni par l'onduleur à trois niveaux.

Cette configuration est souvent utilisée dans les applications industrielles nécessitant un contrôle précis de la vitesse du moteur, telles que les pompes, les ventilateurs, les compresseurs et les convoyeurs.

La structure générale de cette cascade est présentée ci-dessous :

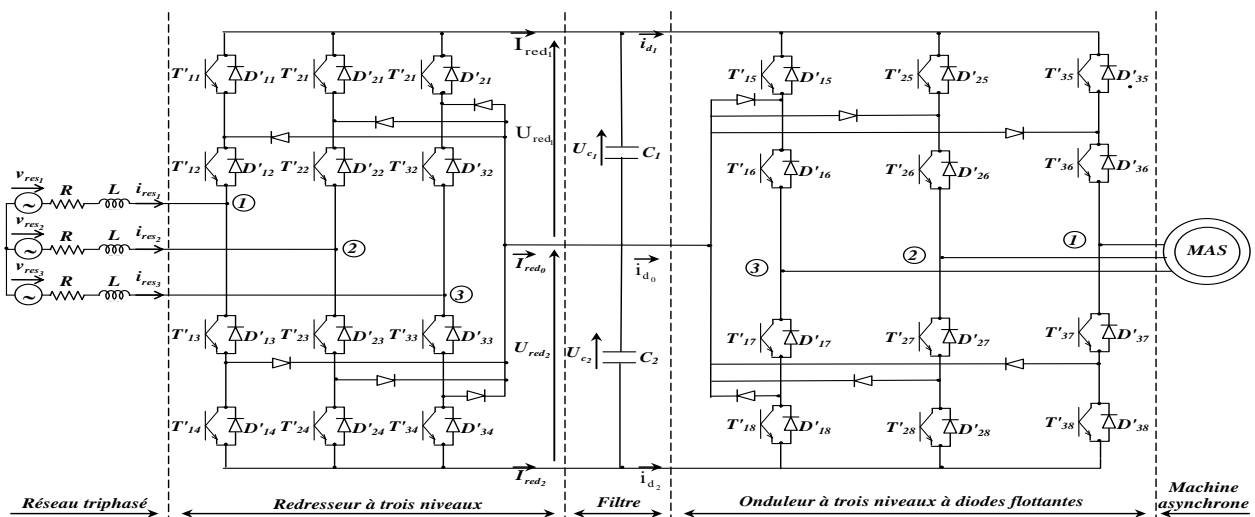


Figure II-7 Cascade redresseur à trois niveaux-onduleur à trois niveaux-MAS

II.10. Modélisation d'un filtre intermédiaire de la cascade

La structure du filtre intermédiaire est représentée par la figure suivant :

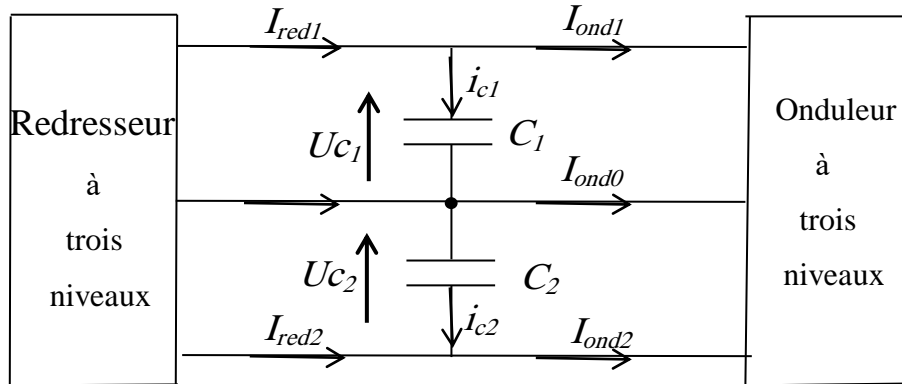


Figure II-8 La structure du filtre

Le modèle de ce filtre est représenté par le système d'équations ci-dessous :

$$i_{c1} = C_1 \cdot \frac{dU_{C1}}{dt} = I_{red1} - I_{ond1} \quad \text{II-21}$$

$$i_{c2} = C_2 \cdot \frac{dU_{C2}}{dt} = I_{red2} - I_{ond2} \quad \text{II-22}$$

II.11. Résultats de simulation

On simule la cascade redresseur (la commande hystérésis) –onduleur (la commande MLI)- moteur asynchrone. Les paramètres utilisés pour la simulation sont donnés par :

- Le réseau triphasé a une tension efficace de 792 V avec une fréquence de 60 HZ.
- Le redresseur à trois niveaux est commandé par hystérésis en courant ($I_c = 280$ A, $\Delta i = 1$ A)
- . Les paramètres du filtre capacitif intermédiaire sont : $C_1 = C_2 = 0.5$ F.
- L'onduleur à trois niveaux est commandé par la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses ($m = 9$, $r = 0,95$).
- La machine asynchrone est à vide ($C_r = 0$).

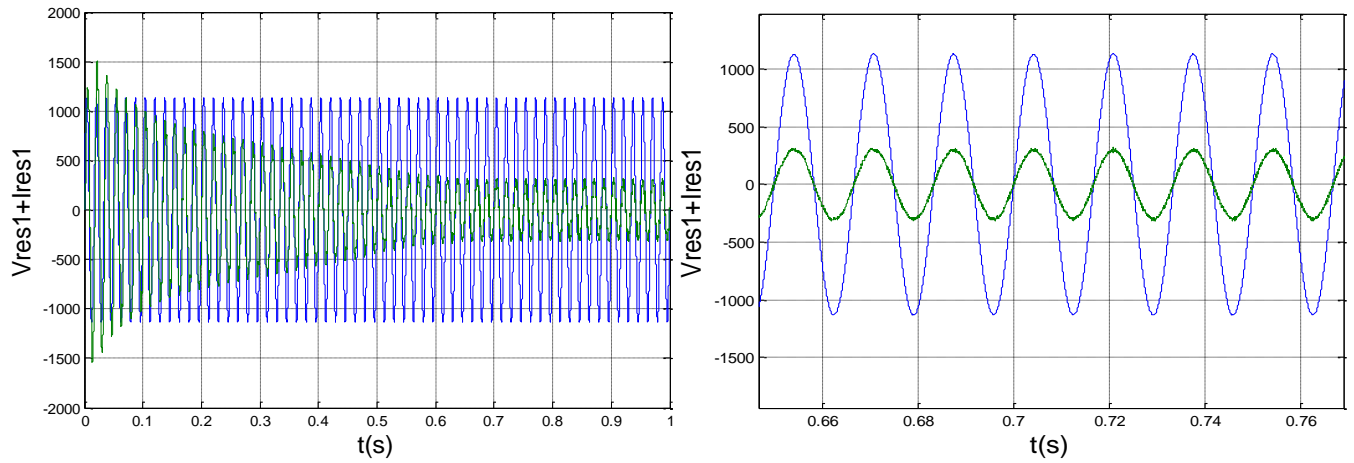


Figure II-9 La tension et le courant du réseau alimentant le redresseur

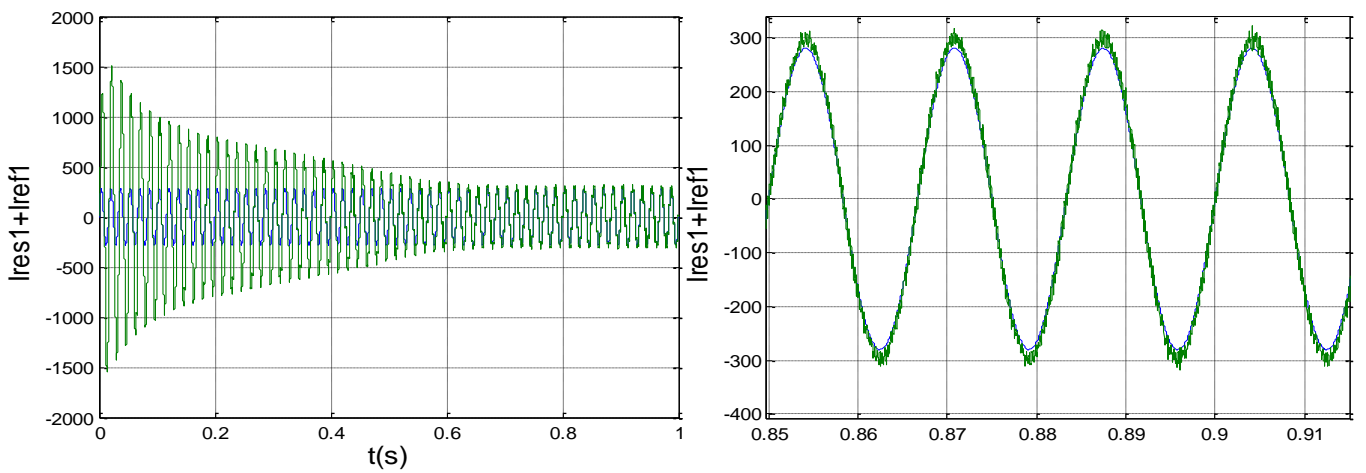


Figure II-10 Le courant de référence et le courant du réseau alimentant le redresseur

