

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

ABAIIDI OUSSAMA

NADJA IMAD IDDINE

Thème:

**Modélisation et Simulation d'un Onduleur à
Trois Niveaux NPC alimenter par une machine
asynchrone double étoile**

Soutenu publiquement

Le :15/06/2023

Devant le jury :

M kouras sid ali

MAA

Président

UKM Ouargla

M Bouakaz Ouahid

MAA

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M benyoussef elakhdar

MAA

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2022/2023

Remerciement

Au terme de ce travail, nous voudrions adresser nos sincères remerciements à notre promoteur Mr. BOUAKAZ Ouahid pour la confiance qu'il nous a témoignée en nous proposant ce sujet.

Nous aimerons lui adresser nos vifs remerciements pour leur disponibilité, leur dynamisme et leurs encouragements tout au long de ce projet.

Nous tenons à remercier tous les membres du Département Electrotechnique et tous nos enseignants. Nos remerciements s'adressent à tous les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration du présent travail, à tous nos amis et collègues pour leur soutien moral tout au long de la préparation de ce travail

Dédicace

Le dédié ce modeste travail

A ma mère avec toute mon affection

A mon père avec toute ma reconnaissance

A mon grand-père et mes grand-mères

A mes frères et mes sœurs

A mes oncles et mes tantes

A mes cousins et cousines

A tous mes amis

A tous mes voisins

Résumé :

Le travail proposé dans ce mémoire est la présentation des onduleurs multi-niveaux et d'une Modélisation et Simulation d'un Onduleur à Trois Niveaux NPC alimentent une machine asynchrone Double étoile par la commande de MLI (triangulo-sinusoïdale). a pour objectif de réduire les harmoniques, donc l'obtention d'une tension (ou un courant) sinusoïdale à la sortie de ces convertisseurs et d'améliorer les performances de la machine.

Donc, le système étudié dans notre travail, se compose d'un onduleur triphasé à trois niveaux de tension de type NPC commandé par MLI(triangulo-sinusoïdale). Pour aboutir à cette fin nous comptons de d'améliorer leur fonctionnement et leurs les performances de l'onduleur pour traduire par une meilleure qualité de l'alimentation électrique, une réduction des harmoniques et une amélioration de l'efficacité énergétique.

Mots clés : Onduleurs multi niveaux , Onduleurs à trois niveaux NPC , machine asynchrone Double étoile.

ملخص :

العمل المقترح في هذه الأطروحة هو تقديم محولات متعددة المستويات ونمذجة ومحاكاة لمحول NPC ثلاثي المستويات يعمل على تشغيل آلة غير متزامنة ذات نجمة مزدوجة بواسطة التحكم MLI (ثلاثي الجيوب الأنفية). يهدف إلى تقليل التوافقيات ، وبالتالي الحصول على جهد جيببي (أو تيار) عند خرج هذه المحولات وتحسين أداء الجهاز.

لذلك ، فإن النظام المدروس في عملنا يتكون من عاكس ثلاثي الطور بثلاثة مستويات جهد من نوع NPC يتم التحكم فيه بواسطة MLI (ثلاثي الجيوب الأنفية). لتحقيق هذه الغاية ، نعتزم تحسين تشغيلهم وأدائهم للعاكس لترجمته إلى جودة طاقة أفضل وتقليل التوافقيات وتحسين كفاءة الطاقة.

الكلمات الرئيسية: محولات متعددة المستويات ، محولات ثلاثية المستويات NPC ، آلة غير متزامنة ذات نجمة مزدوجة.

Abstract :

The work proposed in this thesis is the presentation of multi-level inverters and a Modeling and Simulation of a Three-Level NPC Inverter powering a Double-star asynchronous machine by PWM (triangulo-sinusoidal) control. aims to reduce harmonics, thus obtaining a sinusoidal voltage (or current) at the output of these converters and to improve the performance of the machine. Therefore, the system studied in our work consists of a three-phase inverter with three voltage levels of the NPC type controlled by PWM (triangulo-sinusoidal). To achieve this end we intend to improve their operation and their performance of the inverter to translate into better power quality, reduced harmonics and improved energy efficiency.

Keywords:

Multi-level inverters, NPC three-level inverters, Double star asynchronous machine.

Remerciement

Dédicace

Résumé

Sommaire

Listes figures

Liste des tableaux

Liste des notations et abréviations

Table des matières

Introduction Générale :	Error! Bookmark not defined.
Chapitre 1 :état d'art les onduleurs multi niveaux	0
1.1 Introduction :	3
1.1.2 Définition de l'onduleur :	3
1.1.3 Principe générale de fonctionnement :	4
1.1.4 Les différents types d'onduleurs de tension :	5
1.1.4.1 Onduleur monophasé en pont :	5
1.1.4.2 Onduleur monophasé en demi-pont :	6
1.1.4.3 Onduleur triphasé :	6
1.1.5 Classification des onduleurs :	7
1.1.7.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :	9
1.1.7.2 Alimentation de secours :	9
1.1.7.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :	10
1.1.8 Les paramètres de performance de l'onduleur :	10
1.1.8.1 Facteur de distorsion harmonique (THD) :	10
1.1.8.2 Facteur du courant harmonique (HCF) :	10
1.1.8.3 Facteur de distorsion (DF) :	10
1.2 Onduleurs multi-niveaux :	11
1.2.1 Historique et avantages des structures de conversion multiniveaux :	11
1.2.1.1 Historique :	11
1.2.1.2 Avantages :	11
1.2.2 Application des onduleurs multi-niveaux dans le domaine industriel :	12
1.2.3 Principe de fonctionnement l'onduleur multi-niveaux :	13
1.2.4 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :	14
1.2.4.1 Onduleurs multi-niveaux à structure NPC :	15
1.2.4.2 Onduleurs multi-niveaux à condensateurs flottants :	16

Sommaire

1.1.2.4.3 Onduleurs multi-niveaux à structure cascadié :	17
1.2.4.2 Autres topologies :	18
1.3 Conclusion :	18
Chapitre 02 : Modélisation et Simulation de l'onduleur à trois niveaux NPC	20
2.1. Introduction :	19
2.2.1 Structure topologique de l'onduleur :	19
2.3.2.a Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur :	22
2.5.2 Relation entre les fonctions de connexion :	28
2.5.3 Fonction de connexion des demi – bras :	28
2.6.1.a Calcul des tensions polaires : V_{AM} , V_{BM} , V_{CM} :	29
2.6.1.b Calcul des tensions composées de sorties de l'onduleur :	30
2.6.1.c Calcul des tensions simples de sortie de l'onduleur :	30
2.6.2 Matrice de conversion simple $[N(t)]$:	31
2.6.3 Matrice de conversion composée $[M(t)]$:	32
2.8 Simulation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC :	33
2.8.1 La commande triangulo-sinusoïdale avec deux porteuses unipolaires :	33
2.8.2 Résultat de simulation :	34
2.9 Conclusion :	36
Chapitre 3 : Modélisation et simulation de Machine Asynchrone à Double Etoile	39
3.1 Introduction :	37
3.2 Description de machine asynchrone à double étoile :	37
3.3.1 Hypothèses simplificatrices:	38
3.4 Modélisation de la machine à double étoile :	39
3.4.1 Modèle de la machine asynchrone à double étoile :	39
3.4.1.1 Equations électrique de la machine :	39
3.4.1.1.3 Energie magnétique :	42
3.4.1.1.4 Couple électromagnétique :	42
3.4.1.1.5 Equation mécanique :	43
3.4.2 Transformation de base de park :	43
3.4.3 Application de la transformation de Park à la MASDE :	44
3.4.3.1 Equations transformées :	44
3.5 Equations matricielle de la machine avec transformation de PARK :	45
3.5.1 Equations des tensions :	45
3.5.2 Les équations des tensions définitives de la MASDE:	46
3.5.3 Equations magnétiques :	46

Sommaire

3.5.4 Equation mécanique :	47
3.5.4.a Puissance instantanée :	47
3.5.4.b Couple électromagnétique :	48
Conclusion Générale	57
Bibliographie	58

Listes figures

Chapiter 01 :

N° de figure	Titer	N° de page
1.1	Schéma bloc de la conversion continue-alternative.	4
1.2	Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).	5
1.3	Fonctionnement de l'onduleur dans le 1er demi-cycle	5
1.4	Fonctionnement de l'onduleur dans le 2ème demis cycle	6
1.5	Signal complet de l'onduleur	6
1.6	Onduleur monophasé en pont.	7
1.7	Onduleur en demi-pont.	7
1.8	Onduleur triphasé	8
1.9	Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone	10
1.10	Alimentation de secours	10
1.11	Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes	11
1.12	Schéma d'un bras d'onduleurs à : (a) Deux niveaux, (b) Trois niveaux, (c) N niveaux.	14
1.13	Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.	15
1.14	Schéma d'un convertisseur NPC 3 niveaux	16

Chapiter 02 :

2.1	Structure d'une conversion indirecte AC/AC	22
2.2	Structure de puissance de l'onduleur à trois niveaux de type	22
2.3	Interrupteur bidirectionnel en courant	23
2.4	Caractéristique statique de l'interrupteur (T)	23
2.5	Caractéristique statique de la diode (D)	23
2.6	Caractéristique statique de l'interrupteur bidirectionnel en courant	23
2.7	Modèle de Pétri de l'interrupteur bidirectionnel en courant	24
2.8	Les différentes configurations électriques d'un bras de l'onduleur	25
2.9	Transition entre deux configurations	28
2.10	Réseau de Pétri série de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux de type NPC, en mode commandable.	29
2.11	Modèle de connaissance globale de l'association : Onduleur – charge triphasée	35
2..12	La Tension de sortie V_{ab}	37
2.13	La Tension de sortie V_{bc}	37
2.14	La Tension de sortie V_{ca}	38
2.15	Le spectre d'harmonique de la tension	38

Chapitre 3 :

3.1	Représentation des enroulements de la machine à double étoile	42
-----	---	----

Listes figures

3.2	Représentation schématique du modèle de PARK de la MASDE	47
3.3	Le schéma bloc de la Machine asynchrone double étoile sous matlab/simulink	53
3.4	Performances de la machine asynchrone double étoile avec application d'un couple de charge $C_r=14$ N.m entre 2 et 3.5s	54
3.5	Structure générale de l'alimentation de la MASDE.	55
3.6	Principe de la commande triangulo – sinusoïdale à deux porteuses bipolaire	56
3.7	Performances de la conduite de la MASDE alimentée par deux onduleurs à trois niveaux commandés par la stratégie triangulo – sinusoïdale à deux porteuses bipolaires ($m=21$, $r=0.8$) avec application d'un couple résistant à l'instant $t=2$ s ($C_r=14$ N.m).	60

Liste des tableaux

Chapiter 2 :

N° de tableau	Titre	N° de page
2.1	Tableau récapitulatif relatif au bras n° 1	26
2.2	Tableau des excitations relatif au bras n° 1	27
2.3	Tableau des excitations relatif au bras (i)	31

Chapiter 2 :

4.1	Les opérateurs de la logique floue.	68
4.2	Matrice d'inférence.	70

Liste des notations et abréviations

l'onduleur :

AC	Alternative Current
DC	Direct Current
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MOSFET	Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor.
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
JFET	Junction Field Effect Transistor
MLI	Modulation à Largeur d'impulsion
NPC	Neutral Point Clamped
MPC	Multiple Point Clamped
FC	Flying Capacitor
PUC	Packed U Cells
MPUC	Packed U Cells Modified
PWM	Pulse Width Modulation
THD	Total Harmonic Distorsion
P	Proportionnel
PI	Proportionnel Intégral
PID	Régulateur proportionnel intégral dérivé.
DC/DC	Continu-continu.
Vab	La tension de sortie de l'onduleur
Vaux	Tension aux bornes du condensateur
Vbus	Tension aux bornes de source continue
Fp	La fréquence de la porteuse.
Fm	La fréquence de la modulent.
Vm	Amplitude de la modulent.
Vp	Amplitude de la porteuse.

Machine asynchrone :

MASDE : Machine asynchrone double étoile.

$V_a V_b V_c$: Source de tension triphasée en [V].

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}, V_{sd}$, et V_{se} : Tensions des phases statoriques en [V].

V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} : des tensions de phases rotoriques en [V]

$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, I_{sd}, I_{se}$: Courants des phases statoriques en [A]

I_{ra}, I_{rb}, I_{rc} : Courants des phases rotoriques en [A]

$\Phi_{sa}, \Phi_{sb}, \Phi_{sc}, \Phi_{sd}, \Phi_{se}$ se Flux des phases statoriques en [Wb]

$\Phi_{ra}, \Phi_{rb}, \Phi_{rc}$ Flux des phases rotoriques en [Wb]

R_s : La résistance statorique en [Ω]

R_r : L résistance rotorique en [Ω]

L_{ss}, L_{rr} : Représentent respectivement les matrices d'inductance (propres, mutuelles) statoriques et rotoriques en [H]

L_{sr}, L_{rs} : Les inductances de couplage entre le stator et le rotor en [H]

L_s : L'inductance propre d'une phase statorique en [H]

L_r : L'inductance propre d'une phase rotorique en [H]

L_{ms} : L'inductance mutuelle au stator en [H]

L_{mr} : L'inductance mutuelle au rotor en [H]

L_m : L'inductance de magnétisante en [H]

J : Le moment d'inertie de la machine en [Kg.m²]

C_{em} : Le couple électromagnétique en [N.m]

C_r : Le couple résistant en [[N.m]]

Ω : La vitesse de rotation de la MASP en [tr/min]

V_{ds}, V_{dr} Les tensions statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe d en [V]

V_{qs}, V_{qr} : Les tensions statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe q en [V]

Φ_{ds}, Φ_{dr} : Les flux statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe d en [Wb]

Φ_{qs}, Φ_{qr} : Les flux statorique et rotorique respectivement, suivant l'axe q en [Wb]

Introduction Générale

Introduction Générale :

L'électronique de puissance joue un rôle essentiel dans de nombreuses applications, telles que les systèmes d'alimentation, les systèmes de transmission et les systèmes de propulsion. Parmi les différentes topologies d'onduleurs utilisées, les onduleurs à trois niveaux NPC sont largement adoptés en raison de leurs performances élevées, de leur capacité à gérer des tensions élevées et de leur faible niveau de distorsion harmonique.

L'un des principaux défis dans la conception des onduleurs à trois niveaux NPC est la gestion de la mémoire. La mémoire fait référence à la capacité de stocker et de gérer l'énergie électrique dans les différents niveaux de tension présents dans l'onduleur. Dans le cas des onduleurs NPC, il y a généralement deux niveaux de tension de clamping et un niveau neutre, ce qui nécessite une gestion précise de la répartition de l'énergie entre ces niveaux.

La modélisation par réseaux de Petri permettent de décrire le fonctionnement des onduleurs à trois niveaux en modélisant les différents états et transitions qu'ils peuvent traverser. Les places du réseau de Petri représentent les états possibles du système, tandis que les transitions décrivent les événements ou les actions qui provoquent le passage d'un état à un autre.

La machine asynchrone double étoile est composée de deux enroulements statoriques distincts qui sont connectés en étoile et alimentés indépendamment. Chaque enroulement statorique est alimenté par une tension de fréquence et d'amplitude différentes, permettant ainsi de contrôler de manière indépendante le flux magnétique dans chaque branche du stator.

Dans ce travail nous intéressons à ETUDE, Modélisation et Simulation d'un onduleur à trois niveaux à structure NPC.

Le présent mémoire peut être structuré comme suit :

Le premier chapitre présente l'état d'art l'onduleur multiniveaux NPC (Neutral Point Clamped) et les différentes topologies multiniveaux, leurs avantages et Inconvénients et Intérêt des onduleurs multi niveaux.

Introduction Générale

Le deuxième chapitre présente la présentation de l'onduleur à trois niveaux, l'élaboration de son modèle de connaissance par réseau de Pétri, et Simulation de l'onduleur par La commande triangulo-sinusoidale avec deux porteuses unipolaires.

En fin pour le dernier chapitre sera consacré pour la modélisation de la MASDE et son alimentation. Après une description de la machine , et Application de la transformation de Park à la MASDE , Nous présentons ensuite l'alimentation de la machine par deux onduleurs de tension à trois niveaux à commande MLI. Nous commentons enfin les résultats de simulation après illustration et visualisation de ces derniers.

Nous terminons à la fin par une conclusion générale, qui est la synthèse de ce mémoire

Chapiter 1 :état d'art les onduleurs multi niveaux

1.1 Introduction :

La conversion d'énergie DC-AC à l'aide de convertisseurs statiques tels que les onduleurs de tension est une fonction essentielle de l'électronique de puissance en pleine croissance. Ils existent dans la plus large gamme d'applications, dont les plus connues sont sans aucun doute les variations de vitesse des moteurs à courant alternatif, les alimentations de sécurité, etc.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure, le principe de fonctionnement général et les différents types d'onduleurs. Nous verrons également quelques domaines d'application pour les onduleurs.

Nous nous consacrons ensuite à l'étude générale des onduleurs de tension multiniveaux. Puisqu'ils sont largement utilisés dans les applications de moyenne tension et de forte puissance, en raison de leurs divers avantages tels que : bonne qualité d'alimentation, bonne compatibilité électromagnétique, une faible perte de commutation et sa capacité à haute tension, ainsi que la réduction du contenu harmonique dans la tension et le courant de sortie. Dans la dernière partie de ce chapitre, nous aborderons le principe de fonctionnement, les différentes topologies, et comparerons les trois structures en fin de chapitre.

1.1.2 Définition de l'onduleur :

La conversion continue-alternative permet d'obtenir un signal de tension alternative avec une amplitude et une fréquence souhaitées à partir d'un signal de tension continue. Cette conversion est assurée par un convertisseur appelé onduleur figure (1.1). Ce dernier est utilisé pour :

soit fournir une tension ou un courant de fréquence et d'amplitude variables.

Exemple : C'est le cas d'un onduleur utilisé pour alimenter un moteur à courant alternatif qui doit tourner à vitesse variable. - Fournir une ou plusieurs tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes.

Exemple : Alimentation d'un système alternatif à partir d'une source continue (batterie).

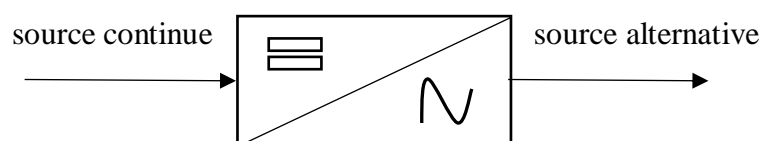
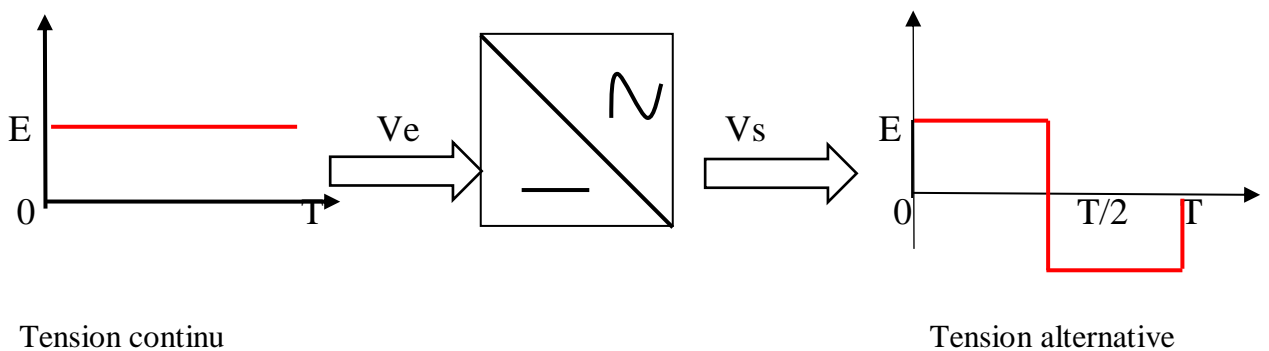


Figure (1.1): Schéma bloc de la conversion continue-alternative.

Il existe plusieurs topologies d'onduleurs, chacune correspondant à un type d'application spécifique ou permettant une performance souhaitée, et une distinction est faite entre les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels. dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW). [1].

1.1.3 Principe générale de fonctionnement :

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, ce qui génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la Figure (1.2). [2]



Tension continu

Tension alternative

Figure (1.2): Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).

L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la fréquence et ladurée 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 l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources.

Quand $S_1 - S_4$ sont fermés (On) et S_2-S_3 sont ouverts (Off) pour $0 < t < T/2$ on obtient une alternance positif $U(t)=V_{DC}$ comme la montre la Figure (1.3).

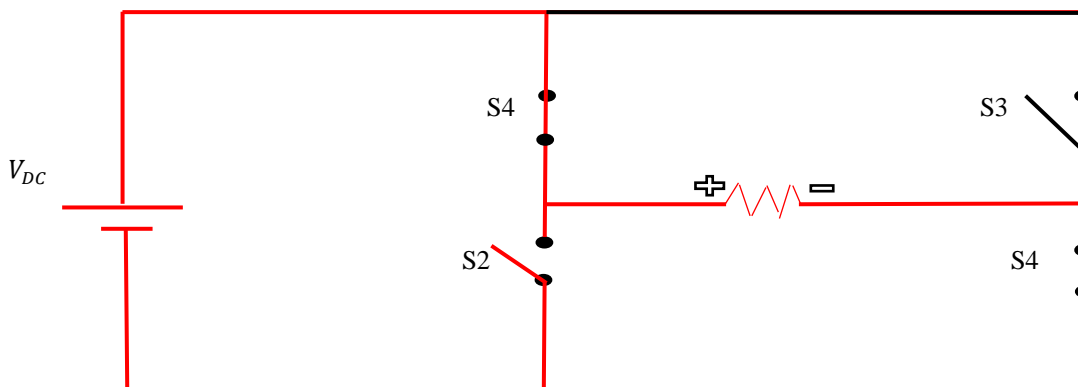


Figure (1.3): Fonctionnement de l'onduleur dans le 1er demi-cycle

Quand S1 – S4 sont ouvert (Off) et S2–S3 sont fermés (On) pour $T/2 < t < T$ on obtient une alternance négative $U(t) = -V_{DC}$ comme la montre la Figure(1.4).

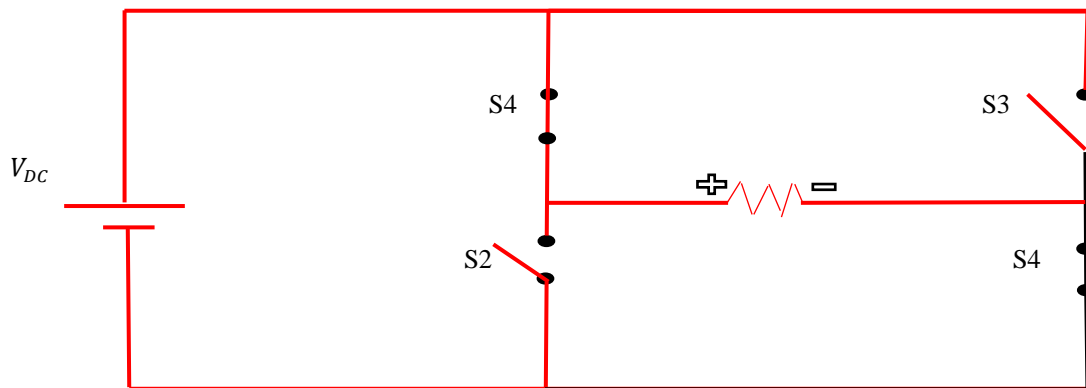


Figure (1.4): Fonctionnement de l'onduleur dans le 2^{ème} demis cycle

Le signal résultant sur la période complète est présenté sur la Figure (1.5).

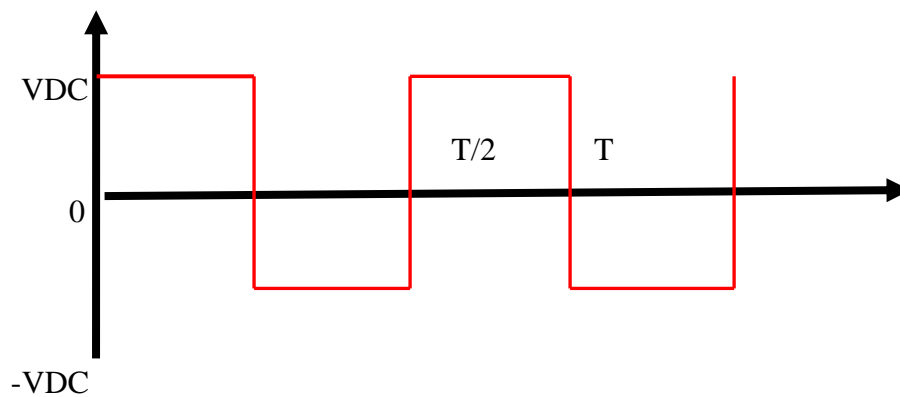


Figure (1.5): Signal complet de l'onduleur

1.1.4 Les différents types d'onduleurs de tension :

1.1.4.1 Onduleur monophasé en pont :

Pour éviter la nécessité d'une source à point milieu et doubler la tension de sortie, on utilise un onduleur en pont figure (1.6), dans ce cas. On commande sur une demi-période les transistors Q1, Q2 et les transistors Q3, Q4 sur le reste de la période.

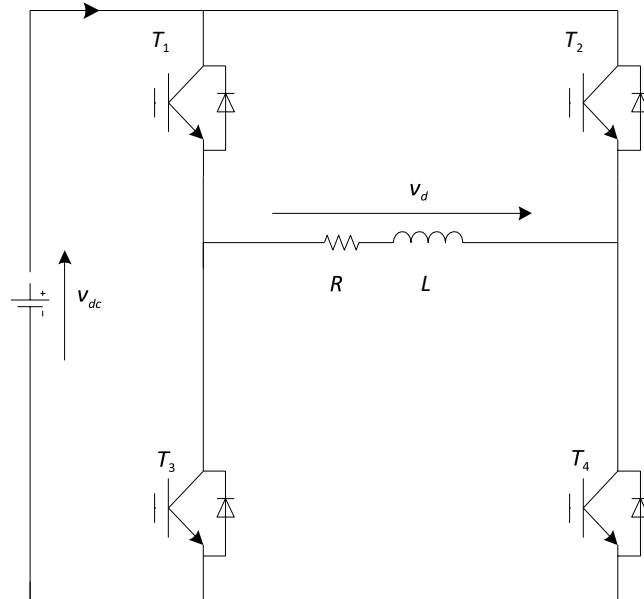


Figure (1.6): Onduleur monophasé en pont.

1.1.4.2 Onduleur monophasé en demi-pont :

Le principe de l'onduleur monophasé en demi-pont peut être expliqué à partir de la figure (1.7) , on dispose d'une source de tension continue à point milieu et de 2 interrupteurs [2], et une charge.

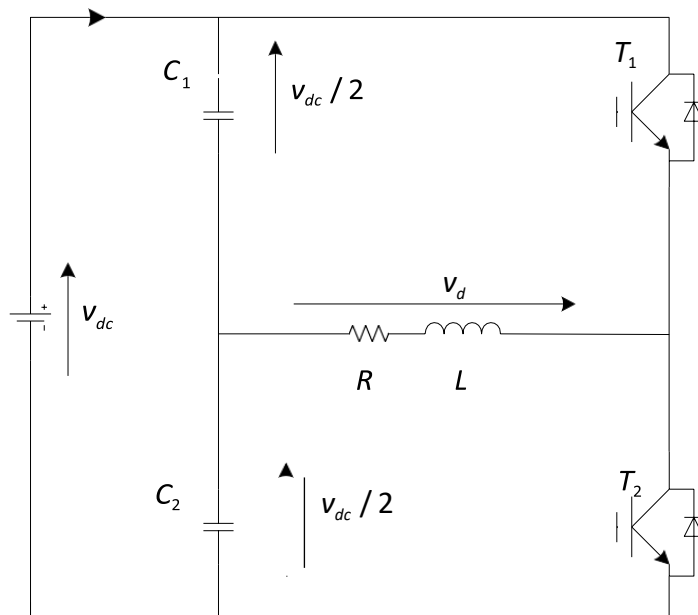


Figure (1.7): Onduleur en demi-pont.

1.1.4.3 Onduleur triphasé :

L'onduleur triphasé en pont est constitué de trois cellules de commutation comme le montre la figure (1.8). On retrouve évidemment une structure différentielle dans laquelle les tensions

triphases sont obtenues de façon composée sur les trois bornes de sortie.

L'onduleur triphasé doit évidemment, en régime nominal, délivrer un système de tension dont les composantes fondamentales forment un système équilibré [3].