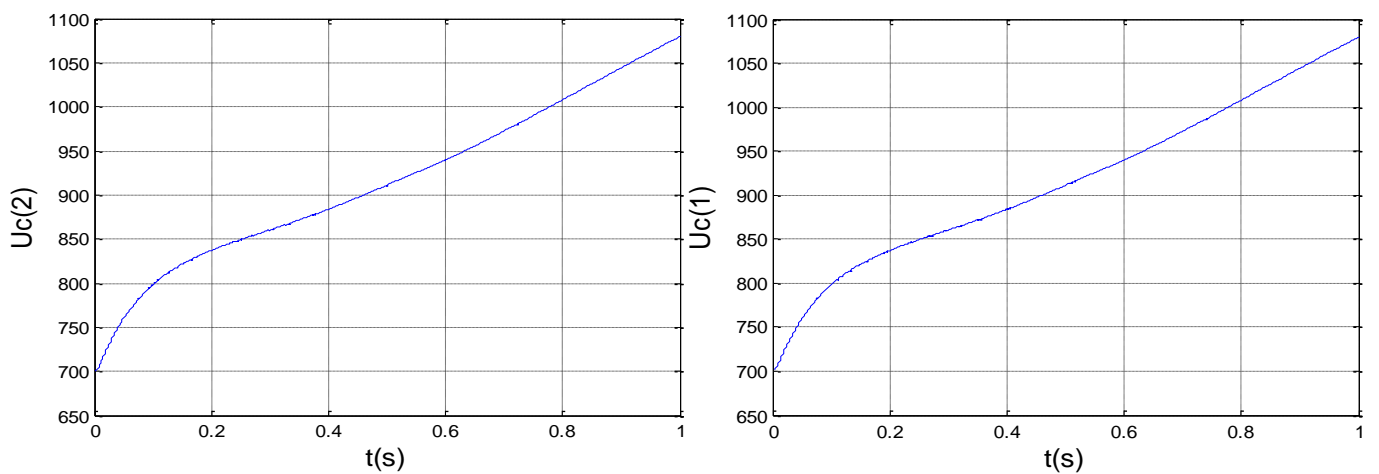


Figure II-11 La tension de la capacité Uc1 et Uc2

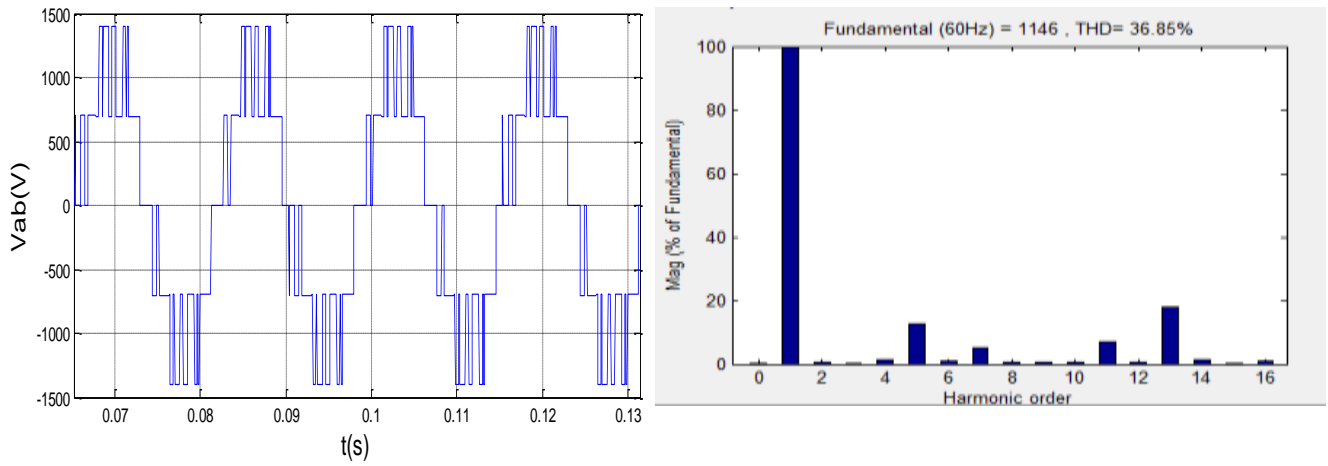


Figure II-12 la tension de l'onduleur (V_{ab}) et son spectre d'harmonique entre (0,04s et 0,056s)

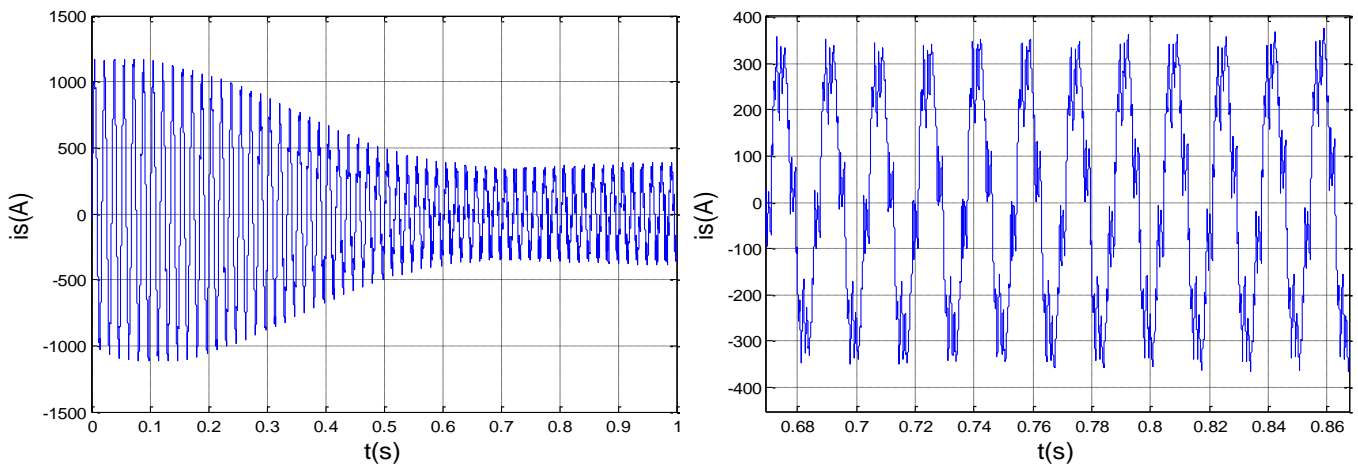


Figure II-13 Courbes du Courant statorique i_s (A)

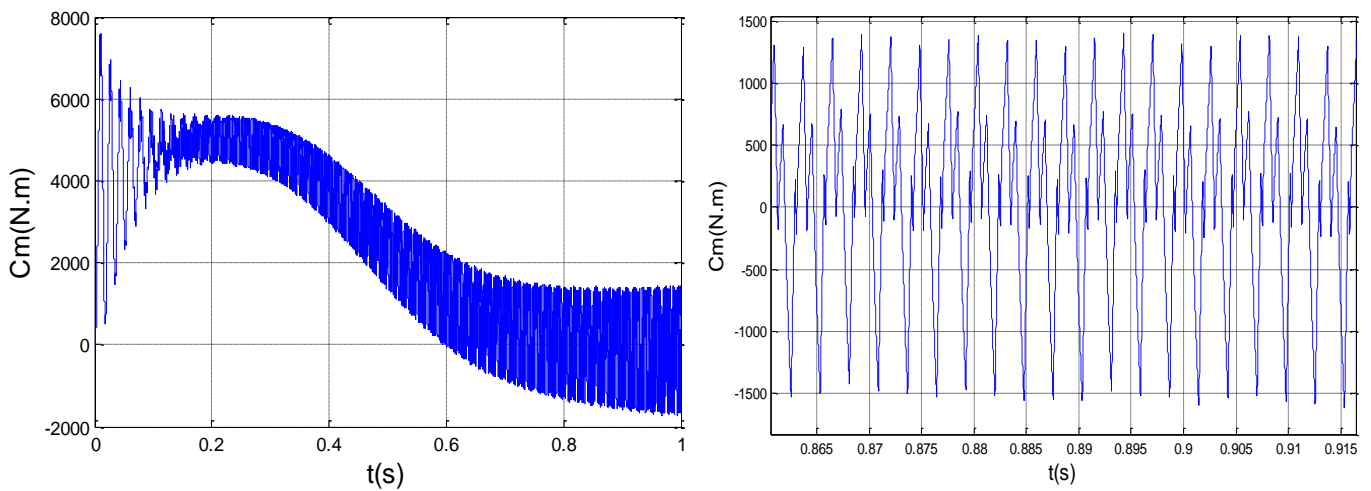


Figure II-14 Courbes du couple C_{em} (N.m)

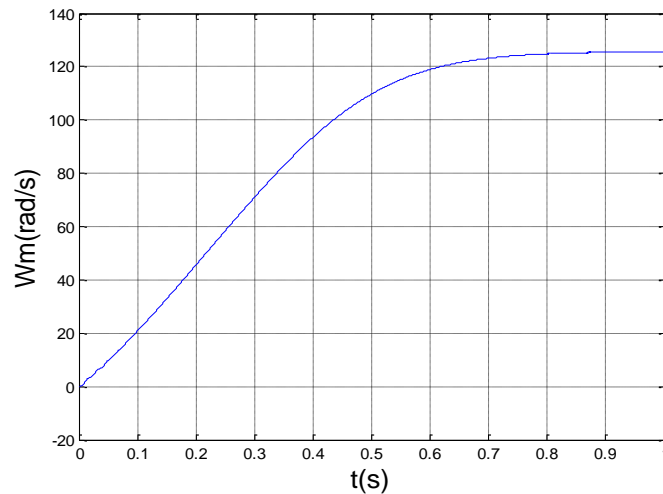


Figure II-15 Courbe de vitesse (rad /s)

On remarque :

Côté réseau

- le courant du réseau suit bien sa référence.
- la tension v_{res1} et le courant i_{res1} sont en phase.

Côté filtre

- les courbes des tensions aux bornes des deux capacités U_{c1} et U_{c2} ont la même forme et sont instable (Croissantes) et pratiquement égaux.

Côté onduleur

- la tension de l'onduleur a une forme trois niveaux avec une variation croissante et un THD= 36,85% .

Côté machine

- le courant statorique de la machine asynchrone a une forme presque sinusoïdale avec une variation croissante.
- le courant de démarrage de la machine asynchrone est trois fois le courant nominale.
- la vitesse atteint son régime permanent au bout de 0.9 s.

Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté la modélisation vectoriel de l'onduleur à trois niveau et on a donné le modèle du redresseur triphasé à trois niveaux, après on l'a appliqué la commande hystérésis.

Ensuite, on a étudié la cascade qui est constituée du redresseur commande par hystérésis–onduleur commandé par MLI et la machine asynchrone comme une charge inductif après on a présenté les résultats de simulation.

D'après les résultats de simulation, on a trouvé le problème de l'instabilité (déséquilibre) des tensions du filtre à l'entrée de l'onduleur.

Chapitre III

**Commande
Prédictive de
L'onduleur à Trois
Niveaux**

Introduction

Les travaux de D. W. Clarke et de son équipe à Oxford au milieu des années 80 ont fait en sorte de remettre au gout du jour une méthode récente qui est celle de la commande. Le formalisme choisi permet de considérer les systèmes linéaires comme des filtres à réponse impulsionnelle finie (FIR pour Finite Impulse Reponse). Les coûts considérés sont quadratiques, la partie estimation repose sur une approche moindres carrés. On peut spécifier des contraintes affines sur les entrées et les sorties.

Toutefois cette technique de commande que l'on peut attacher à la famille des commande prédictive par modèle (MODEL Predictive Control) suscite un intérêt dans le domaine industriel depuis la fin des années 70. [16]

La commande prédictive MPC (Model Prédicative Control) est une technique de commande avancée de l'automatique, Elle peut être utilisée pour commander les systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties où le simple régulateur PI est insuffisant. Cette technique est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants avec de nombreuses perturbations.[17]

Au chapitre précédent nous avons vu la simulation de la cascade redresseur 3-niveaux onduleur 3-niveaux par la commande hystérésis (pour le redresseur) et prédictive (pour l'onduleur) connecté au réseau, les résultats de simulation ont montré le besoin et la nécessité d'application d'une commande non linéaire comme la commande prédictive sur ce système, dans le but de régler la tension de bus continu à l'entrée de l'onduleur et de le rendre relativement stable .