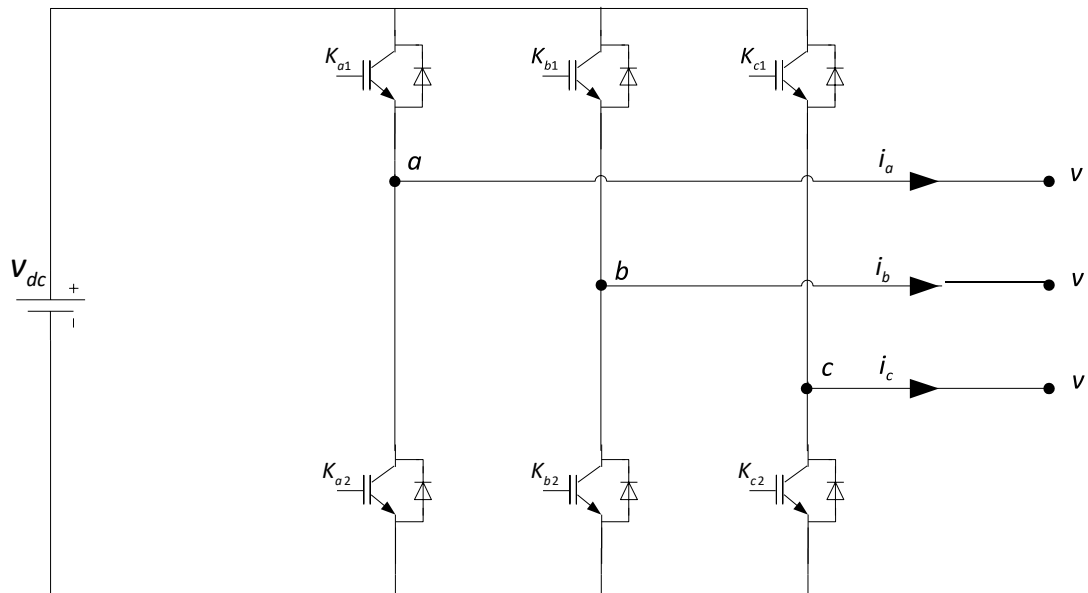


Figure (1.8): Onduleur triphasé.

1.1.5 Classification des onduleurs :

Les structures des onduleurs sont très nombreuses en fonction de leurs applications, et leurs commandes.

Nous pouvons classer les onduleurs selon les critères suivants:

- Nombre de phase.
- Nature de la source d'entrée.
- Nature des interrupteurs.
- Nombre des niveaux de tension de sortie.

Dans les sous-sections suivantes, nous allons détailler les critères précédents

Il existe plusieurs schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des performances recherchées. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de leurs interrupteurs.

1.1.5.1 Onduleur autonome :

C'est un système qui nécessite des composants commandés à la fois à la fermeture et à l'ouverture, de fréquence variable, dont les instants de commutation sont imposés par la commande, la charge est quelconque [4].

1.1.5.2 Onduleur non autonome (assisté) :

Un onduleur non autonome est un montage redresseur tout thyristors, qui en commutation naturelle assistée par le réseau auquel il est raccordé permet un fonctionnement en onduleur.

1.1.6 Intérêt des onduleurs :

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 parconséquent 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. [5]

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 niveauxde tension discrets. [6,7]

1.1.7 Les applications des onduleurs :

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

Les onduleurs à fréquence variable à commutation forces : Alimentés à partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une tension de fréquence et de valeur efficace nécessaires pour faire tourner à vitesse variable un moteur à courant alternatif.[8]

1.1.7.1 Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone :

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

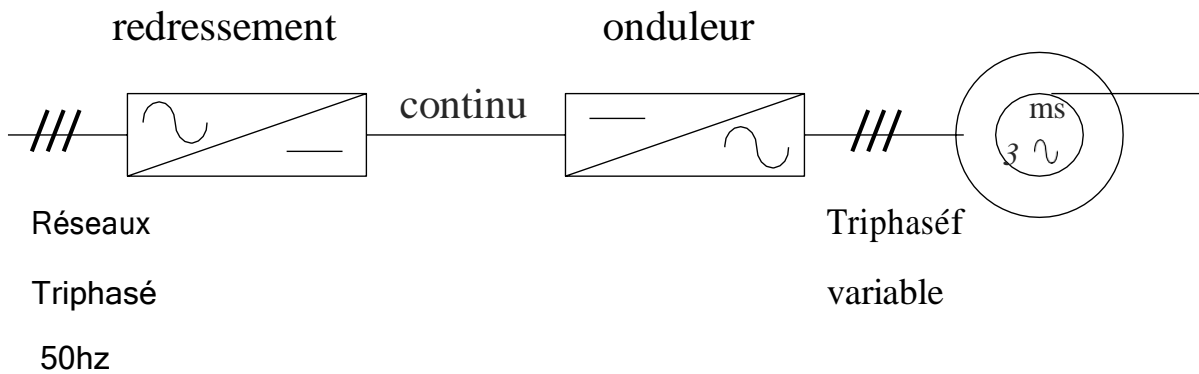


Figure (1.9) : Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur synchrone

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

1.1.7.2 Alimentation de secours :

Lors d'une panne d'électricité, un onduleur assure la continuité de l'alimentation des machines à partir de batteries. En informatique professionnelle, un onduleur est indispensable pour éviter la perte d'informations en cas de panne du secteur [3].

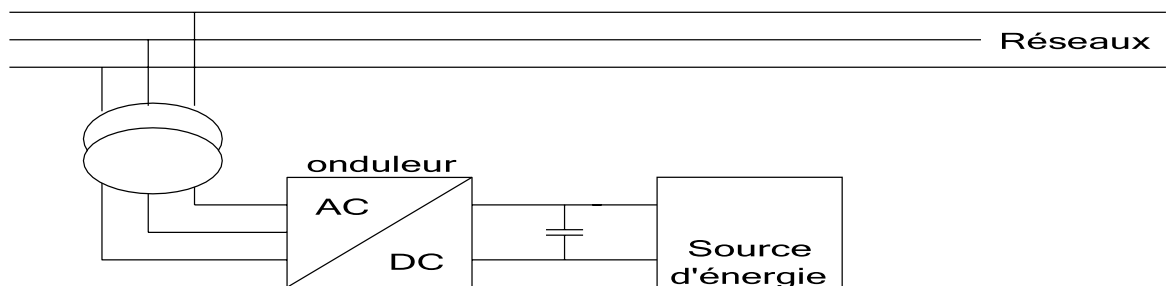


Figure (1.10): Alimentation de secours

1.1.7.3 Transfert d'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes :

La France fournit de l'énergie électrique à la Grande-Bretagne, mais la fréquence du réseau anglais est 60 Hz. Il faut donc adapter la fréquence.

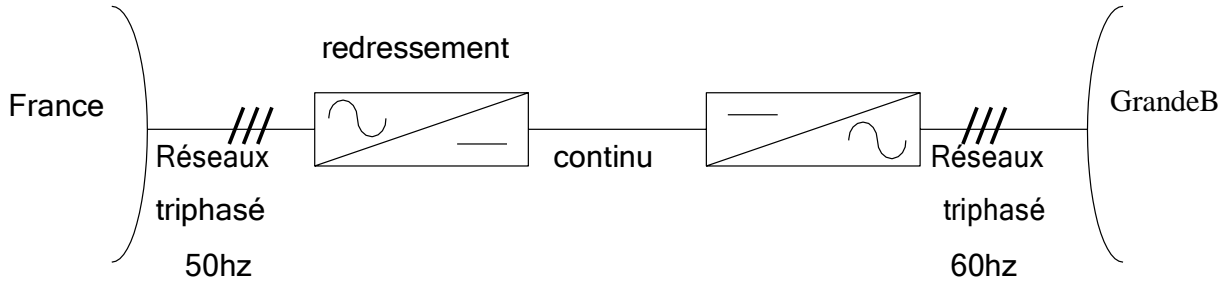


Figure (1.11) : Transfert de l'énergie entre deux réseaux de fréquences différentes

1.1.8 Les paramètres de performance de l'onduleur :

1.1.8.1 Facteur de distorsion harmonique (THD) :

Ce facteur nous donne une idée qualitative sur la similitude de forme d'onde réelle avec sa composante fondamentale ; il est donné comme suit [11] :

$$THD = \frac{\sqrt{V_{eff}^2 - V_{eff1}^2}}{V_{eff1}} \quad (1.1)$$

V_{eff} : La valeur efficace de la tension de sortie (Vs).

V_{eff1} : La valeur efficace de la première harmonique (fondamentale) de la tension de sortie.

1.1.8.2 Facteur du courant harmonique (HCF) :

Ce facteur est principalement consacré aux commandes de la charge fortement inductive et filtrera en dehors les harmoniques de tension .

$$HCF = \frac{100}{C(1)} \sqrt{\sum_{n=5}^{\infty} \left[\frac{C(n)}{n} \right]^2} \quad (1.2)$$

1.1.8.3 Facteur de distorsion (DF) :

Il est défini par l'équation suivante :

$$DF^2 = \frac{100}{V_{eff}} \sqrt{\sum_{n=5}^{\infty} \left[\frac{V_n}{n^2} \right]^2} \quad (1.3)$$

1.2 Onduleurs multi-niveaux :

1.2.1 Historique et avantages des structures de conversion multiniveaux :

1.2.1.1 Historique :

L'histoire de la conversion multi niveaux commence au début des années 70. La première structure décrite est une mise en série de pont en H pour synthétisé une tension de sortie alternative sous forme d'escalier. Puis au début des années 80 est apparu le convertisseur clampé par le neutre *NPC*. Cette structure est considérée comme le premier convertisseur multi niveaux pour des applications de moyennes puissances. Puisque l'onduleur NPC double effectivement le niveau de tension sans exiger une tension assorti précise, la topologie NPC a régné dans les années 80. L'application de l'onduleur *NPC* et de son extension aux convertisseurs multi niveaux a été publié par. Depuis, de nombreuses études ont été proposées pour étudier ses propriétés et les évolutions possibles de cette structure.

Bien que l'onduleur multi niveaux en cascade ait été inventé le premier, ses applications n'ont pas régné jusqu'au milieu des années 90. Deux brevets importants ont été publiés pour indiquer la supériorité des onduleurs en cascade pour l'entraînement des moteurs. En raison de la grande demande des onduleurs de haute puissance et de moyenne tension, l'onduleur multi niveaux en cascade a tiré d'énorme intérêt.

Dans les années 90, les recherches sont tournées vers de nouvelles structures et ils sont portées vers les convertisseurs multicellulaires série, aussi connus dans la littérature sous le nom de Flying Capacitor. (*FC*) Et c'est à la fin des années 90 qu'est né le convertisseur multicellulaire superposé, cette structure est une suite de la réflexion sur les convertisseurs multicellulaires série. Ces structures peuvent être considérées comme les structures de base de la conversion multiniveaux. Beaucoup de propriétés de ces structures de base sont communes avec les nouvelles structures découvertes [12].

1.2.1.2 Avantages :

Un convertisseur multi niveaux à plusieurs avantages par rapport a un convertisseur conventionnel a deux niveaux qui utilisent la modulation de largeur d'impulsion *MLI* à haute fréquence de commutation. Les caractéristiques techniques attrayantes d'un convertisseur multi niveaux peuvent être brièvement récapitulées comme suit :

- Qualité de forme d'onde en escalier : les convertisseurs multi niveaux non seulement peuvent générer des tensions de sortie avec de très faible déformation, mais également

peuvent réduire les efforts dv / dt , pour cette raison les problèmes d'électromagnétique peuvent être réduits.

- Mode commun de tension (MC) : les convertisseurs multiniveaux produisent une plus petite tension de (MC) , pour cette raison, l'effort dans les roulements d'un moteur connecté à un onduleur multi niveaux peut être réduit. En outre, on peut éliminer la tension

de (MC) en employant des stratégies de modulation avancées.

- Courant d'entrée : les convertisseurs multi niveaux peuvent dessiner un courant d'entrée avec faible taux de déformation.
- Fréquence de commutation : les convertisseurs multi niveaux peuvent fonctionner à la fréquence fondamentale et à haute fréquence de commutation MLI . Il est convient a noté que une faible fréquence de commutation signifie habituellement une faible perte par commutation donc le rendement est plus élevé.

Malheureusement, les convertisseurs multiniveaux ont quelques inconvénients. Un inconvénient particulier est le grand nombre d'interrupteurs semi-conducteur requis. Bien que des commutateurs évalués à tension réduite puissent être utilisés dans un convertisseur multi niveaux, chaque commutateur exige un circuit relatif de commande de gâchettes.

Ceci peut rendre le système général plus cher et complexe. Nous présentons ci-dessous, les principales topologies de convertisseurs multi niveaux évoquées dans la littérature, aussi bien que ses principaux atouts et faiblesses [12].

1.2.2 Application des onduleurs multi-niveaux dans le domaine industriel :

Les convertisseurs multi-niveaux trouvent une attention importante dans l'industrie et le milieu universitaire en tant qu'un des choix privilégié de la conversion pour les applications de haute puissance [9][10]. Ils ont façonné avec succès leur voie en milieu industrielle et peuvent pour cette raison être considéré comme une technologie mature et prouvée.

Actuellement, ils sont commercialisés dans les normes et qui actionnent une large gamme d'applications, tel que les compresseurs, les extrudeuses, les pompes, les ventilateurs, les fraises, les laminoirs, les convoyeurs, les broyeurs, les souffleries de fourneau, les démarreurs de turbine à gaz, les mélangeurs, les élévateurs, la compensation d'énergie réactive, la propulsion marine, boîte de vitesses à courant continu (HVDC) à haute

tension, le stockage hydro pompé, l'énergie éolienne, et la traction ferroviaire [9][10]. Les convertisseurs de ces applications sont commercialement offerts par un ensemble d'entreprises croissant dans le domaine, tel que : ABB, SIEMENS, Schneider-Electric, Alstom, TMEIC-GE... [10].

1.2.3 Principe de fonctionnement l'ondeur multi-niveaux :

Pour des applications industrielles de moyenne et forte puissance, les tensions appliquées aux bornes des éléments en commutation deviennent très élevées. Pour des raisons liées à la technologie employée, la fréquence de commutation doit être maintenue à une valeur faible et l'utilisation de filtres est nécessaire pour l'obtention d'une puissance appropriée en sortie. [23]. Pour pallier à cet inconvénient, une nouvelle classe de convertisseurs de puissance est apparue, appelée onduleurs multiniveaux. Ces structures sont obtenues en montant en série des dispositifs de commutations comportant des éléments de stockage passifs et qui sont utilisés pour générer des tensions plus élevée et de meilleure qualité spectrale. [24]. La figure (I.5) montre le schéma de base de trois onduleurs multiniveaux, dont les semiconducteurs sont remplacés par des interrupteurs idéaux à plusieurs positions. Les onduleurs étant alimentés par des tensions de valeurs identiques.

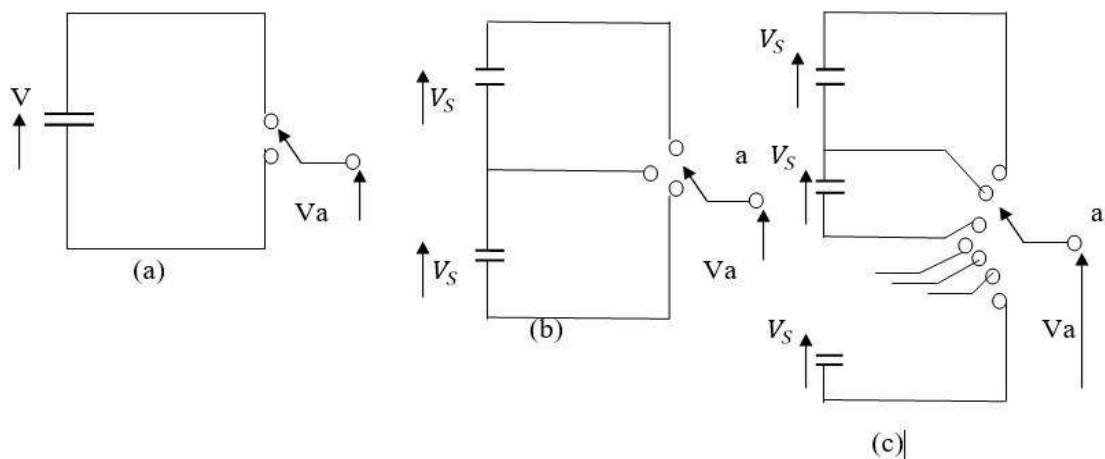


Figure (1.12) : Schéma d'un bras d'onduleurs à : (a) Deux niveaux, (b) Trois niveaux, (c) N niveaux.

✓ L'ondeur de la figure (I.5.a), délivre à sa sortie deux niveaux de tensions :

- Position P1 : $V_S=E$
- Position P2 : $V_S=-E$

✓ Les trois positions (P1, P2, P3) de l'interrupteur de la figure (I.5.b), permettent d'avoir respectivement trois niveaux de tensions :

- Position 1 : $V_s=E$
- Position 2 : $V_s=0$
- Position 3 : $V_s=-E$, D'ici émane l'appellation d'onduleur à trois niveaux.

✓ La notion de ce principe, permet d'atteindre la structure à N niveaux représenté sur la figure (I.5.c).

L'avantage majeur de cette approche est que le nombre de sorties peut être augmenté, se rapprocher davantage de la sinusoïde et avec un taux minimum d'harmoniques, sans aucun ajout de nouveaux composants. Il faut seulement augmenter le nombre des sources de tensions continues. [25]

1.2.4 Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :

Onduleur de tension multi-niveau 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 a diode de bouclage (NPC)
- ✓ La topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- ✓ La topologie en cascade (pont H)

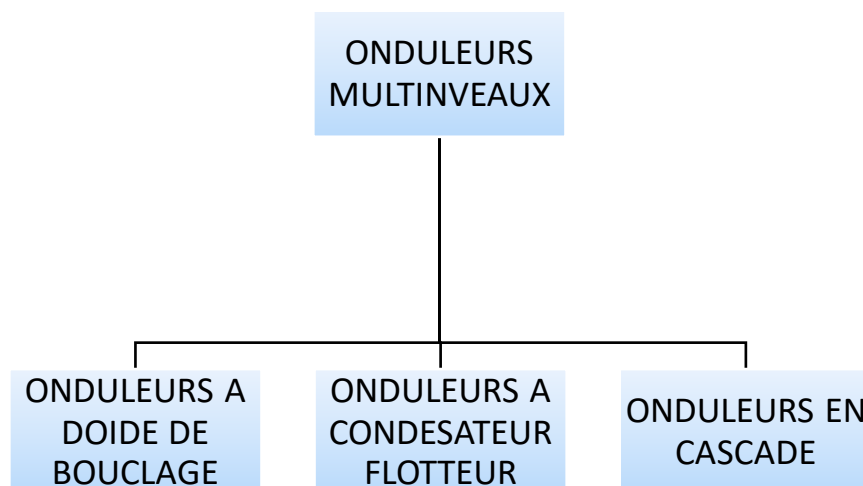


Figure (1.13) : Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.

1.2.4.1 Onduleurs multi-niveaux à structure NPC :

Cette structure d'onduleur multi-niveaux a été introduite par A. Nabae et H. Akagi en 1981. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge pour des applications de type alimentation des moteurs. Cette structure, connue sous le nom de convertisseur clampé par le neutre, n'utilise pas de transformateur d'isolement et la répartition de la tension d'entrée continue sur les différents interrupteurs en série est assurée par les diodes (clamps) connectée à des points milieu capacitifs[16] .

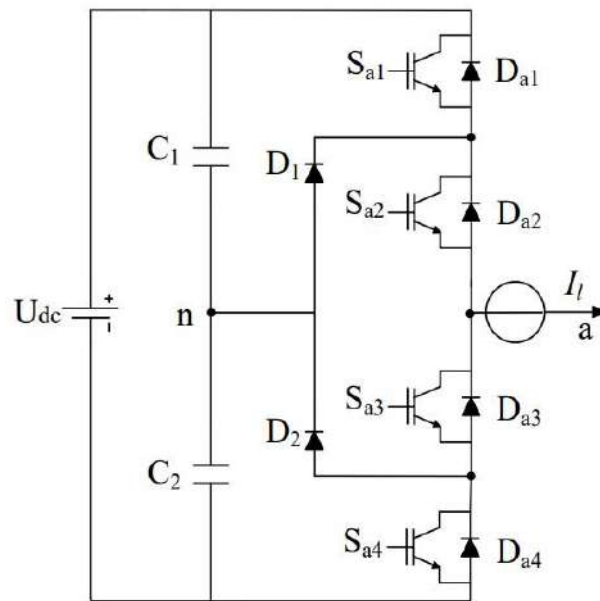


Figure (1.14): Schéma d'un convertisseur NPC 3 niveaux

1.2.4.1.1 Avantage :

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.

1.2.4.1.2 Inconvénients :

Cependant, cette topologie présentes 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 complique 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 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 .

1.2.4.2 Onduleurs multi-niveaux à condensateurs flottants :

Dans la topologie multi-niveau 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 mais 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.

1.2.4.2.1 Avantage :

Ce type de convertisseur présente plusieurs avantages :

- Le concept de condensateur Flottant peut être appliquée à un certain nombre de convertisseurs de différents types, DC /AC ou AC/ DC.
- La plupart des stratégies de modulation sont facilement appliquée 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.

1.2.4.2.2 Inconvénients

Cette topologie présente quelque inconvénient, 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 n'en est pas intrinsèquement tolérante aux pannes.
- 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 y a un potentiel de résonance parasite entre les condensateurs découplés.

1.1.2.4.3 Onduleurs multi-niveaux à structure cascadié :

Cette famille est la première décrite dans la littérature comme une structure de conversion multi-niveaux. En effet la mise en cascade de plusieurs structures à trois niveaux permet d'avoir en sortie une forme d'onde de tension multi-niveaux.

Les cellules y sont connectées en étoile, cependant il est également possible de les connecter en triangle. Chaque cellule de l'onduleur est alimentée par une source continue E et elle est composée de quatre interrupteurs qui sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'associations classiques d'un transistor et d'une diode en antiparallèle.

Les sources doivent être galvaniquement isolées les unes des autres, afin d'éviter un court-circuit lors de leur mise en série

1.2.4.3.1 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 diodesupplémentaire n'est nécessaire.
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaqueonduleur monophasé.
- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraînemoins de problèmes de sécurité.
- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre desources à courant continu ($N=2s+1$).

1.2.4.3.2 Inconvénients :

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

1.2.4.2 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 :

- Le convertisseur asymétrique hybride.
- Le convertisseur avec des ponts en cascade et sources CC/CC avec isolement.
- Le convertisseur avec commutation douce.
- Les convertisseurs reliés par transformateur.
- Le convertisseur Diode/Capacitor-Clamped : variante de l'onduleur NPC.
- Le convertisseur multi-niveau généralisé.

1.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure d'un onduleur, son principe de fonctionnement, Classification des onduleurs et les différents types d'onduleur de tension triphasée, également présenté dans cette étude les onduleurs multi niveaux qui présente notre intérêt dans cette étude. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux ou nous avons donné leurs avantages et leurs inconvénien

**Chapiter 02 : Modélisation et Simulation de l'onduleur
à trois niveaux NPC**

2.1. Introduction :

L'onduleur à trois niveaux NPC (Neutral Point Clamped) est une topologie d'onduleur largement utilisée dans les applications industrielles et les systèmes de conversion d'énergie. Il offre de nombreux avantages par rapport aux onduleurs conventionnels, tels qu'une meilleure qualité de sortie, une réduction des harmoniques, une meilleure capacité de commutation et une meilleure efficacité énergétique. En raison de ces avantages, la modélisation et la simulation de l'onduleur à trois niveaux NPC sont d'une importance capitale pour les ingénieurs et les chercheurs travaillant dans le domaine de l'électronique de puissance.

Ce chapitre est dédié à la modélisation du fonctionnement d'un onduleur triphasé à trois niveaux. Cette étude a deux objectifs, à **savoir**:

- Etude du fonctionnement de l'onduleur et l'élaboration de son modèle de connaissance en utilisant la méthode DESIGN associée aux réseaux de Pétri [17][18].
- Définir la commande complémentaire optimale de l'onduleur et développer son modèle de commande en utilisant le concept de fonctions **génératrices**
- Simulation de l'onduleur à trois niveaux par commande à MLI sinusoïdale à deux porteuses unipolaires

Remarque : Dans ce chapitre, nous utilisons un onduleur à trois niveaux au lieu d'un onduleur de tension à trois niveaux avec **structure** NPC.

2.2 MODELISATION ET COMMANDE D'UN ONDULEUR A TROISNIVEAUX "STRUCTURE NPC" :

2.2.1 Structure topologique de l'onduleur :

La figure (1.1) présente une structure classique d'une conversion indirecte alternative-alternative composée d'un pont redresseur triphasé à diode, d'un filtre de tension, composé d'une self et de deux condensateurs à point milieu commun, pour former les deux sources continues nécessaires au bon fonctionnement de l'onduleur de tension triphasé à trois niveaux, qui alimente à son tour une charge triphasée équilibrée à caractère inductif, couplée en étoile avec un neutre isolé.

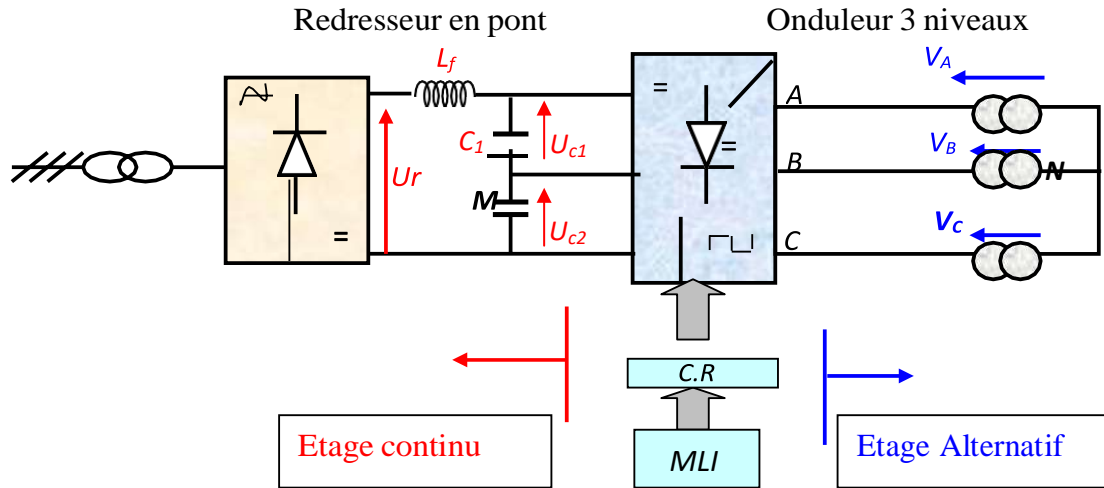


Figure (2.1): Structure d'une conversion indirecte AC/AC

La figure (2.2) représente la structure topologique d'un onduleur triphasé à trois niveaux. Elle est composée de trois bras monophasés. A partir de la source principale de tension continu, et à l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C_1 et C_2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi tension ($E/2$). Cette structure crée alors un point neutre (M) entre les deux condensateurs. Les condensateurs sont identiques de manière à éviter le déséquilibre de charge ($C_1=C_2$ & $U_{C1}=U_{C2}$)[19] , [20].

Chaque demi-bras de l'onduleur se compose de deux interrupteurs (T) en série avec leur point commun relié par une diode de bouclage au point neutre des sources (M). Une diode en anti-parallèle est montée sur chaque interrupteur pour assurer la réversibilité des courants dans la charge.

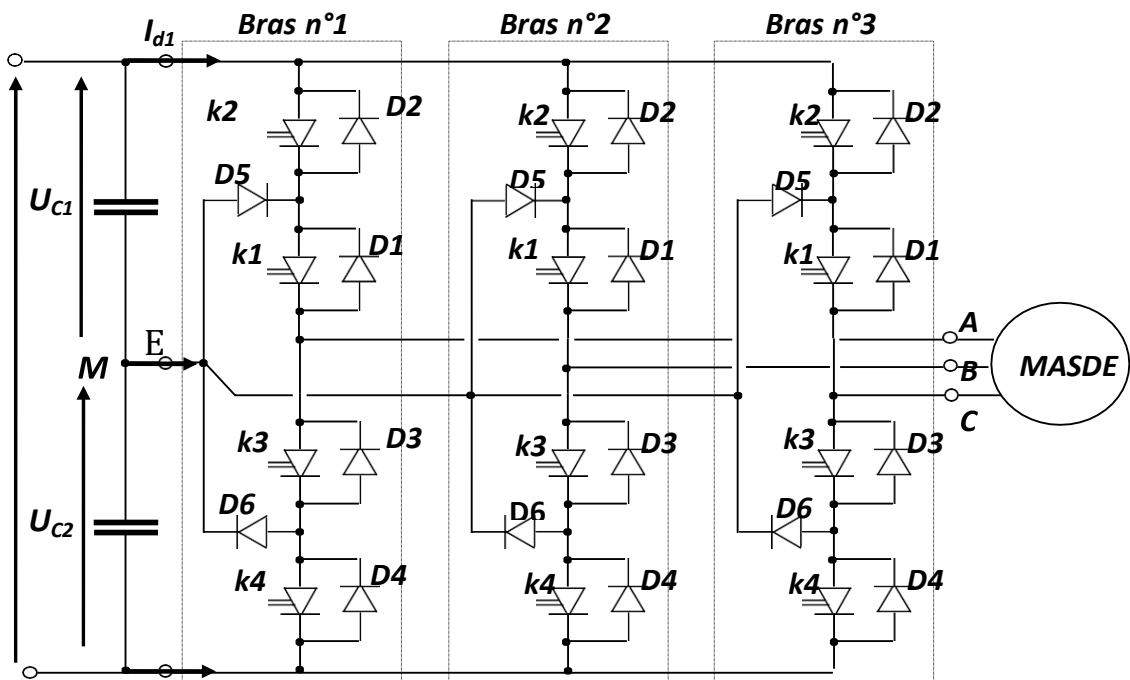


Figure (2.2): Structure de puissance de l'onduleur à trois niveaux de type NPC

2.3 Modélisation de l'onduleur à trois niveaux :

Pour ce faire, on va étudier le modèle d'un seul bras de l'onduleur, puis on va généraliser l'approche [21],[22],[23].