III.1. Principe de la commande prédictive

Le principe de base de la commande prédictive consiste de prendre en compte, à l'instant actuel, le comportement futur, par le biais d'utilisation explicite d'un modèle numérique du système dans le but de prédire la sortie dans le futur, sur un horizon fini. Un des intérêts des méthodes prédictives réside dans le fait que, pour une consigne pré calculée sur un certain horizon, il est ainsi possible d'exploiter les informations de trajectoires prédéfinies situées dans le future, étant donné que le but est de faire correspondre la sortie du système avec cette consigne sur un horizon fini .[18]

La méthode prédictive (MPC) a plusieurs étapes qui doivent être suivie pour atteindre le résultat désiré qui est une variable $x(t)$ le plus près possible de la valeur de référence $x^*(t)$.

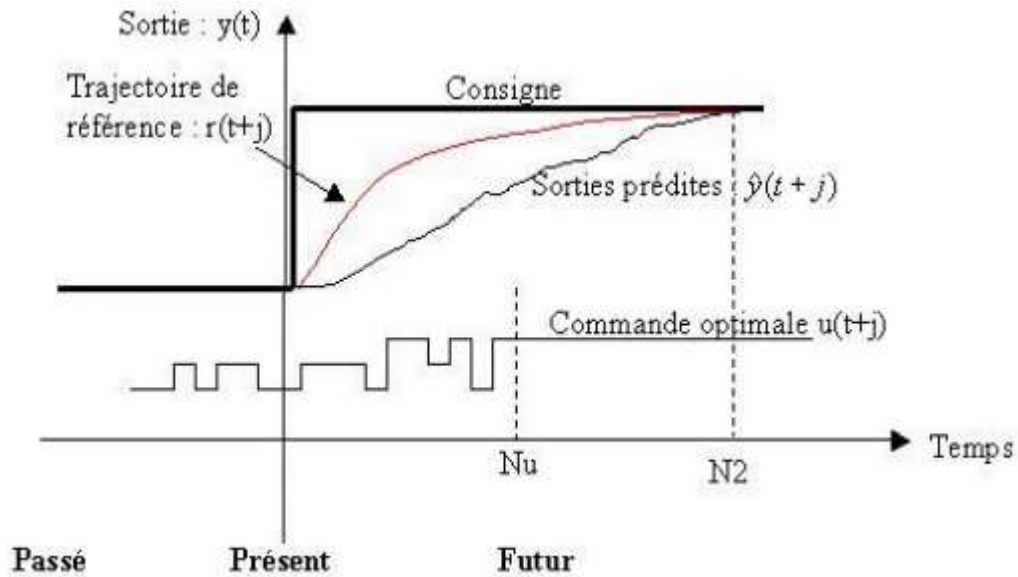


Figure III-1 Principe de la commande prédictive

III.2. Modèle prédictif de l'onduleur triphasé à 3 niveaux

Dans cette partie, on va procéder à la simulation de la cascade redresseur 3-niveaux (commandé par l'hystérésis) onduleur 3-niveaux (commandé par la prédictive).

La structure globale de cette stratégie de commande prédictive est illustrée sur la (Fig. III-2)

Par l'approximation d'Euler $\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(k+1)-x(k)}{T_e}$ les variables $x(k+1)$ du système sont prédites sur une période d'échantillonnage T_s à partir du modèle du système et des valeurs mesurées. Après on va calculer la fonction de coûts de chaque configuration possible (les 27 configurations des interrupteurs de commande de l'onduleur).

Finalement, on va choisir la meilleure configuration qui minimise la fonction de coûts et l'applique directement au convertisseur.

Afin d'établir l'expression de la loi de commande prédictive permettant le calcul du vecteur de commande optimal, les équations du modèle du système sont données comme suit :

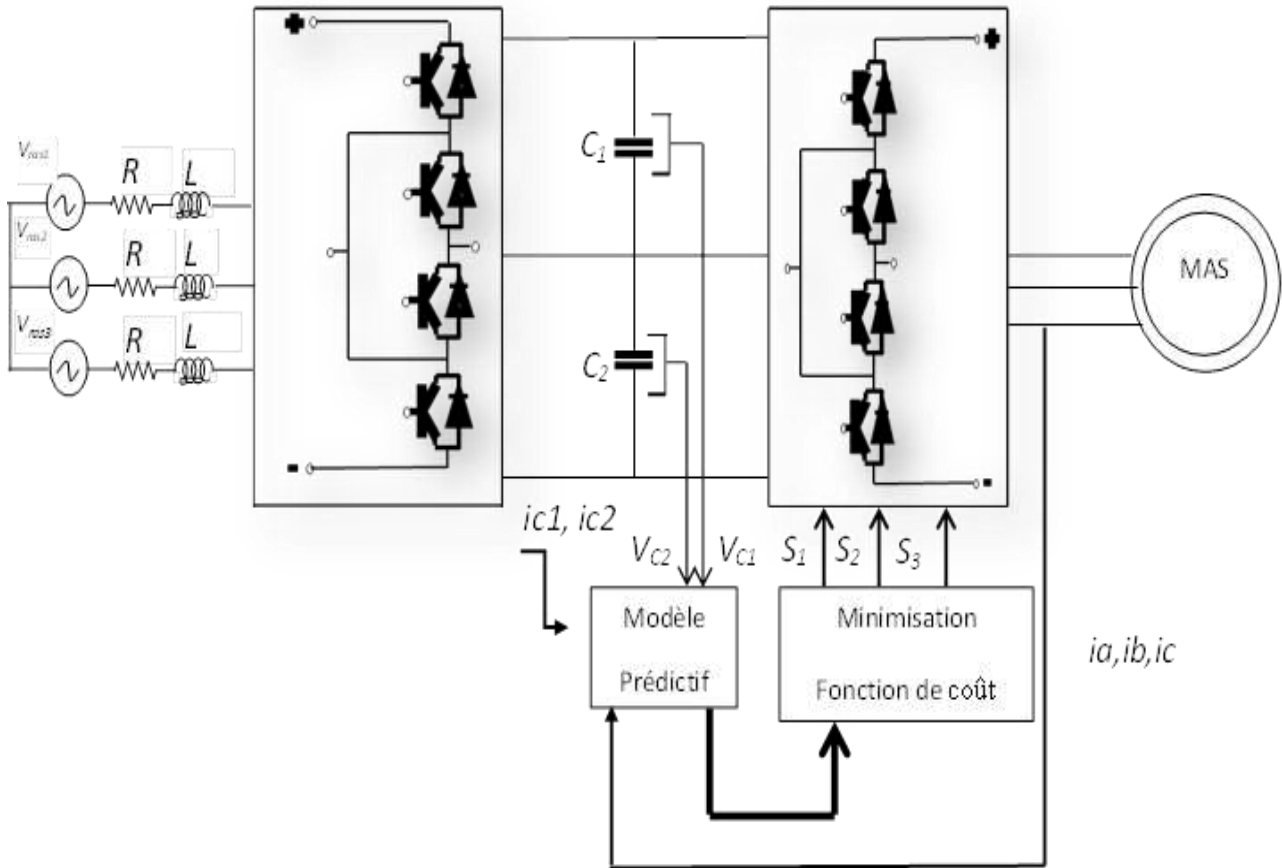


Figure III-2 Modèle prédictif de l'onduleur triphasé à 3 niveaux

Les expressions des courants (i_{c1}, i_{c2}) traversant respectivement les condensateurs (C_1, C_2) sont données comme suit :

$$i_{c1} = c_1 \frac{du_{C1}}{dt} = I_{red1} - I_{ond1} \tag{III-1}$$

$$i_{c2} = c_2 \frac{du_{c2}}{dt} = -I_{red3} + I_{ond3} \tag{III-2}$$

Les expressions des courants (I_{ond1}, I_{ond2}) traversant l'onduleur sont données comme suit :

$$I_{ond1} = (i_A * F_{11} * (i) + i_B * F_{21} (i) * F_{22} (i) + i_C * F_{31} (i) * F_{32} (i)) \tag{III-3}$$

$$I_{ond2} = (i_A * (1 - F_{13} * (i)) * (1 - F_{14} (i)) + i_B * (1 - F_{23} (i)) * (1 - F_{24} (i)) + i_C * (1 - F_{33} (i)) * (1 - F_{34} (i))) \tag{III-4}$$

Avec : $i = (1, 2, 3, \dots, 27)$ l'état des interrupteur

Pour obtenir un modèle à temps discret, il est nécessaire d'utiliser des méthodes de discrétisation. Afin d'approximer les dérivées, on utilise la méthode d'Euler, dont la dérivée peut être exprimée par :

$$c_1 \frac{du_{C1}}{dt} \approx c_1 \frac{\Delta u_{C1}}{\Delta t} = \frac{U_{C1}(k+1) - U_{C1}(k)}{T_e} = I_{red1} - I_{ond1} \quad \text{III-5}$$

$$c_2 \frac{du_{C2}}{dt} \approx c_2 \frac{\Delta u_{C2}}{\Delta t} = \frac{U_{C2}(k+1) - U_{C2}(k)}{T_e} = -I_{red2} + I_{ond2} \quad \text{III-6}$$

Avec :

T_e : La période d'échantillonnage.

K : L'instant d'échantillonnage.

Les équations qui permet la prédiction des tensions traversant respectivement les condensateurs (C_1 , C_2) sont données comme suit :

$$U_{C1}(i)(K+1) = (T_e / c_1) * [I_{red1} - I_{ond1}] + U_{C1}(i)(k) \quad \text{III-7}$$

$$U_{C2}(i)(K+1) = (T_e / c_2) * [-I_{red2} + I_{ond2}] + U_{C2}(i)(k) \quad \text{III-8}$$

III.3. Algorithme (1) de la commande prédictive

Les équations d'erreur pour choisir la meilleure configuration qui minimise la fonction de coûts sont données par :

$$e(i) = | (U_{ref} - U_{C1}(i)(k+1)) | + | (U_{ref} - U_{C2}(i)(k+1)) | \quad \text{III-9}$$

La (Fig. III-3) représente l'algorithme (1) détaillé qui explique les principales étapes de la commande prédictive appliquée sur l'onduleur. Dans cet algorithme on va représenter la fonction de coût calculée pour l'état de commutation i et e_{opt} l'erreur minimal qui représente l'état de commutation qui minimise cette erreur.

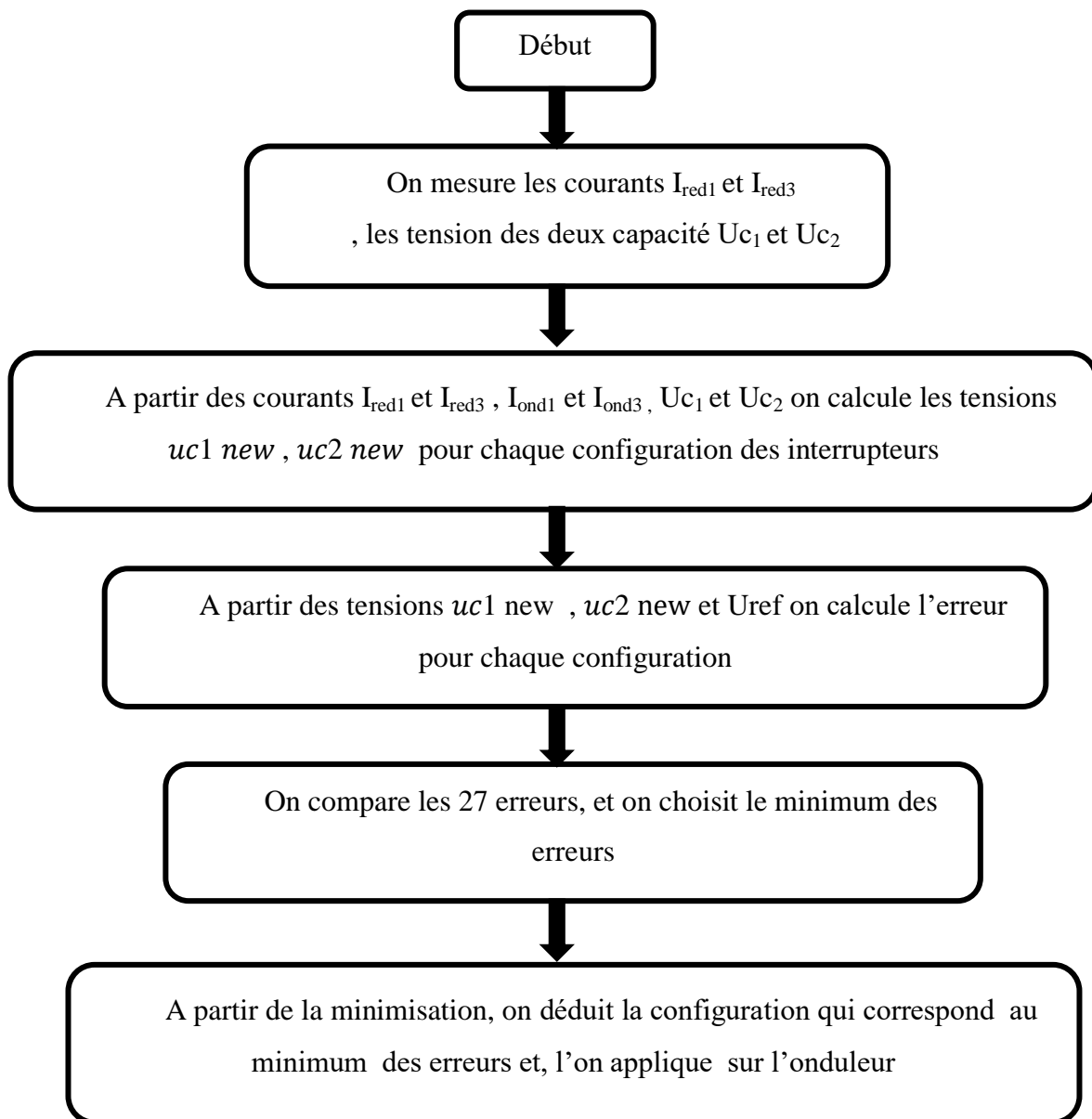


Figure III-3 Les principales étapes de la commande prédictive appliquée sur l'onduleur (algorithmes 1)

III.4. Résultat de simulation

Dans ces figures, on va présenter les résultats de la simulation de la commande prédictive (algorithme(1)) sur l'onduleur à trois niveaux par Matlab/Simulink. Les paramètres utilisés pour la simulation sont donnés par :

- Le réseau triphasé a une tension efficace de 792 V avec une fréquence de 60 HZ.
- Le redresseur à trois niveaux est commandé par hystérésis en courant ($I_e = 280$ A, $\Delta i = 1$ A)
- Les paramètres du filtre capacitif intermédiaire sont : $C_1 = C_2 = 0.5$ F.
- La machine asynchrone est à vide ($C_r = 0$).

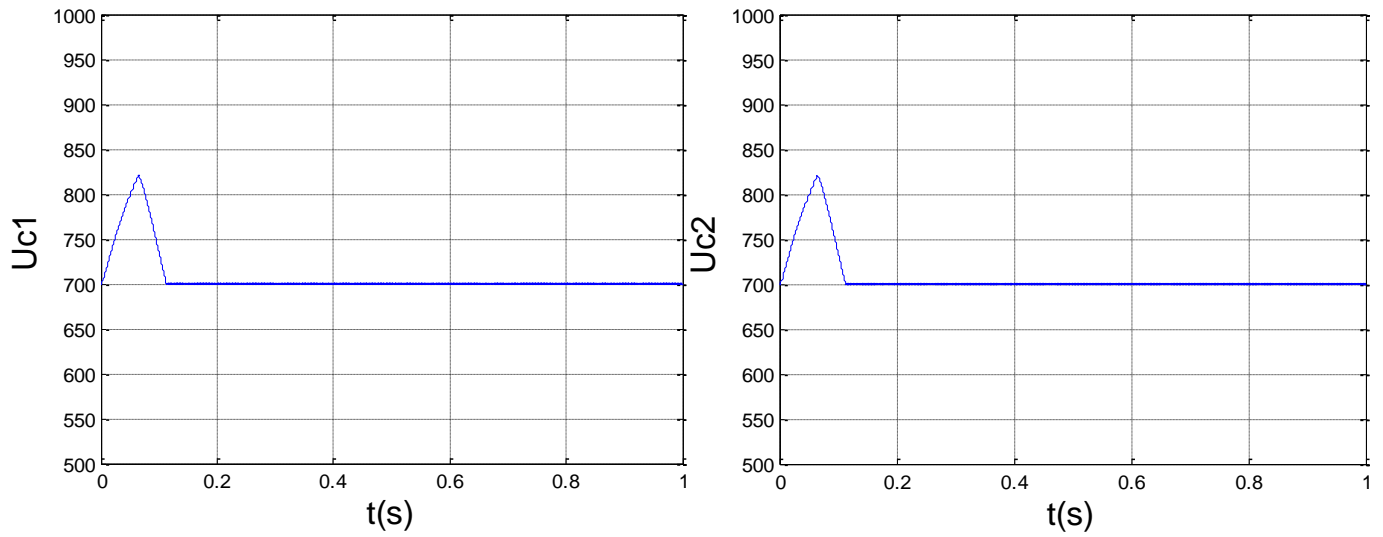


Figure III-4 Les tensions des deux condensateurs U_{c1} et U_{c2}

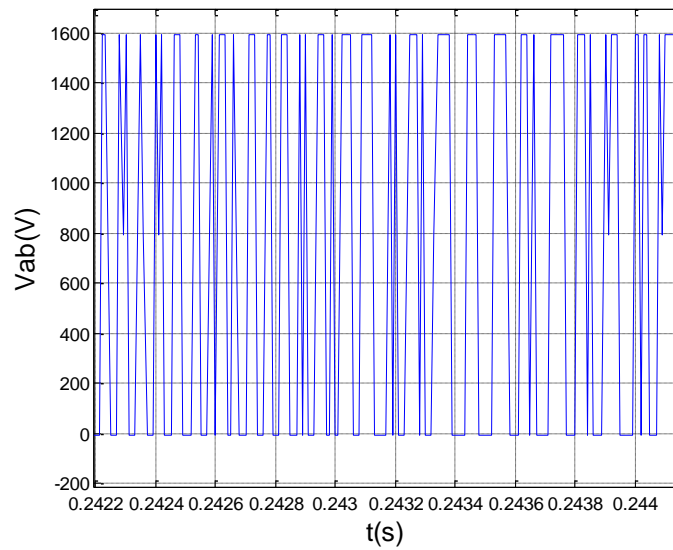


Figure III-5 La tension de l'onduleur (V_{ab})

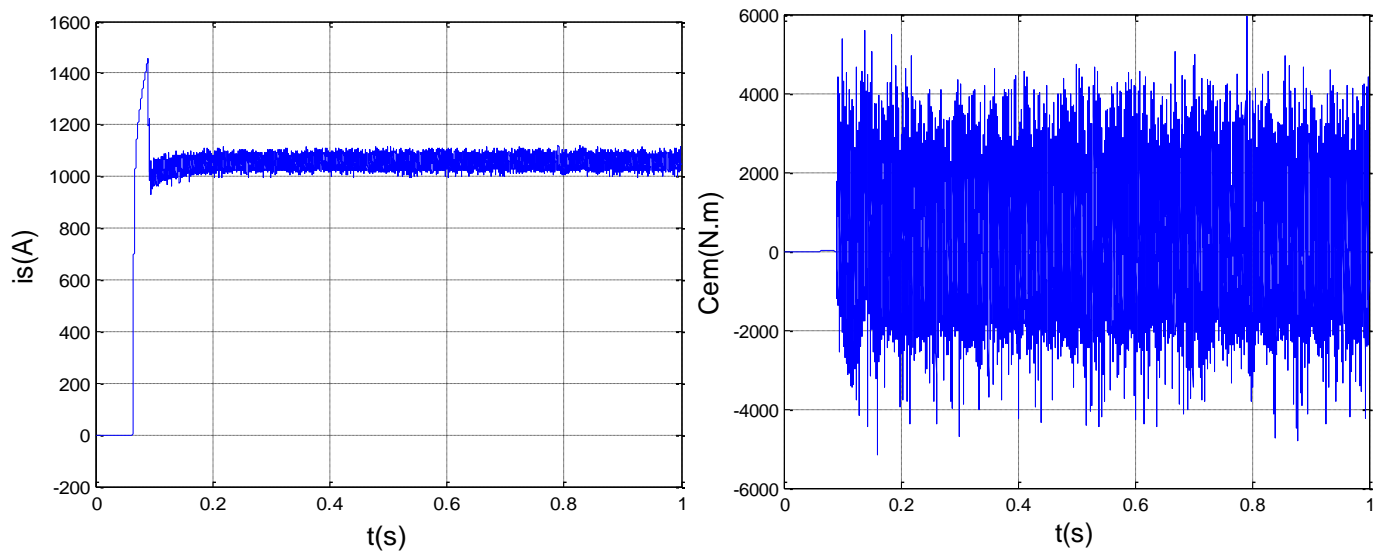


Figure III-6 Le courant statorique et le couple de la MAS

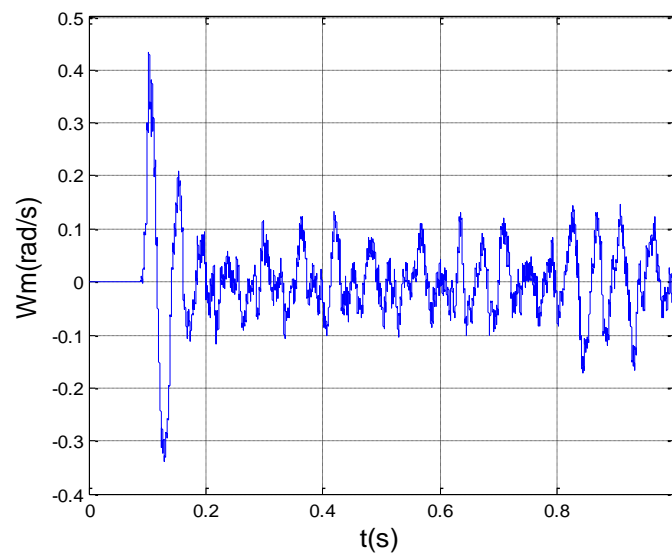


Figure III-7 Courbes de vitesse (rad /s)

On remarque :

Côté filtre

Les deux tensions du filtre U_{c1} et U_{c2} sont équilibrées (stables) après un régime transitoire.