2.3.1 Modèle de l'interrupteur bidirectionnel en courant :

L'ensemble interrupteur (T) et la diode (D) peut être remplacé par un interrupteur bidirectionnel en courant :



Figure (2.3): Interrupteur bidirectionnel en courant

Avec : C_K la commande de l'interrupteur (K)

La synthèse de l'interrupteur bidirectionnel en courant est illustrée par les caractéristiques statiques ci-dessous [19],[21],[22]:

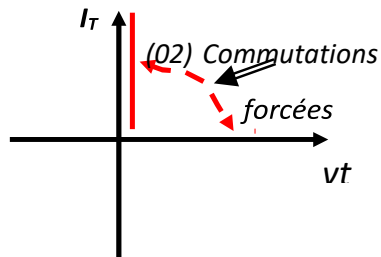


Figure (2.4): Caractéristique statique de l'interrupteur (T)

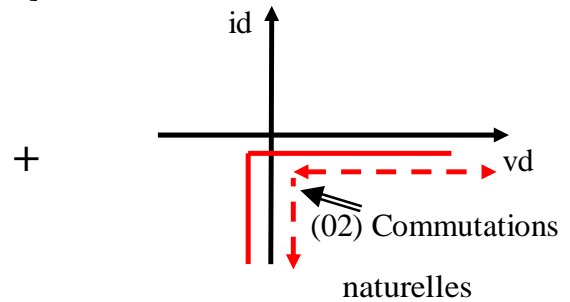


Figure (2.5): Caractéristique statique de la diode (D)

La combinaison des deux caractéristiques statiques conduit à:

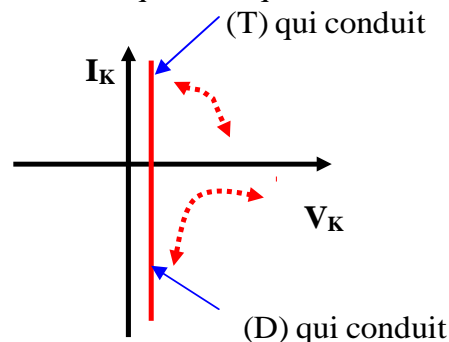


Figure (2.6): Caractéristique statique de l'interrupteur bidirectionnel en courant

On définit deux états stables pour l'interrupteur (K) :

- (1) : pour l'état fermé de l'interrupteur (K).
- (0) : pour l'état ouvert de l'interrupteur (K).

Le passage entre les deux états stables est subordonnée par des conditions de transitions, ce qui aboutit au model suivant :

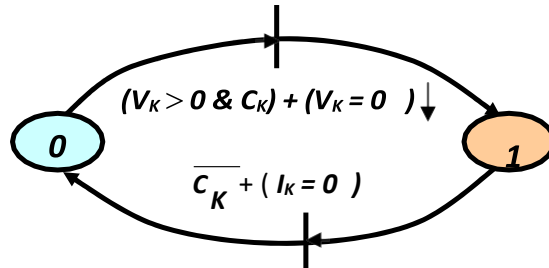


Figure (2.7) : Modèle de Pétri de l'interrupteur bidirectionnel en courant

2.3.2 Modèle de fonctionnement d'un bras de l'onduleur :

Pour décrire le fonctionnement de l'onduleur du type NPC, on étudie le comportement d'un seul bras. [19], [21], [22], [23].

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.

2.3.2.a Les différentes configurations électriques du bras d'onduleur :

Les configurations possibles d'un seul bras de 04 interrupteurs est de $2^4=16$ états quel'on peut représenter par un quadruplet de 0 et de 1 suivant l'état des interrupteurs K1, K2, K3 et K4 [19], [21], [22], [23].

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

- **Configuration 0** : $(C_{11} C_{12} C_{13} C_{14}) = (0 0 0 0)$

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** : $(C_{11} C_{12} C_{13} C_{14}) = (1 1 0 0)$

Les interrupteurs (K1, K2) sont passants et (K3, K4) sont bloqués et la tension de sortie : $V_{AM} = +U_C = +E/2$.

- **Configuration 2** : $(C_{11} C_{12} C_{13} C_{14}) = (1 0 0 0)$

L'interrupteurs K_1 est passant et (K_2, K_3, K_4) sont bloqués et la tension de sortie : $V_{AM} = 0$.

- **Configuration 3 :** $(C_{11} C_{12} C_{13} C_{14}) = (0 0 1 1)$

Les interrupteurs (K_1, K_2) sont bloqués et (K_3, K_4) sont passants et la tension de sortie : $V_{AM} = -U_c = -E/2$.

- **Configuration 4 :** $(C_{11} C_{12} C_{13} C_{14}) = (0 0 1 0)$

L'interrupteurs K_3 est passant et (K_2, K_1, K_4) sont bloqués et la tension de sortie : $V_{AM} = 0$.

Les autres configurations sont à éviter, car [21], [24],[19]:

- 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.

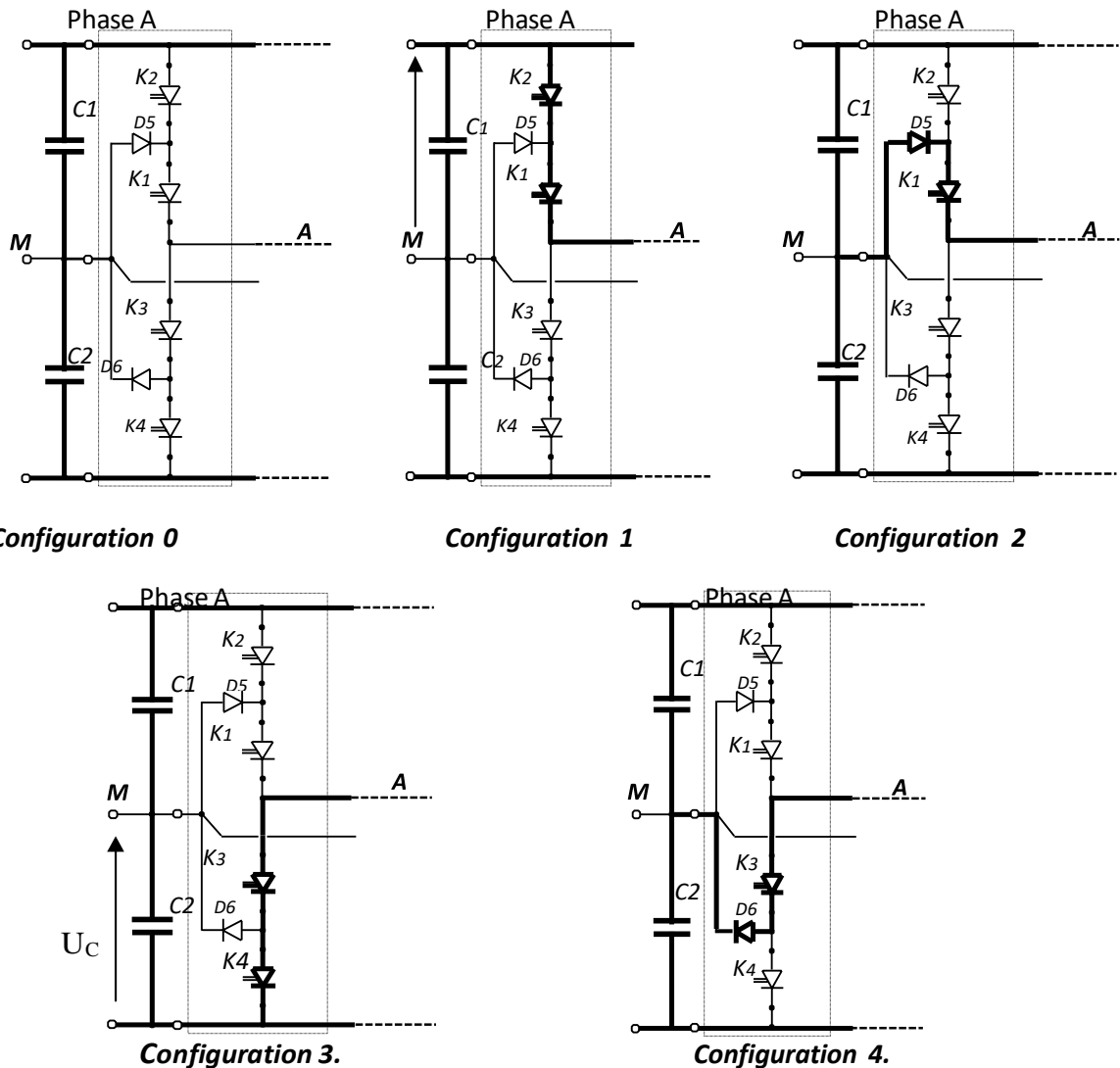


Figure (2.8) : Les différentes configurations électriques d'un bras de l'onduleur

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

Configuration	Commande	Tension VAM	Courant continu	observation
Conf 0	$C_{ij} = 0$ $i = 1,3$ $j = 1,4$	Imposé e par la charge	$I_{d0} = I_{d1} = I_{d2} = 0$ $I_A = 0$	Configuration non désirable pour la commande
Conf 1	$C_{11} = C_{12} = 1$ $C_{13} = C_{14} = 0$	+ U_C	$I_{d1} = I_A$ $I_{d0} = I_{d2} = 0$	Niveau de tension(+ U_C)
Conf 2	$C_{11} = 1$ $C_{12} = C_{13} = C_{14} = 0$	O	$I_{d1} = I_{d2} = 0$ $I_{d0} = I_A$	Niveau de tension(O)
Conf 3	$C_{11} = C_{12} = 0$ $C_{13} = C_{14} = 1$	- U_C	$I_{d1} = I_{d0} = 0$ $I_{d2} = I_A$	Niveau de tension(- U_C)
Conf 4	$C_{13} = 1$ $C_{11} = C_{12} = C_{14} = 0$	O	$I_{d1} = I_{d2} = 0$ $I_{d0} = I_A$	Niveau de tension(O)

Tableau (2.1) : Tableau récapitulatif relatif au bras n° 1

$i=1,3$: numéro du bras

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

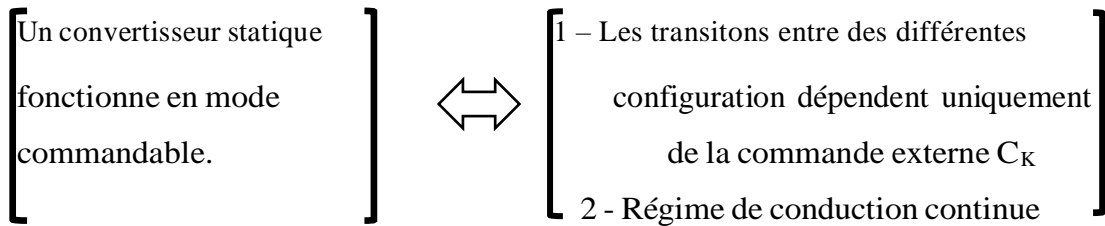
2.3.2.b Conclusion :

- 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 , O, + U_C) relative à la tension du bras d'onduleur (V_{AM}).
- Pour que le bras onduleur ait un mode contrôlable, il est nécessaire de rechercher la meilleure commande complémentaire

2.4 Modélisation par réseau de Pétri de l'onduleur :

Pour avoir un fonctionnement en mode commandable, on doit étudier la commande complémentaire optimale des interrupteurs du bras d'onduleur, puis déterminer les conditions de transitions entre les différentes configurations pour déterminer un modèle par réseau de Pétri du bras [19], [21], [22], [23].

2.4.1 Commandabilité des convertisseurs statiques :



Par la suite, on suppose que la deuxième condition est toujours vérifiée.

2.4.2 Commande complémentaire des interrupteurs :

Pour éviter la mise en conduction simultanée des quatre interrupteurs d'un seul bras, qui provoque un court-circuit aux bornes des sources continue et par conséquent le risque de destruction des condensateurs et des composants semi-conducteurs par sur intensité et qui peut engendrer la destruction par surtension des interrupteurs lors de l'ouverture simultanée de ces derniers, on adopte la solution classique suivante [19], [24],[23] :

On doit réaliser des commandes complémentaires des différents interrupteurs d'un même bras de l'onduleur. La commande complémentaire, en plus des deux conditions précédentes, assure un fonctionnement totalement commandable de l'onduleur.

Pour le bras d'onduleur $i=1$, trois commandes complémentaires sont possibles :

$$C_{11} = \overline{C_{13}} \quad \& \quad C_{12} = \overline{C_{14}} \tag{2.1}$$

On établit le tableau d'excitation, relatif à cette commande complémentaire.

C11	C12	C13	C14	VAM
0	0	1	1	- U_C
0	1	0	1	Inconnue
1	0	1	0	0
1	1	0	0	+ U_C

Tableau (2.2) : Tableau des excitations relatif au bras n° 1

En conclusion : La commande complémentaire (IV.3) s'est avérée celle qui donne les trois niveaux de tension ($-U_C, 0, + U_C$) de façon optimale et Si on élimine le cas inconnu (0,1,0,1), on obtient un fonctionnement de l'onduleur en mode commandable [22], [23].

2.4.3 Modèle d'un bras en mode commandable par réseau de Pétri :

L'analyse fonctionnelle du bras par le formalisme de Pétri consiste à [19], [22], [23] :

- Déterminer les différentes configurations physiquement réalisables.
- Attribuer un modèle électrique équivalent pour chaque configuration.
- Définir les conditions de transition entre les différentes configurations.