Côté onduleur

La tension de sortie de l'onduleur (V_{ab}) est continue et oscillatoire.

Côté moteur

La machine asynchrone à une mauvaise réponse.

- Le courant statorique est continu avec des oscillations.
- Le couple électromagnétique est oscillatoire autour de 0.
- La vitesse est restée oscillatoire autour de 0, et n'atteindre jamais sa vitesse nominale.

III.5. Algorithme (2) de la commande prédictive

Dans le premier algorithme, nous avons constaté que cet algorithme équilibrait la tension du filtre mais à l'autre côté on a une mauvaise réponse la MAS.

Dans cette partie, on applique l'algorithme 2 pour essayer de régler les deux côtés. Donc on va modifier la fonction de coût.

Les expressions des tensions de chaque ligne s'expriment comme suit:

$$V_{am}(i) = (F_{11}(i) * F_{12}(i) * Uc_1) - ((1 - F_{11}(i)) * (1 - F_{12}(i)) * Uc_2) \quad \text{III-10}$$

$$V_{bm}(i) = (F_{21}(i) * F_{22}(i) * Uc_1) - ((1 - F_{21}(i)) * (1 - F_{22}(i)) * Uc_2) \quad \text{III-11}$$

$$V_{cm}(i) = (F_{31}(i) * F_{32}(i) * Uc_1) - ((1 - F_{31}(i)) * (1 - F_{32}(i)) * Uc_2) \quad \text{III-12}$$

Les expressions de la tension simple s'exprime comme suit:

$$V_1 = (2 * V_{am}(i) - V_{bm}(i) - V_{cm}(i)) / 3 \quad \text{III-13}$$

$$V_2 = (2 * V_{bm}(i) - V_{am}(i) - V_{cm}(i)) / 3 \quad \text{III-14}$$

$$V_3 = (2 * V_{cm}(i) - V_{bm}(i) - V_{am}(i)) / 3 \quad \text{III-15}$$

la fonction de coût s'exprime comme suit :

$$vref1 = Vm \sin(w t)$$

$$vref2 = Vm \sin(w t + 2\pi / 3)$$

$$vref3 = Vm \sin(w t - 4\pi / 3)$$

$$e(i) = | (U_{ref} - Uc_1(i)(k + 1)) | + | (U_{ref} - Uc_2(i)(k + 1)) |$$

$$e(k) = | vref(k) - v(k)(i) | \quad \text{III-16}$$

avec : k= 1,2,3 et i=1,227

$$e(i,k) = \sum e(i) + \sum e(k)$$

III-17

La Fig III-8 représente l'algorithme (2) détaillé qui explique les principales étapes de la commande prédictive appliquée sur l'onduleur.

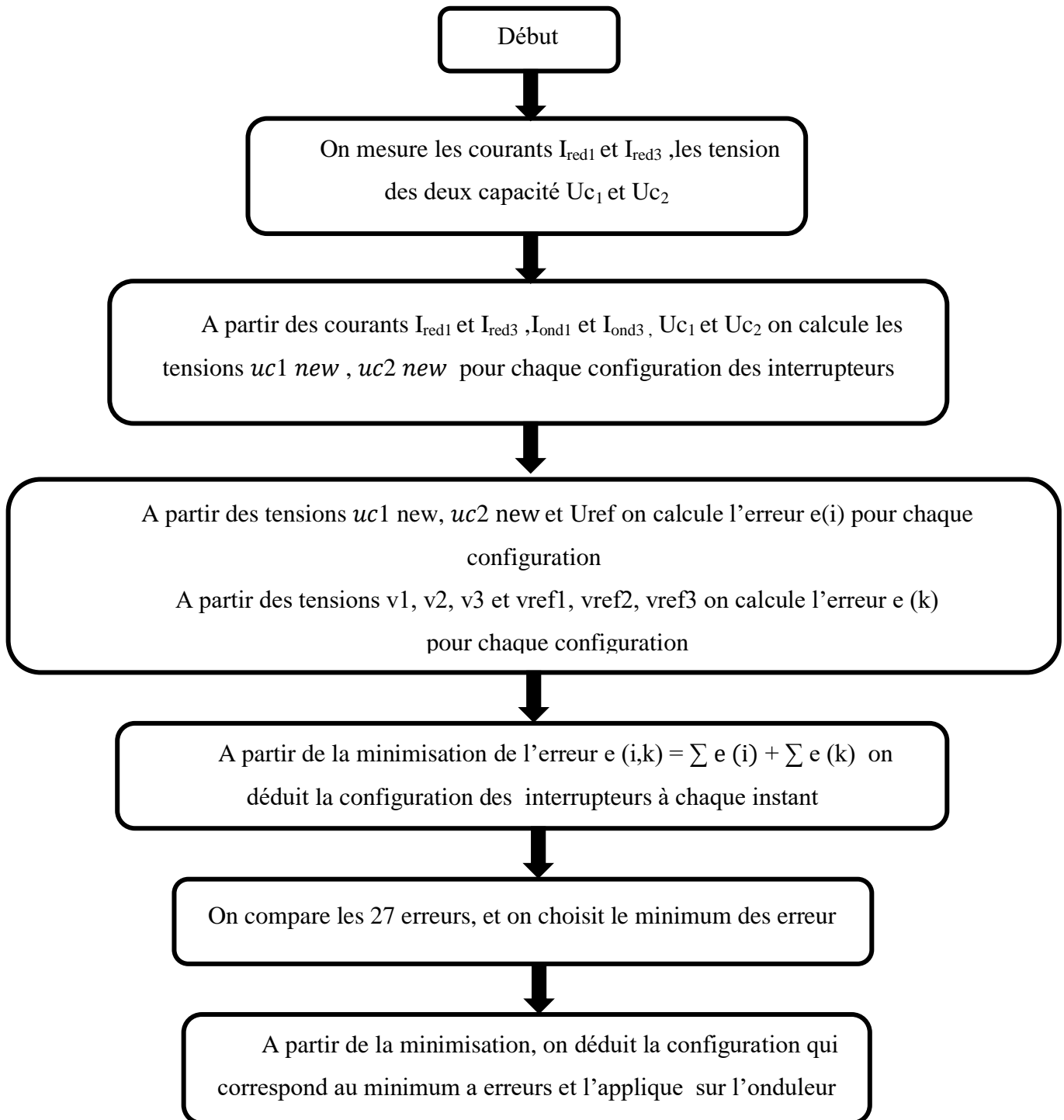


Figure III-8 Les principales étapes de la commande prédictive appliquée sur l'onduleur (algorithmes 2)

III.6. Résultat de simulation

Par l'utilisation de Matlab/Simulink on va donner les résultats de l'application de l'algorithme (2) sur l'onduleur à trois niveaux.

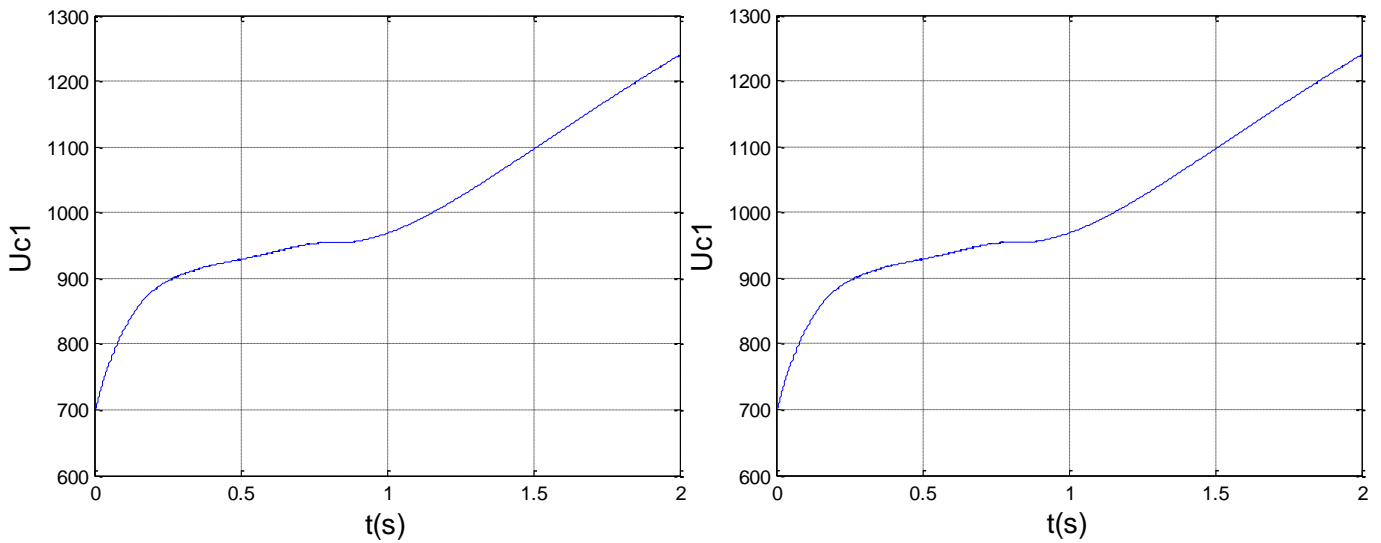


Figure III-9 Les tensions des deux condensateurs Uc1 et Uc2

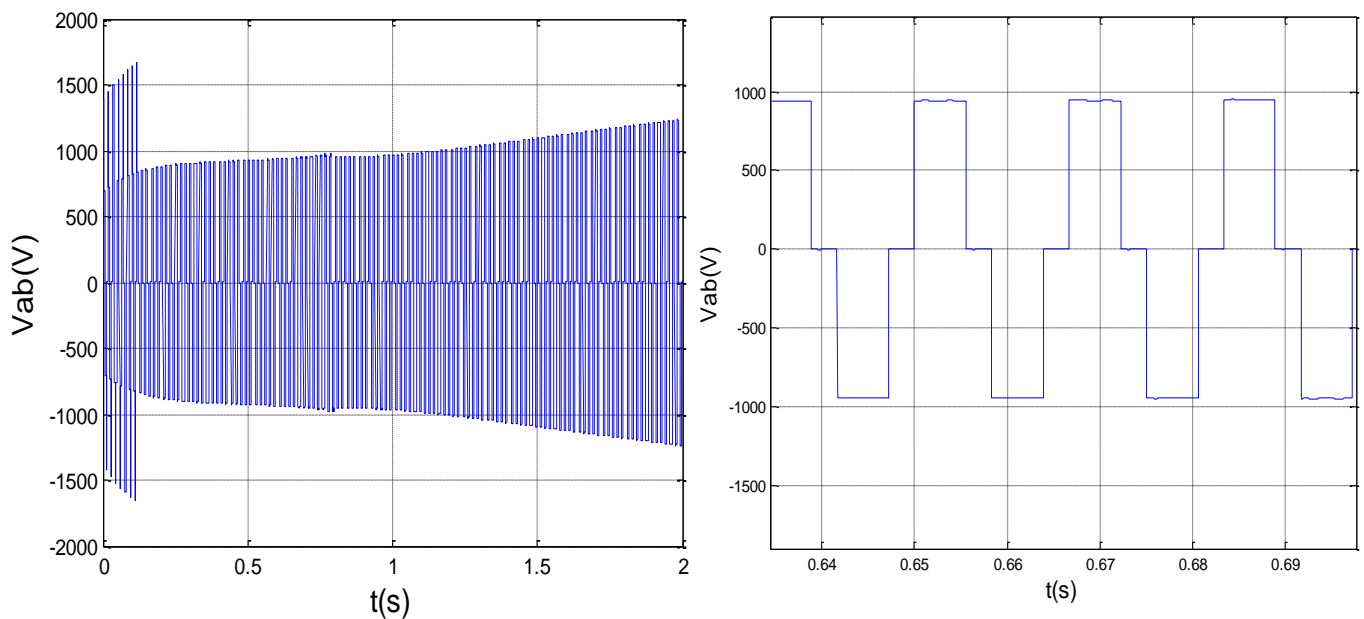


Figure III-10 La tension de l'onduleur (Vab)

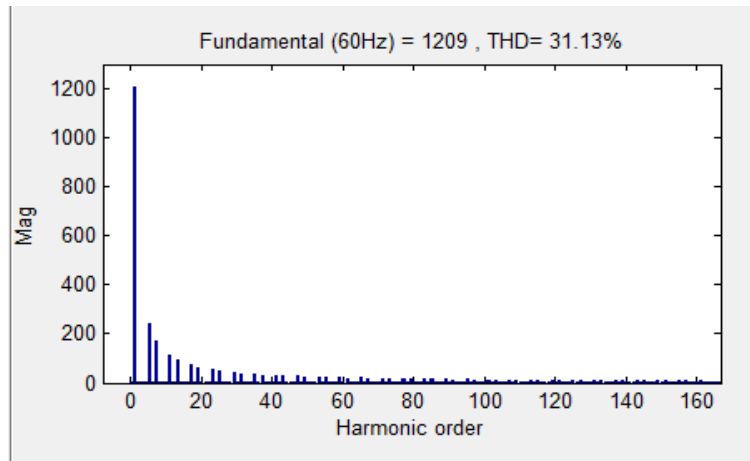


Figure III-11 spectre d'harmoniques de la tension V_{ab} entre (0.96s et 0.98s)

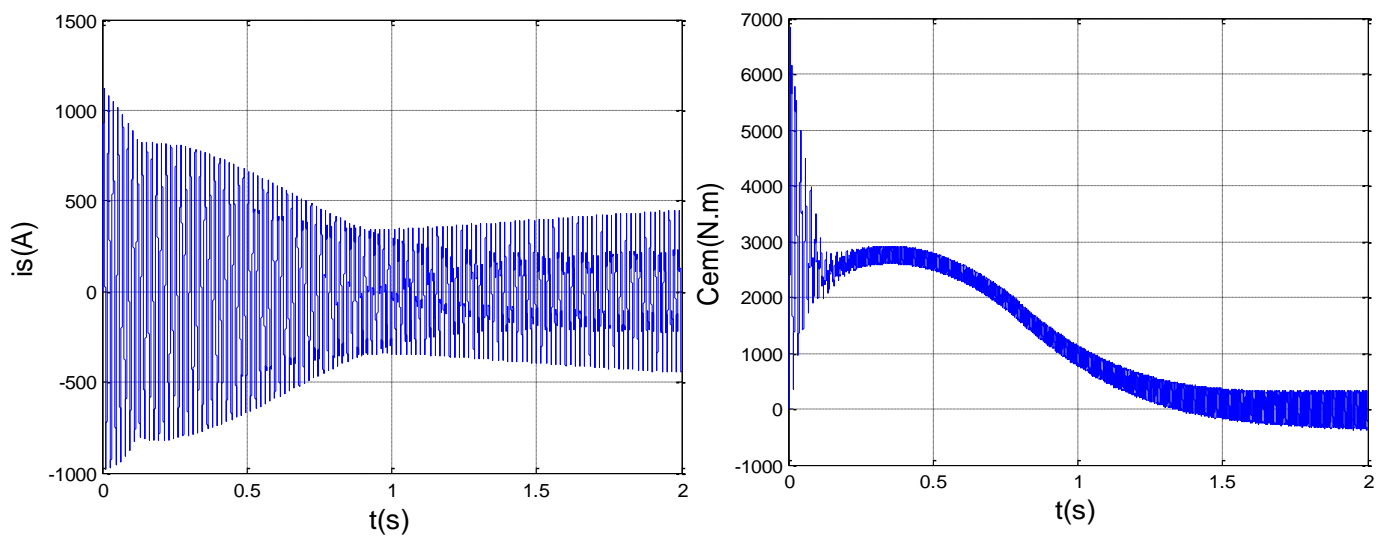


Figure III-12 Le courant statorique et le couple de la MAS

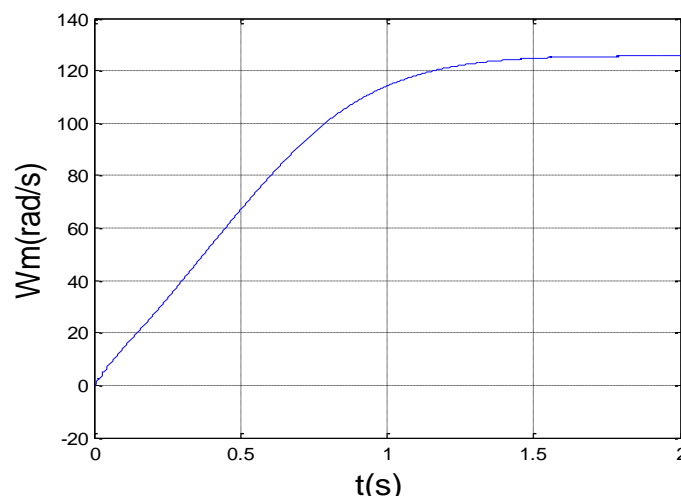


Figure III-13 Courbes de vitesse (rad /s)

On remarque :

Côté filtre

L'instabilité des deux tensions du filtre U_{c1} et U_{c2} , ces tensions sont croissante.

Côté onduleur

On remarque que l'amélioration de la forme de la tension de l'onduleur (V_{ab}) avec un THD réduit (31.13%).

Côté moteur

On remarque que la machine asynchrone a une bonne réponse.

-Le courant statorique a une forme pratiquement sinusoidale, avec une amplitude croissante.

-Le couple électromagnétique est oscillatoire autour de 0, et en augmente avec le temps .

-. La vitesse atteint son régime permanent au bout de 1.6 s.

III.7. Algorithme (3) de la commande prédictive

Dans le deuxième algorithme, nous avons constaté que cet algorithme donnait une bonne réponse de la MAS mais de l'autre côté on a un déséquilibre des tensions du filtre.

Dans cette partie on applique l'**algorithme 3** pour essayer de régler les deux côtés.

L'algorithme (3) est basée sur la modulation vectorielle de l'onduleur à 3 niveaux. On définit le vecteur de la tension de référence V_s et ces composantes, V_d , V_q ainsi que les 24 régions du diagramme vectoriel contenant le vecteur de référence V_s .

Dans chaque région contenant le vecteur V_s , On calcule les erreurs correspondantes aux configurations de chaque région . Puis, on choisit l'erreur minimale. Ensuite, on applique la configuration qui correspond à cette erreur.

Remarque

l'expression de fonction de coût (erreur) dans cette algorithme c'est la même que celle de l'algorithme (1).

La Fig. III-14 représente l'algorithme (3) détaillé qui explique les principales étapes de la commande prédictive appliquée sur l'onduleur.