Ces conditions de transitions donnent les réceptivités du réseau de Pétri.

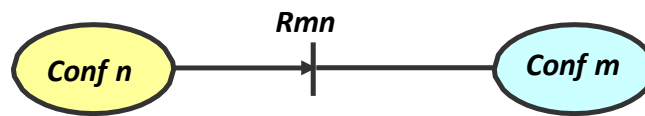


Figure (2.9): Transition entre deux configurations

Avec : R_{mn} comme réceptivité de transition entre la configuration (m) et la configuration (n).

La réceptivité R_{mn} est une fonction logique entre :

- Une commande externe (C_{ij}) des interrupteurs (K_{ij})
- Et, des paramètres électriques du bras, définis par :
 - Le signe du courant du bras : I_i ($i = 1,2,3$)
 - Et, le signe des tensions aux bornes des interrupteurs (V_{ij}), du bras i , avec ($i = 1, 3$) et ($j = 1, 2, 3$)

Après définition des quatre configurations possibles du bras d'onduleur, analyse des conditions de transition entre ces dernières et avec la commande complémentaire, on a pu définir les réceptivités de transition du bras n°1, comme suit :

$$R_{12} = [C_{11} \ \& \ \overline{C_{12}}] \& [I_1 > 0] \quad (2.2)$$

$$R_{21} = [C_{11} \ \& \ C_{12}] \quad (2.3)$$

$$R_{23} = [\overline{C_{11}}] \quad (2.4)$$

$$R_{32} = [C_{11} \ \& \ \overline{C_{12}}] \& [I_1 > 0] \quad (2.5)$$

$$R_{13} = [\overline{C_{11}} \ \& \ \overline{C_{12}}] \quad (2.6)$$

$$R_{31} = [C_{11} \ \& \ C_{12}] \quad (2.7)$$

$$R_{34} = [C_{11} \ \overline{C_{12}}] \& [I_1 < 0] \quad (2.8)$$

$$R_{43} = [\overline{C_{11}} \ \overline{C_{11}}] \quad (2.9)$$

$$R_{14} = [C_{11} \ \overline{C_{12}}] \& [I_1 < 0] \quad (2.10)$$

$$R_{41} = [C_{12}] \quad (2.11)$$

Après définition des réceptivités, on adopte une modélisation, par réseau de Pétri série, du bras (n°1) de l'onduleur :

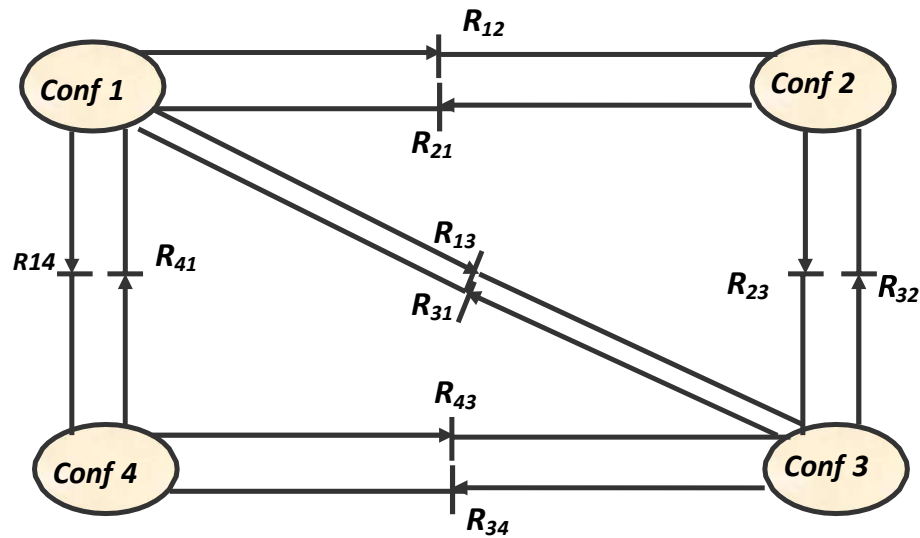


Figure (2.10): Réseau de Pétri série de fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux de type NPC, en mode commandable.

2.5 Modèle de commande de

l'onduleur :

2.5.1 Fonction de connexion :

A Chaque interrupteur (K_{ij}), on lui associe une fonction de connexion F_{ij} , définit par [19], [22] :

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } K_{ij} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } K_{ij} \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (2.12)$$

Avec :

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

2.5.2 Relation entre les fonctions de connexion :

Si on utilise la commande complémentaire (IV-3), pour un bras (i) [19],[22] :

$$C_{i1} = \overline{C_{i4}} \ \& \ C_{i2} = \overline{C_{i3}} \quad (2.13)$$

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

$$\begin{bmatrix} F_{i1}=1-F_{i4} \\ F_{i2}=1-F_{i3} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

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 :

$$F_{i1}(t) = \frac{1}{2} [1 + F_i^1(t)] \quad (2.15)$$

$$F_{i2}(t) = \frac{1}{2} [1 + F_i^2(t)] \quad (2.16)$$

$$F_{i4}(t) = \frac{1}{2} \left[1 + F_i^1 \left(t - \frac{t}{2} \right) \right] \quad (2.17)$$

$$F_{i3}(t) = \frac{1}{2} \left[1 + F_i^2 \left(t - \frac{t}{2} \right) \right] \quad (2.18)$$

2.5.3 Fonction de connexion des demi – bras :

On définit la fonction de connexion du demi- bras par F_{im}^b , tel que [19], [22] :

- Pour le demi - bras du haut, $m=1$ et $F_{i1}^b = F_{i1} \cdot F_{i2}$
- Pour le demi - bras du bas, $m=0$ et $F_{i0}^b = F_{i3} \cdot F_{i4}$

$$\left[F_{im}^b = 1 \right]_{\forall m=0.1} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} F_{i1}=F_{i2}=1 \\ OU \\ F_{i3}=F_{i4}=1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} K_{i1} \& K_{i2} \text{ sont fermé} \\ OU \\ K_{i3} \& K_{i4} \text{ sont fermé} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$\left[\begin{array}{l} F_{im}^b=1 \\ \forall m=0.1 \end{array} \right] \Rightarrow \text{[dans tout les autres cas]} \quad (2.20)$$

2.5.4 Table d'excitation des interrupteurs :

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

V_{iM}	F_{i1}	F_{i2}
+U _C	1	1
0	1	0
-U _C	0	0

Tableau (2.3) : Tableau des excitations relatif au bras (i)

2.6 Modèle de connaissance de

l'onduleur :

2.6.1 Les fonctions de conversion :

2.6.1.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 (M) de la source continue [19], [22]

$$V_{AM} = V_A - V_M = F_{11} \cdot F_{12} \cdot U_{c1} - F_{13} \cdot F_{14} \cdot U_{c2} \quad (2.21)$$

$$V_{BM} = V_B - V_M = F_{21} \cdot F_{22} \cdot U_{c1} - F_{23} \cdot F_{24} \cdot U_{c2} \quad (2.22)$$

$$V_{CM} = V_C - V_M = F_{31} \cdot F_{32} \cdot U_{c1} - F_{33} \cdot F_{34} \cdot U_{c2} \quad (2.23)$$

En utilisant les fonctions de connexion des demi - bras (IV.21,22), on obtient:

$$V_{AM} = F_{11}^b U_{C1} - F_{10}^b U_{C2} \quad (2.24)$$

$$V_{BM} = F_{21}^b U_{C1} - F_{20}^b U_{C2} \quad (2.25)$$

$$V_{CM} = F_{31}^b U_{C1} - F_{30}^b U_{C2} \quad (2.26)$$

On obtient:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b \\ F_{21}^b \\ F_{31}^b \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_{10}^b \\ F_{20}^b \\ F_{30}^b \end{bmatrix} U_{C2} \quad (2.27)$$

Conclusion: la forme matricielle obtenue révèle que l'onduleur à trois niveaux est équivalent à une mise en série de deux onduleurs à deux niveaux [19], [22].

De plus si on suppose que: $U_{c1}= U_{c2}= U_c= E/2$ (E:tension continu délivrée par l'étage continu), on abouti à:

$$V_{AM} = (F_{11}^b + F_{10}^b)U_c \quad (2.28)$$

$$V_{BM} = (F_{21}^b + F_{20}^b)U_c \quad (2.29)$$

$$V_{CM} = (F_{30}^b + F_{31}^b)U_c \quad (2.30)$$

Ou la forme matricielle:

$$\begin{bmatrix} V_{AM} \\ V_{BM} \\ V_{CM} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{30}^b - F_{31}^b \end{bmatrix} U_c \quad (2.30)$$

2.6.1.b Calcul des tensions composées de sorties de l'onduleur :

$$V_{AM} = V_{AM} - V_{BM} = (F_{11}^b + F_{10}^b)U_c - (F_{21}^b + F_{20}^b)U_c \quad (2.31)$$

$$V_{BM} = V_{BM} - V_{CM} = (F_{21}^b + F_{20}^b)U_c - (F_{30}^b + F_{31}^b) \quad (2.32)$$

$$V_{CM} = V_{CM} - V_{BM} = (F_{30}^b + F_{31}^b)U_c - (F_{11}^b + F_{10}^b)U_c \quad (2.33)$$

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{30}^b - F_{31}^b \end{bmatrix} U_c \quad (2.34)$$

2.6.1.c Calcul des tensions simples de sortie de l'onduleur :

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

$$V_{AN} = V_A - V_N = V_A \quad (2.35)$$

$$V_{BN} = V_B - V_N = V_B \quad (2.36)$$

$$V_{CN} = V_C - V_N = V_C \quad (2.37)$$

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

$$V_A = \frac{V_{AB} - V_{CA}}{3} \quad (2.38)$$

$$V_A = \frac{V_{BC} - V_{AC}}{3} \quad (2.39)$$

$$V_A = \frac{V_{CA} - V_{BC}}{3} \quad (2.40)$$

D'où les tensions simples :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b - F_{10}^b \\ F_{21}^b - F_{20}^b \\ F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} UC \quad (2.41)$$

2.6.1.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 (IV-14) [19], [22]:

$$I_{d1} = (F_{11} \cdot F_{12}) \cdot I_A + (F_{21} \cdot F_{22}) \cdot I_B + (F_{31} \cdot F_{31}) \cdot I_C \quad (2.42)$$

$$I_{d2} = (F_{13} \cdot F_{14}) \cdot I_A + (F_{23} \cdot F_{24}) \cdot I_B + (F_{33} \cdot F_{34}) \cdot I_C \quad (2.43)$$

$$I_{d0} = (F_{11} \cdot F_{13}) \cdot I_A + (F_{21} \cdot F_{23}) \cdot I_B + (F_{31} \cdot F_{33}) \cdot I_C \quad (2.44)$$

En introduisant la notion de fonction de connexion des demis - bras (IV.21,22) :

$$I_{d1} = F_{11}^b \cdot I_A + F_{21}^b \cdot I_B + F_{31}^b \cdot I_C \quad (2.45)$$

$$I_{d2} = F_{10}^b \cdot I_A + F_{20}^b \cdot I_B + F_{30}^b \cdot I_C \quad (2.46)$$

L'équation au noeud, permet d'écrire

$$I_{d0} = I_A + I_B + I_C - I_{d1} - I_{d2} \quad (2.47)$$

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

$$i_{d0} = i_A + i_B + i_C - i_{d1} - i_{d2} \quad (2.48)$$

On aboutit à la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 1 - F_{11}^b - F_{10}^b & 1 - F_{21}^b - F_{20}^b & 1 - F_{31}^b - F_{30}^b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.49)$$

2.6.2 Matrice de conversion simple [N(t)] :

Si on choisit 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 [19], [22] :

$$X = [U_{C1} \ U_{C2} \ i_1 \ i_2 \ i_3]^T \quad (2.50)$$

Et comme variables d'entrées internes, le vecteur suivant :

$$U_{SIM} = [V_1 \ V_2 \ i_{d1} \ i_{d2} \ i_{d0}]^T \quad (2.51)$$

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

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [N(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

Avec l'introduction des expressions des tensions simples (IV-44), on définit la matrice de conversion simple :

$$\begin{bmatrix} 2F_{11}^b + F_{21g}^b/3 & -(2F_{10}^b + F_{20}^b)/3 & 0 & 0 & 0 \\ 2F_{21}^b + F_{31g}^b/3 & -(2F_{20}^b + F_{30}^b)/3 & 0 & 0 & 0 \\ 2F_{31}^b + F_{11g}^b/3 & -(2F_{20}^b + F_{30}^b)/3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11}^b + F_{10}^b) & (1 - F_{21}^b + F_{20}^b) & (1 - F_{31}^b + F_{30}^b) \end{bmatrix}$$

2.6.3 Matrice de conversion composée [M(t)] :

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

$$U_{COM} = [U_{AB} \ U_{BC} \ U_{CA} \ i_{d1} \ i_{d2} \ i_{d0}]^T \quad (2.53)$$

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

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ i_{d1} \\ i_{d2} \\ i_{d0} \end{bmatrix} = [M(t)] \begin{bmatrix} U_{C1} \\ U_{C2} \\ i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

Avec l'introduction des expressions des tensions composées (IV.39), on définit la matrice de conversion composée:

$$\begin{bmatrix} (F_{11}^b + F_{21}^b) & -(F_{10}^b + F_{20}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{21}^b + F_{31}^b) & -(F_{20}^b + F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ (F_{31}^b + F_{11}^b) & -(F_{20}^b + F_{30}^b) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_{11}^b & F_{21}^b & F_{31}^b \\ 0 & 0 & F_{10}^b & F_{20}^b & F_{30}^b \\ 0 & 0 & (1 - F_{11g}^b + F_{10g}^b) & (1 - F_{21g}^b + F_{20g}^b) & (1 - F_{31g}^b + F_{30g}^b) \end{bmatrix}$$

2.7 MODELE DE CONNAISSANCE GLOBAL DE L'ASSOCIATION :

Le modèle de connaissance global de l'association comporte [19], [22] :

- La partie commande représentée par le réseau de Pétri qui décrit le fonctionnement de l'onduleur en mode Commandable. Cette partie génère la matrice de conversion $[N(t)]$.
- La partie puissance est constituée par :
 - Un bloc discontinu (convertisseur) qui délivre les entrées de la partie continue à partir des variables d'états et de la matrice de conversion simple $[N(t)]$.
 - Un bloc continu représenté par le modèle d'état de la charge et la source de tension continue.