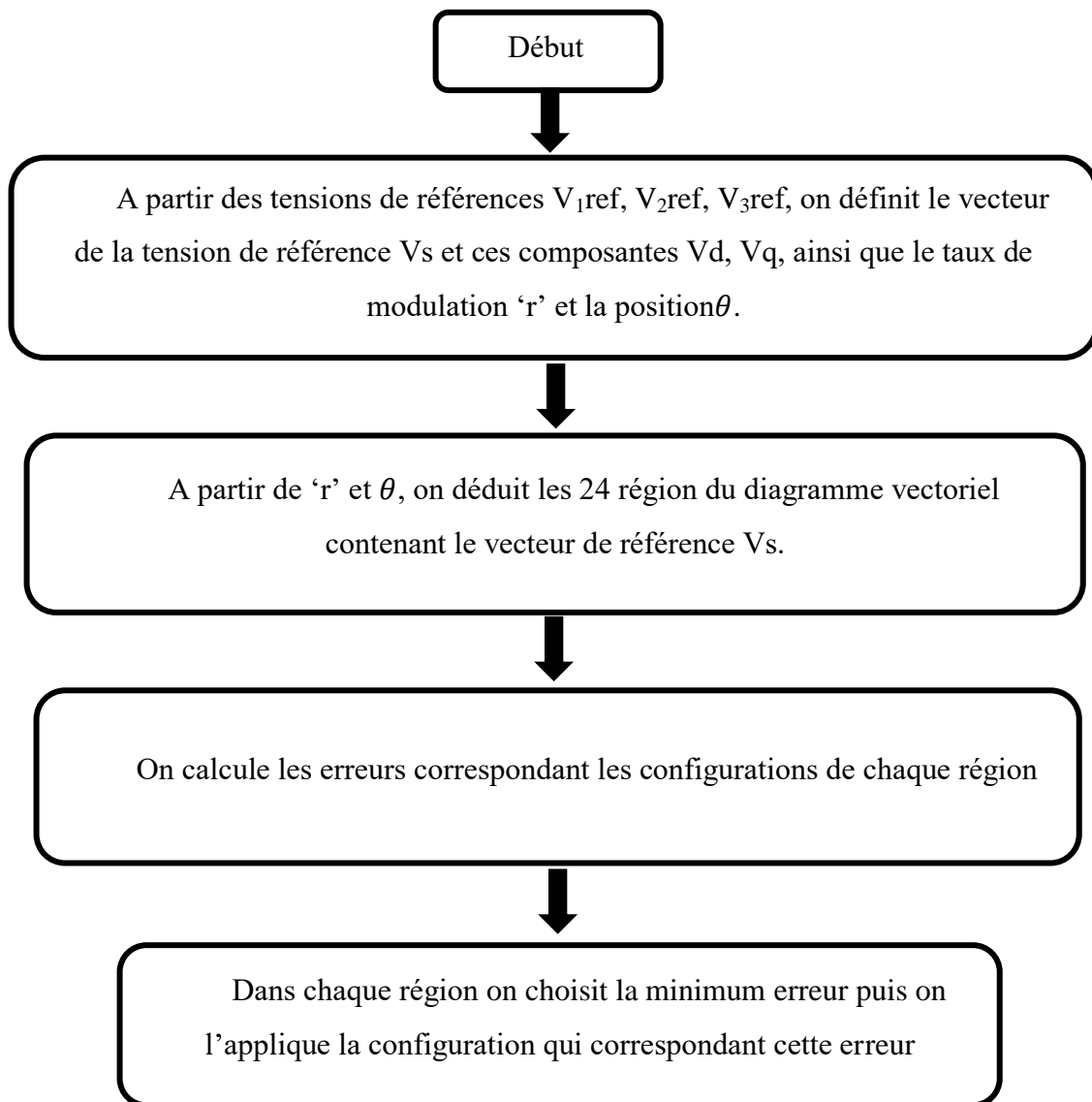


Figure III-14 Les principales étapes de la commande prédictive appliquée sur l'onduleur (algorithmes 3)

III.8. Résultat de simulation

On présente dans ces figures les résultats d'application de la commande prédictive (basée sur la modulation vectorielle).

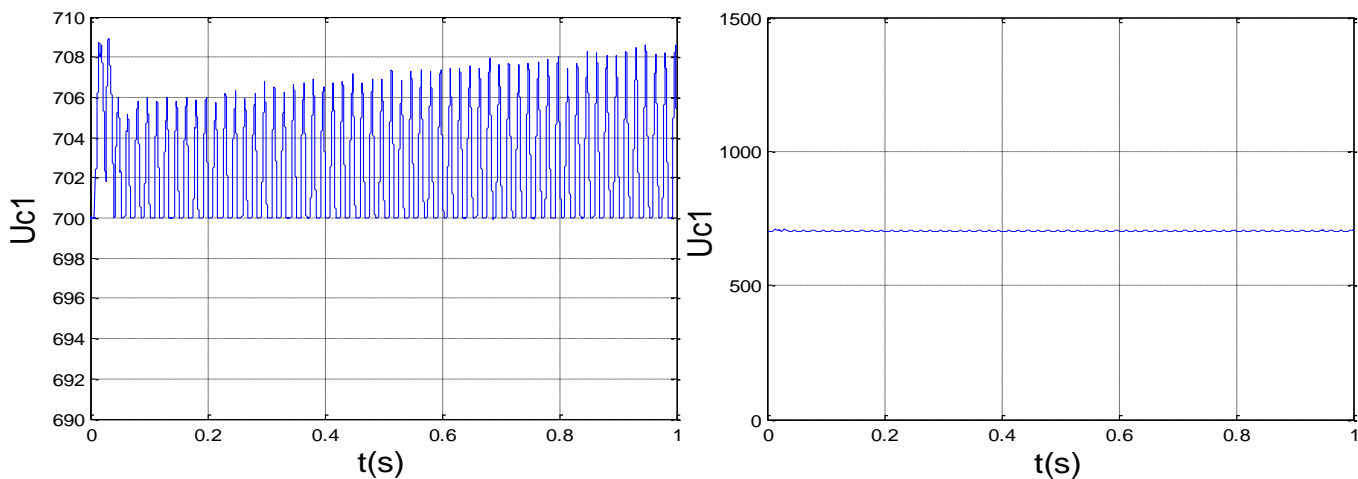


Figure III-15 La tensions du condensateur U_{c1}

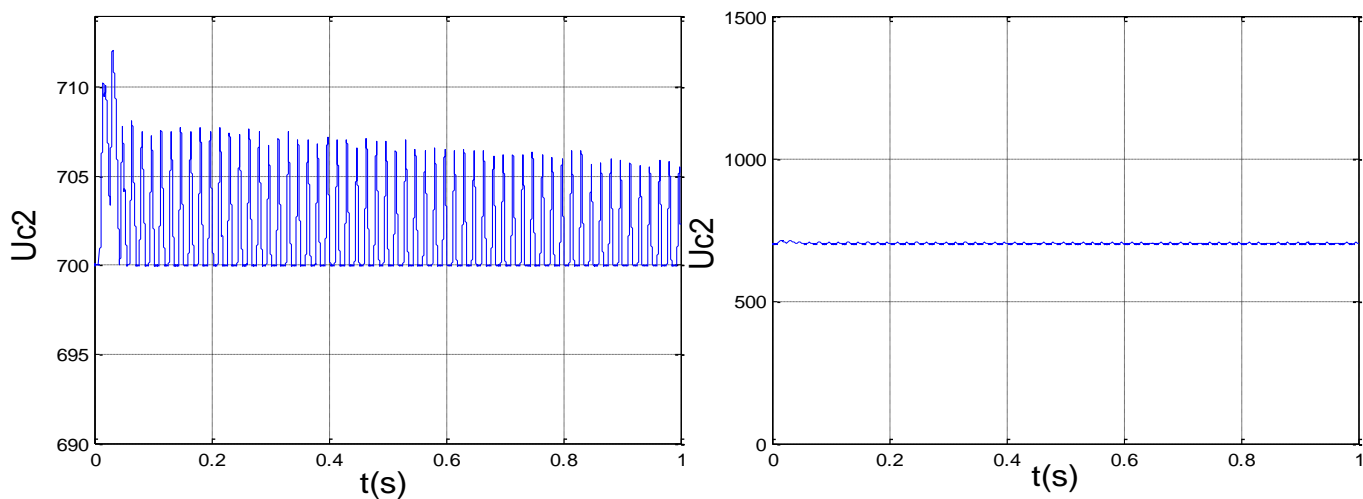


Figure III-16 La tensions du condensateur U_{c2}

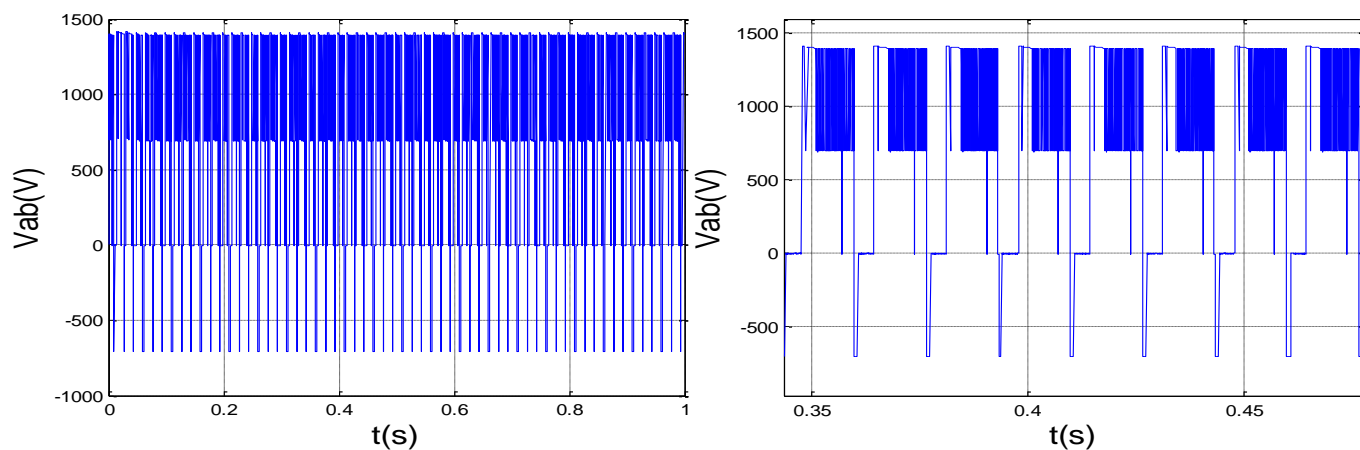


Figure III-17 La tension du l'onduleur (V_{ab})

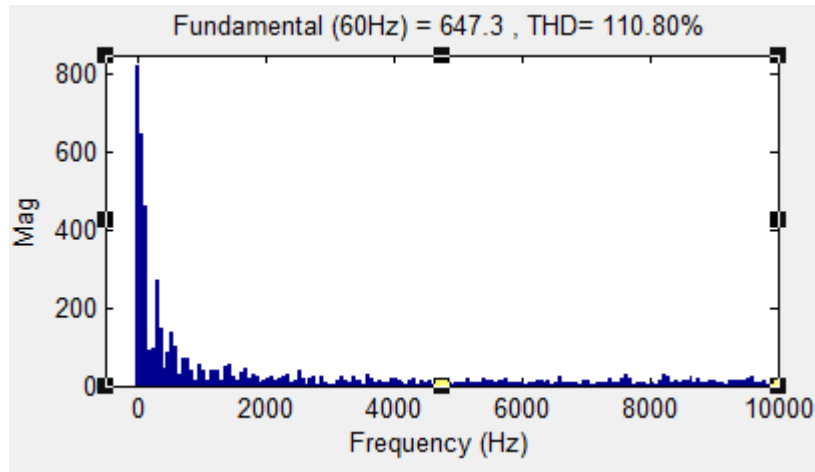


Figure III-18 spectre harmonique de la tension Vab entre (0.1 et 0.116)

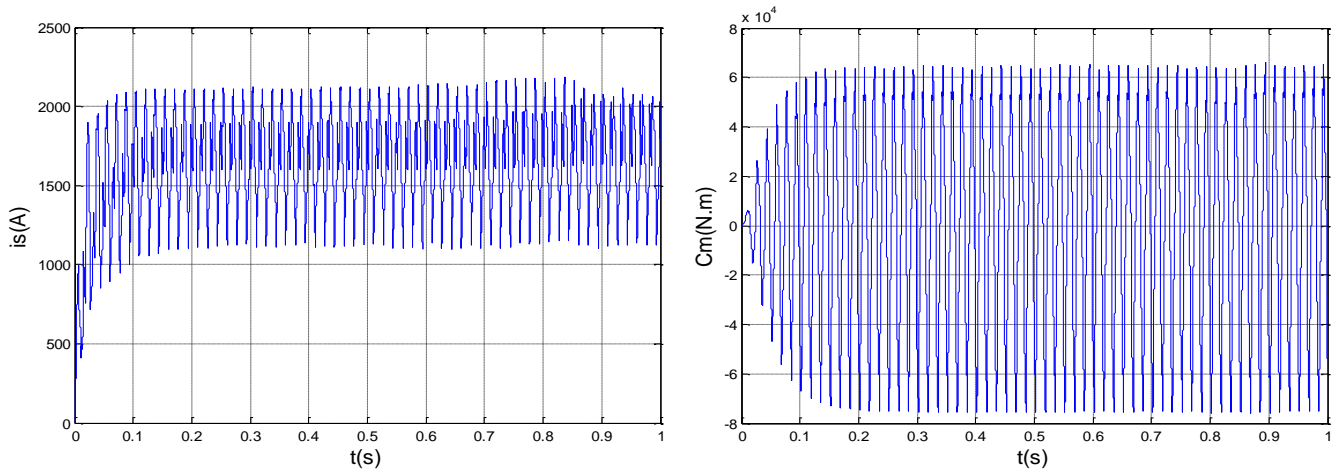


Figure III-19 Le courant statorique et le couple de la MAS

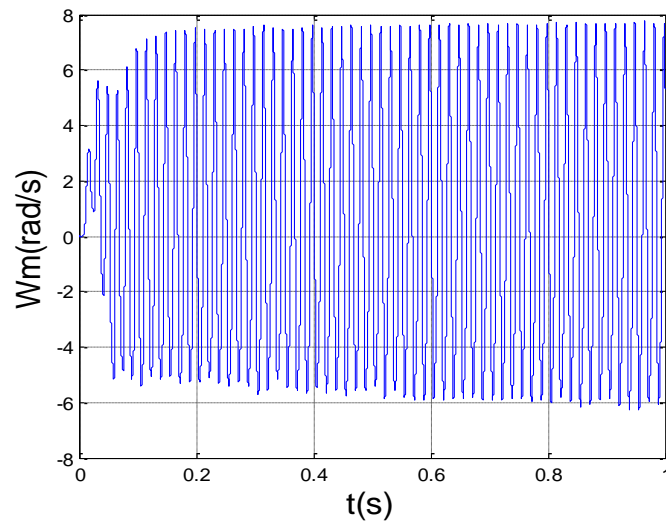


Figure III-20 Courbe de vitesse (tr /min)

On remarque :

Côté filtre

Les deux tensions du filtre U_{c1} et U_{c2} sont équilibrée (stable) après un régime transitoire avec des petites oscillations.

Côté onduleur

La tension de sortie de l'onduleur (V_{ab}) est alternative avec une asymétrie entre l'alternance positive et négative. avec un THD élevé (110.80%) .

Côté moteur

- La machine asynchrone a une mauvaise réponse.
- Le courant statorique est continu avec des oscillations.
- Le couple électromagnétique est oscillatoire autour de 0.
- La vitesse est restée oscillatoire autour de 0, et n'atteindre jamais sa vitesse nominale.

III.9. Comparaison entre les différences commande appliquées sur l'onduleur

	MLI	Algorithme (1)	Algorithme (2)	Algorithme (3)
THD (%)	36.85	-----	31.13	110.80
La tension à l'entrée de l'onduleur (U_{c1} , U_{c2})	Instable	Stable (équilibrée)	Instable	Stable (équilibrée)
La tension V_{ab} de l'onduleur	Alternative (à trois niveaux)	Continue avec des oscillations	Alternative	Alternative (une asymétrie entre l'alternance positive et négative)
La réponse de la machine asynchrone	Bonne réponse	Mauvaise réponse	Bonne réponse	Mauvaise réponse

Table III-1 Comparaison entre les différences commande appliquées sur l'onduleur

III.10. Conclusion

Dans ce chapitre, on a abordé la définition de la commande prédictive et son principe de fonctionnement, Puis on l'a appliqué sur l'onduleur à trois niveaux dans le but de stabiliser la tension du filtre à l'entrée du l'onduleur et la tension à la sortie de l'onduleur et aussi pour avoir une bonne réponse de la MAS.

Chacun des deux algorithmes (1) et (3) ont équilibré la tension du filtre U_{c1} et U_{c2} , mais de l'autre côté on a une mauvaise réponse de la MAS.

L'algorithme (2) a réglé la tension V_{ab} à la sortie de l'onduleur avec un THD réduit et donne aussi une bonne réponse de la MAS, dans l'autre côté, on a un déséquilibre des deux tensions du filtre.

Enfin, on peut conclure que la commande prédictive n'a pas une dynamique pour régler les deux côtés à l'entrée et a la sortie de l'onduleur au même temps.

Conclusion générale

Dans ce travail on a présenté l'étude de l'application de la commande prédictive sur l'onduleur trois niveaux de type à diodes flottantes.

Dans le premier chapitre, on a abordé la modélisation de l'onduleur à trois niveaux et du moteur asynchrone.

Dans le deuxième chapitre, on a présenté la modélisation de l'onduleur à trois niveaux puis la simulation de la cascade redresseur à trois niveaux (commandé par hystérésis) - onduleur à trois niveaux (commandé par la MLI)- moteur asynchrone comme une charge inductive. Les résultats de la simulation prouvent un déséquilibre de la tension des deux condensateurs à l'entrée de l'onduleur.

C'est pour ça nous avons essayé de résoudre ce problème-là par l'application de la commande prédictive sur l'onduleur.

D'après le chapitre 3 les résultats de la simulation montrent certains avantages et inconvénients de la commande prédictive par rapport à la commande MLI sinusoïdale

Les avantages

- stabiliser la tension du bus continu (algorithme (1) et (3))
- donner un THD de tension de sortie réduit par rapport à celle de la commande MLI (algorithme (2)).

Les inconvénients

A partir des trois algorithmes de la commande prédictive nous ne pouvions pas régler les deux côtes au même temps à l'entrée et à la sortie de l'onduleur.

Comme point de vue extrait de ce travail, on propose :

- d'étudier la commande prédictive de la machine asynchrone reliée à un onduleur à trois niveaux .
- de remplacer l'onduleur à trois niveaux par un onduleur à cinq niveaux.

Bibliographie

- [1] Lahlili,Dj. MLI Vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multi niveaux. Application à la conduite de la machine asynchrone, Thèse de doctorat, 2009.
- [2] Bouafia.B, & Ahriche.A. Modélisation et Commande d'un Onduleur Triphasé à Trois Niveaux. Application à la Conduite d'une Machine Asynchrone Triphasée, mémoire master ,2002.
- [3] Bouchareb, K, & Chelghoum, A. Etude, modélisation et simulation d'une Machine asynchrone, Thèse de doctorat, Alger ,2020 .
- [4] Kerboua, A .Machines électriques à courant alternatif, Université de mascara, 2015.
- [5] Youcef, S., & Omar, K. Etude et simulation d'un moteur asynchrone, projet fin d'étude licence, 2021.
- [6] Bendemmagh, W. Commande de la machine asynchrone par la cascade hypo synchrone à base des logiciels SIMPLORER et MATLAB, Thèse de doctorat, 2018.
- [7] Moussa, E, & Belaid, B. Modélisation et commande d'un onduleur triphasé multi-niveaux, Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.2013.
- [8] Belhamra, A. Stratégies De Commande Des Onduleurs Multi niveaux (MLI ST et MLI Vectorielle), mémoire master ,2019.
- [9] Sellami,O, & Gachi,M. Réalisation et commande d'un onduleur triphasé a trois niveaux a structure NBC, mémoire master ,2020.
- [10] Adjimi, N., & Belaidi, W. Modélisation et commande d'un onduleur MLI Triphasée, mémoire master ,2009.
- [11] Zoghbi, A. Commande des onduleurs multi-niveaux, Thèse de doctorat, 2013.
- [12] BOUSEHABA, M. Realisation d'une commande MLI a choix multiple, Thèse de doctorat, 2016.
- [13] Bounouira,B .Asservissement Linéaire des Sources de Tension de l'Onduleur Triphasé à Troi Niveaux,mémoire master,2003.
- [14] Chebabi.k, Etude d'une loi de commande En Courant par hystérésis à bande Adaptative pour un onduleur de tension, mémoire master ,2019.
- [15] Boulaam.K, étude de la cascade redresseur a MLI a 3 niveaux-onduleur a 3 niveaux-MSAP application a la commande de vitesse et de position, Thèse d'ingénieur, 1998.
- [16] Petit, N. Commande prédictive, Ecole Centrale Paris, 2006.
- [17] Ladouali, F., & Barra, K. Commande prédictive FS-MPC d'un convertisseur Z-Source pour la conversion de l'énergie photovoltaïque, mémoire master ,2022.

[18] Djaghdali, L. Commande prédictive directe du couple de la machine asynchrone, Thèse de doctorat, 2012.

Annexe

Annexe

Paramètres de la machine asynchrone utilisée pour la simulation :

Puissance nominale	$P_u = 1 \text{ MW}$
Tension nominale	$V_n = 791 \text{ V}$
Couple nominale	$C_{em} = 6500 \text{ N.m}$
Flux nominal	$\varphi_n = 2.48 \text{ Wb}$
Résistance statorique	$R_s = 0.228 \text{ } \Omega$
Résistance rotorique	$R_r = 0.332 \text{ } \Omega$
Inductance statorique	$L_s = 0.0084 \text{ H}$
Inductance rotorique	$L_r = 0.0082 \text{ H}$
Inductance mutuelle	$M = 0.0078 \text{ H}$
Moment d'inertie	$J = 20 \text{ Kg.m}^2$
Nombre de paire de pôles	$P = 3$
Fréquence nominale	$f = 60 \text{ Hz}$

Paramètres du réseau d'alimentation utilisé pour la simulation :

Tension de phase	$V_n = 800 \text{ V}$
Résistance de ligne	$R_s = 2 \text{ } \Omega$
Inductance de ligne	$L_s = 0.002 \text{ H}$