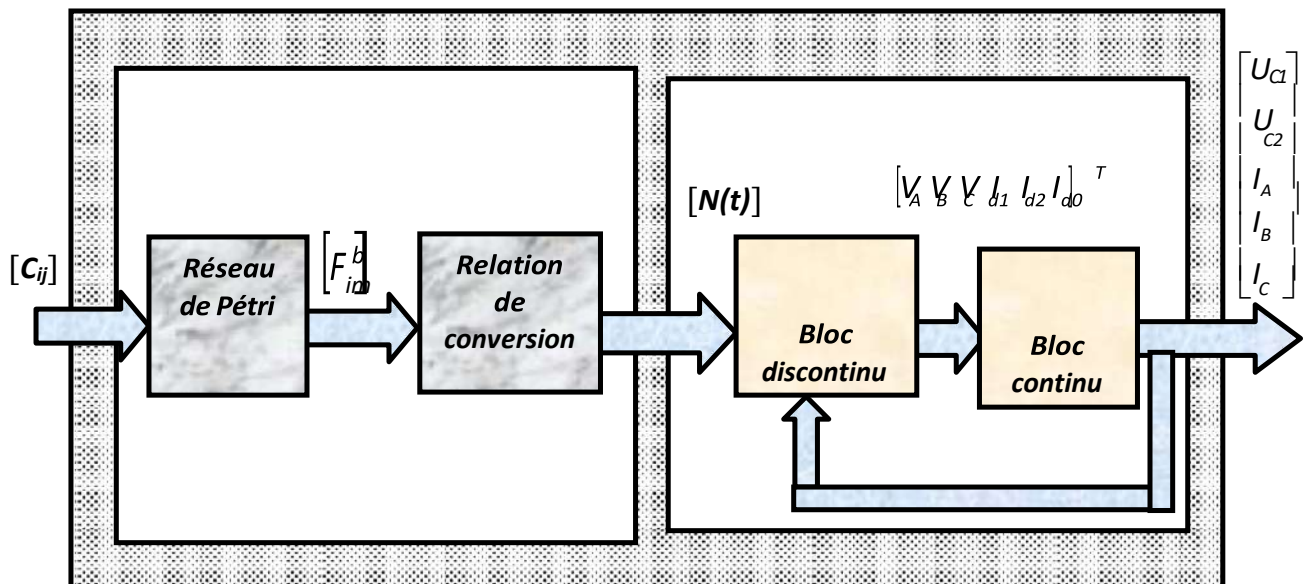


Figure (2.11): Modèle de connaissance globale de l'association : Onduleur – charge triphasée

Remarque : Les commandes $[C_{ij}]$ des interrupteurs sont générées par la stratégie de commande à MLI de l'onduleur.

2.8 Simulation de l'onduleur à trois niveaux de type NPC :

2.8.1 La commande triangulo-sinusoidale avec deux porteuses unipolaires :

L'algorithme de cette stratégie pour un bras K (K=a, b, c) peut se résumer par le système d'équation () suivant :

$$(|V_{réf}| \leq U_p) \Rightarrow C_{11} = C_{12} \quad (2.55)$$

$$(|V_{réf}| > U_p) \text{ et } (V_{réf} > 0) \Rightarrow C_{11} = 1 \text{ et } C_{12} = 1 \text{ avec } \begin{cases} C_{13} = \overline{C_{11}} \\ C_{14} = \overline{C_{14}} \end{cases} \quad (2.56)$$

$$(|V_{réf}| > U_p) \text{ et } (V_{réf} < 0) \Rightarrow C_{11} = 0 \text{ et } C_{12} = 0 \quad (2.57)$$

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé utilisé, qui permettent d'avoir une symétrie triphasée équilibrée directe ou inverse, sont données par le système d'équations suivant:

$$\begin{aligned} V_{ref1} &= V_m \sin(W_t - \varphi) \\ V_{ref2} &= V_{rm} (W_t - \varphi - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3} &= V_{rm} (W_t - \varphi - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (2.58)$$

Avec: V_{ref1} : représente la variation de l'amplitude de l'onde de la référence.

U_p : représente la variation de l'amplitude de l'onde de la porteuse.

C_{11} : la commande des interrupteurs de l'onduleur

Le schéma bloc de la commande MLI triangulo-sinusoïdale de l'onduleur NPC à trois niveaux est représenté sur la figure (2.12) suivante :

2.8.2 Résultat de simulation :

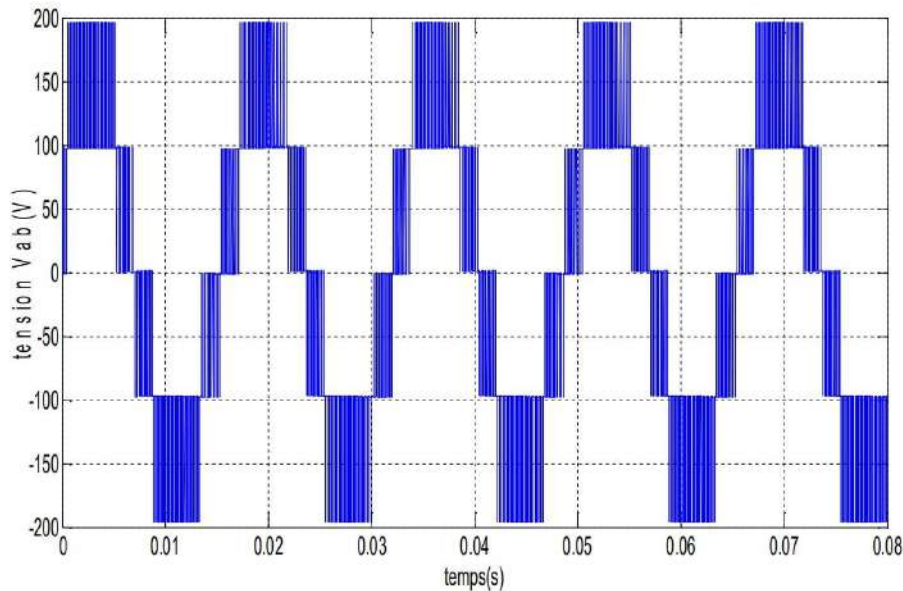


Figure 2.12 : La Tension de sortie V_{ab}

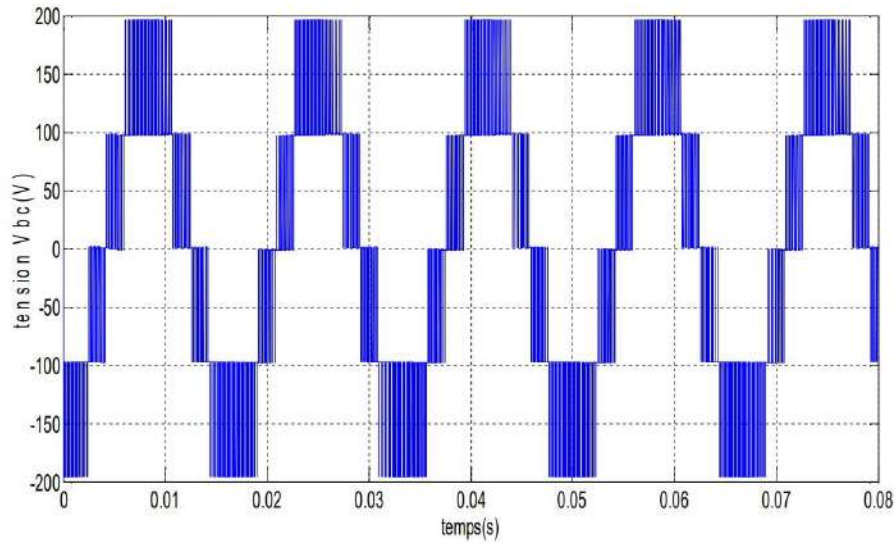


Figure 2.13 :La Tension de sortie V_{bc}

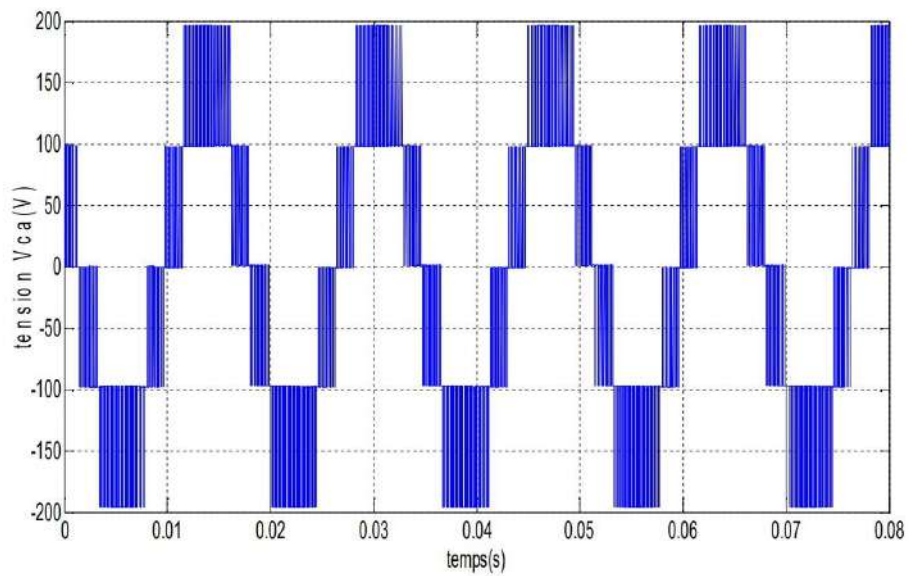


Figure2.14 :La Tension de sortie V_{ca}

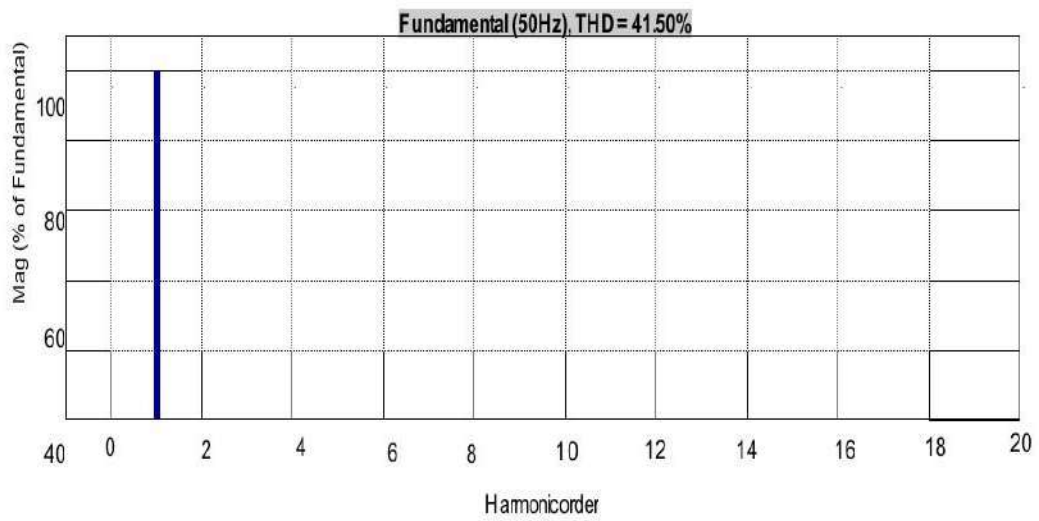


Figure 2.15 : Le spectre d'harmonique de la tension

2.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation et la simulation de l'onduleur à trois niveaux NPC, une topologie d'onduleur largement utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie. Notre objectif principal était d'analyser le comportement de cet onduleur et d'évaluer ses performances dans différentes conditions, et développé un modèle mathématique de l'onduleur à trois niveaux NPC en utilisant les équations de commutation et de modulation appropriées. Ce modèle nous a permis de décrire avec précision le comportement de l'onduleur et de simuler son fonctionnement dans différentes situations.

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de Machine Asynchrone à Double Etoile

3.1 Introduction :

La machine asynchrone double étoile (MASDE) n'est pas un système simple, car de nombreux phénomènes compliqués interviennent dans son fonctionnement, comme la saturation, l'effet de peau... etc. [26].[27].[28].

Le modèle électromagnétique de la machine asynchrone double étoile est un système à dix équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. La résolution d'un tel système est difficile. En effet, l'utilisation d'une transformation dite de PARK, qui est un changement convenable des variables, permet de détourner cette difficulté et d'obtenir un modèle facilement exploitable

Dans ce chapitre, on présente la modélisation et simulation de l'alimentation de la machine asynchrone double étoile qui est composée de deux onduleurs de tension à trois niveaux commandés par la stratégie triangulo-sinusoïdale et d'un redresseur à diodes suivi d'un filtre passe-bas alimentant les deux onduleurs.

3.2 Description de machine asynchrone à double étoile :

La machine asynchrone double étoile comporte dans le stator deux systèmes de bobinages triphasés décalés entre eux d'un angle électrique α (dans cette modélisation on prend $\alpha = 30^\circ$) et un rotor soit bobiné soit à cage d'écureuil. Pour simplifier l'étude, nous considérons les circuits électriques du rotor comme équivalents à un enroulement triphasé en court-circuit. La figure 1.2 donne la position des axes d'enroulement des neuf phases constituant la machine. Six phases pour le stator et trois phases pour le rotor.

On notera par l'indice s1 pour les grandeurs relatives à la première étoile (stator1) et par l'indice s2 pour celles relatives à la deuxième étoile (stator 2). Les phases de la première étoile As1, Bs1, Cs1 et les phases de la deuxième étoile prennent As2, Bs2, Cs2, les phases rotoriques sont notées par Ar, Br, Cr. L'angle de décalage entre les deux étoiles est α . θ_m exprime la position du rotor (phase Ar) par rapport à l'étoile1 (phase As1). θ_2 la position du rotor par rapport à l'étoile2, ces angles sont définis par les équations suivantes :[25]

$$\theta_m = \Omega_m t + \theta_0$$

$$\theta_2 = \theta_m - \alpha$$

Ω_m [rad/s] : la vitesse mécanique du rotor. θ_0 : la position du rotor par rapport au l'étoile 1.

3.3 Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile:

Les courants triphasés de fréquence f_s alimentant l'enroulement 1 du stator de la machine, donnent naissance à un champ tournant à la vitesse de synchronisme N_s , tel que :

$$N_s = \frac{f_s}{p} [tr/s]$$

Avec: P : le nombre de paire de pôles.

Les mêmes courants triphasés mais décalés d'un angle α alimentant l'enroulement 2 du même stator donnent eux aussi naissance à un autre champ tournant à la même vitesse de synchronisme N_s . Ces deux champs tournants produits par les deux enroulements statoriques vont induire des courants dans les conducteurs du rotor, générant ainsi des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse N [tr/s] inférieure à celle du synchronisme ($N < N_s$), ainsi les effets de l'induction statoriques sur les courants induits rotoriques se manifestent par l'élaboration d'un couple de force électromagnétique sur le rotor tel que l'écart des vitesses soit réduit. On dit alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement par le rapport :[25]

$$g = \frac{N_s - N}{N_s}$$

Les différents modes de fonctionnement dépendent de la valeur du glissement.



Dans notre étude, nous nous sommes intéressés au mode de fonctionnement moteur.

3.3.1 Hypothèses simplificatrices:

La machine asynchrone double étoile (MASDE), avec la répartition de ses enroulements et sa propre géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices [26] [27] [29] :

- La force magnétomotrice créée par chacune des phases est à répartition sinusoïdale;
- L'entrefer est uniforme ;
- La machine est de constitution symétrique ;
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.

3.4 Modélisation de la machine à double étoile :

3.4.1 Modèle de la machine asynchrone à double étoile :

La représentation schématique de la machine asynchrone à double étoile dans l'espace électrique est donnée sur la figure

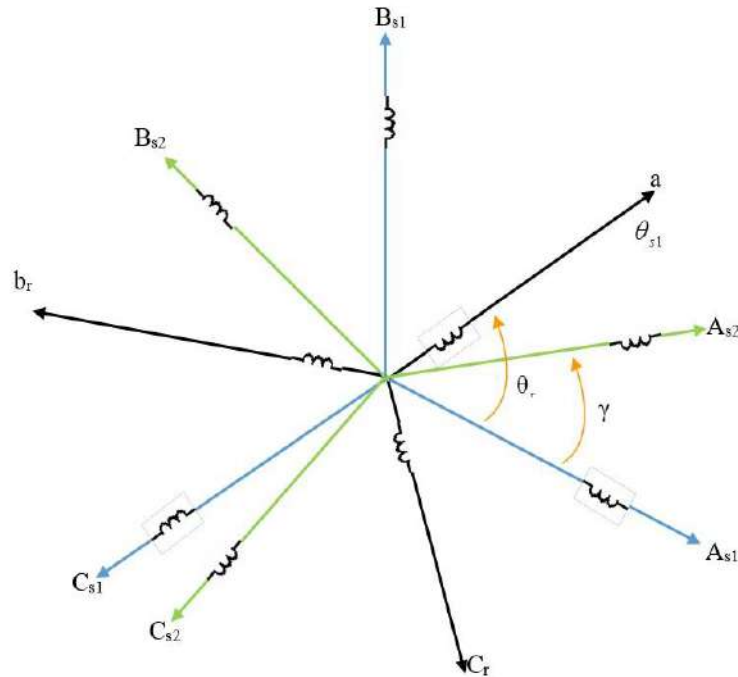


Fig.3.1 : Représentation des enroulements de la machine à double étoile

3.4.1.1 Equations électrique de la machine :

Les équations des tensions de la machine asynchrone à double étoile représentent pour chaque enroulement la somme de la chute ohmique et la chute inductive due au flux.

$$\text{Pour l'étoile 1 : } \begin{cases} V_{sa1} = R_{sa1}I_{sa1} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa1} \\ V_{sb1} = R_{sb1}I_{sb1} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb1} \\ V_{sc1} = R_{sc1}I_{sc1} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc1} \end{cases} \quad (3.1)$$

$$\text{Pour l'étoile 2 : } \begin{cases} V_{sa2} = R_{sa2}I_{sa2} + \frac{d}{dt} \Phi_{sa2} \\ V_{sb2} = R_{sb2}I_{sb2} + \frac{d}{dt} \Phi_{sb2} \\ V_{sc2} = R_{sc2}I_{sc2} + \frac{d}{dt} \Phi_{sc2} \end{cases} \quad (3.2)$$

$$\text{Pour rotor : } \begin{cases} 0 = R_{ra}I_{ra} + \frac{d}{dt} \Phi_{ra} \\ 0 = R_{rb}I_{rb} + \frac{d}{dt} \Phi_{rb} \\ 0 = R_{rc}I_{rc} + \frac{d}{dt} \Phi_{rc} \end{cases} \quad (3.3)$$

La forme matricielle s'écrit :

$$\text{Pour l'étoile 1 : } [V_{s1}] = [R_{s1}] [I_{s1}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{s1}] \quad (3.4)$$

$$\text{Pour l'étoile 2 : } [V_{s2}] = [R_{s2}] [I_{s2}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{s2}] \quad (3.5)$$

$$\text{Pour le rotor : } [V_r] = [R_r] [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \quad (3.6)$$

Avec :

$$[R_{s1}] = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} ; \quad [R_{s2}] = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} ; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$[V_{s1}] = \begin{bmatrix} V_{sa1} \\ V_{sb1} \\ V_{sc1} \end{bmatrix} ; \quad [V_{s2}] = \begin{bmatrix} V_{sa2} \\ V_{sb2} \\ V_{sc2} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Sachant que:

$$[I_{sa1}] = \begin{bmatrix} I_{sa1} \\ I_{sb1} \\ I_{sc1} \end{bmatrix} ; \quad [I_{sa2}] = \begin{bmatrix} I_{sa2} \\ I_{sb2} \\ I_{sc2} \end{bmatrix} ; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

De même :

$$[\Phi_{s1}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa1} \\ \Phi_{sb1} \\ \Phi_{sc1} \end{bmatrix} ; \quad [\Phi_{s2}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa2} \\ \Phi_{sb2} \\ \Phi_{sc2} \end{bmatrix} ; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.4.1.1.2 Equations magnétiques :

C'est à partir de la matrice $[L(\theta)]$ qu'on obtient les équations du flux en fonction des courants.

$$[L(\theta)] = \begin{bmatrix} L_{s1s1} & L_{s1s2} & L_{s1r} \\ L_{s2s1} & L_{s2s2} & L_{s2r} \\ L_{rs1} & L_{rs2} & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Les équations des flux statoriques et rotorique sous forme matricielle est donnée par :

$$\begin{bmatrix} [\Phi_{s1}] \\ [\Phi_{s2}] \\ [\Phi_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1s1}] & [L_{s1s2}] & [L_{s1r}] \\ [L_{s2s1}] & [L_{s2s2}] & [L_{s2r}] \\ [L_{rs1}] & [L_{rs2}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I_{s1}] \\ [I_{s2}] \\ [I_r] \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$[L_{s1s1}] = \begin{bmatrix} (L_{s1} + L_{ms}) & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & (L_{s1} + L_{ms}) & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & (L_{s1} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$[L_{s2s2}] = \begin{bmatrix} (L_{s2} + L_{ms}) & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & (L_{s2} + L_{ms}) & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & (L_{s2} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} (L_r + L_{mr}) & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & (L_r + L_{mr}) & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & (L_r + L_{mr}) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$[L_{s1s2}] = \begin{bmatrix} L_{ms} \cos(\gamma) & L_{ms} \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\gamma + \frac{4\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\gamma + \frac{4\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\gamma) & L_{ms} \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{ms} \cos(\gamma + \frac{2\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\gamma + \frac{4\pi}{3}) & L_{ms} \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

$$[L_{s1r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r + \frac{4\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$[L_{s2r}] = \begin{bmatrix} L_{sr} \cos(\theta_r - \gamma) & L_{sr} \cos(\theta_r - \gamma + \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r - \gamma + \frac{4\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r - \gamma + \frac{4\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r - \gamma) & L_{sr} \cos(\theta_r - \gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ L_{sr} \cos(\theta_r - \gamma + \frac{2\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r - \gamma + \frac{4\pi}{3}) & L_{sr} \cos(\theta_r - \gamma) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Les sous matrices $[L_{s1s2}] = [L_{s2s1}]^t$ et $[L_{s1r}] = [L_{rs1}]^t$ et $[L_{s2r}] = [L_{rs2}]^t$

3.4.1.1.3 Energie magnétique :

Elle peut être calculée à partir de l'expression :

$$\omega_{mag} = \frac{1}{2} ([I_{s1}]^t [\Phi_{s1}] + [I_{s2}]^t [\Phi_{s2}] + [I_r]^t [\Phi_r]) \quad (3.19)$$

3.4.1.1.4 Couple électromagnétique :

Il est donné par la dérivée partielle de l'énergie par rapport à l'angle mécanique.

$$C_{em} = \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_m} = p \frac{d\omega_{mag}}{d\theta_e} \quad (3.20)$$

Avec :

Le couple électromagnétique est donné par l'expression suivant :

$$C_{em} = \left(\frac{p}{2} \right) \left([I_{s, abc1}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s1r}] [I_{r, abc}]^t + [I_{s, abc2}] \frac{d}{d\theta_r} [L_{s2r}] [I_{r, abc}]^t \right) \quad (3.21)$$

3.4.1.1.5 Equation mécanique :

Elle est la solution de l'équation fondamentale de la dynamique :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - F_r \Omega \quad (3.22)$$

3.4.2 Transformation de base de park :

La transformation de park rend assez aisée de tous les régime transitoires de la machine électrique polyphasée.

Le principe consiste à remplacer les grandeurs (courant, tension et flux) d'indices réelles a,b,c par des grandeurs d'indices d, q, o (direct, en quadrature et homopolaire) à l'aide de la matrice de park. [P(θ)].

On transforme le système triphasé on un système biphasée tournant.

La matrice de park. Pour l'étoile 1 est définie comme suit :

$$[p(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

La matrice de PARK pour l'étoile 2 est définie comme suit :

$$[p(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \gamma) & \cos(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \gamma) & -\sin(\theta - \gamma - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \gamma + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

La matrice de PARK pur le rotor est définie comme suit :

$$[p(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & -\sin(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

3.4.3 Application de la transformation de Park à la MASDE :

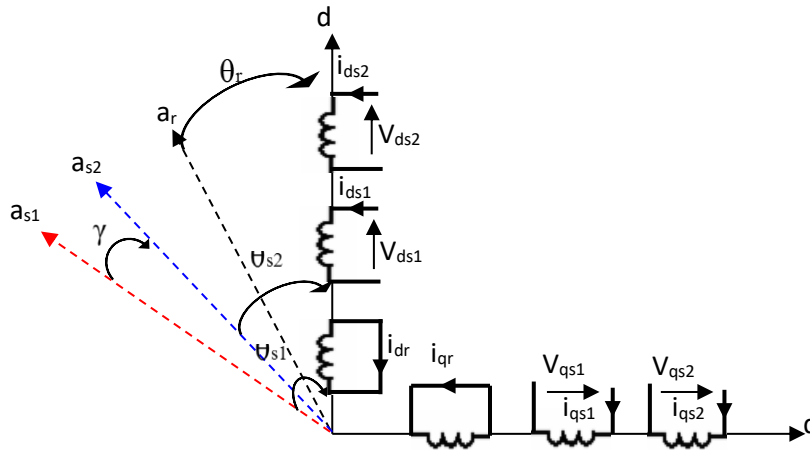


Fig : 3.2 :Représentation schématique du modèle de PARK de la MASDE

3.4.3.1 Equations transformées :

Les courant, la tension et les flux se transforment de la manière suivante :

Transformation de tension :

$$\begin{aligned} [V_{s1}] &= [P(\theta_{s1})][V_{s1p}] \\ [V_{s2}] &= [P(\theta_{s2})][V_{s2p}] \end{aligned} \quad (3.26)$$

Transformation des courants :

$$\begin{aligned} [I_{s1}] &= [P(\theta_{s1})][I_{s1p}] \\ [I_{s2}] &= [P(\theta_{s2})][I_{s2p}] \\ [I_r] &= [P(\theta_r)][I_{rp}] \end{aligned} \quad (3.26)$$

Transformation des flux :

$$\begin{aligned} [\Phi_{s1}] &= [p(\theta_{s1})][I_{s1p}] \\ [\Phi_{s2}] &= [p(\theta_{s2})][I_{s2p}] \\ [\Phi_r] &= [p(\theta_r)][I_{rp}] \end{aligned} \quad (3.27)$$

Avec :

$$[V_{s1p}] = \begin{bmatrix} V_{s1o} \\ V_{s1d} \\ V_{s1q} \end{bmatrix}, \quad [V_{s2p}] = \begin{bmatrix} V_{s2o} \\ V_{s2d} \\ V_{s2q} \end{bmatrix}, \quad [I_{s1p}] = \begin{bmatrix} I_{s1o} \\ I_{s1d} \\ I_{s1q} \end{bmatrix}, \quad [I_{s2p}] = \begin{bmatrix} I_{s2o} \\ I_{s2d} \\ I_{s2q} \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{I}_{rp}] = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ro} \\ \mathbf{I}_{rd} \\ \mathbf{I}_{rq} \end{bmatrix}, \quad [\Phi_{s1p}] = \begin{bmatrix} \Phi_{s1o} \\ \Phi_{s1d} \\ \Phi_{s1q} \end{bmatrix}, \quad [\Phi_{s2p}] = \begin{bmatrix} \Phi_{s2o} \\ \Phi_{s2d} \\ \Phi_{s2q} \end{bmatrix}, \quad [\Phi_{rp}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ro} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix}$$

3.5 Equations matricielle de la machine avec transformation de PARK :

3.5.1 Equations des tensions :

En appliquant la transformation de PARK :

$$[\mathbf{P}(\theta_{s1})][\mathbf{V}_{s1p}] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{P}(\theta_{s1})][\mathbf{I}_{s1p}] + \frac{d}{dt}([\mathbf{P}(\theta_{s1})][\Phi_{s1p}]) \quad (3.28)$$

$$[\mathbf{P}(\theta_{s2})][\mathbf{V}_{s2p}] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{P}(\theta_{s2})][\mathbf{I}_{s2p}] + \frac{d}{dt}([\mathbf{P}(\theta_{s2})][\Phi_{s2p}]) \quad (3.29)$$

$$0 = [\mathbf{R}_r][\mathbf{P}(\theta_r)][\mathbf{I}_{rp}] + \frac{d}{dt}([\mathbf{P}(\theta_r)][\Phi_r]) \quad (3.30)$$

En multipliant à gauche par $[\mathbf{P}(\theta_s)]^{-1}$:

$$[\mathbf{V}_{s1p}] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{I}_{s1p}] + [\mathbf{P}(\theta_{s1})]^{-1} \frac{d}{dt}([\mathbf{P}(\theta_{s1})][\Phi_{s1p}]) \quad (3.31)$$

$$[\mathbf{V}_{s1p}] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{I}_{s1p}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s1p}] + [\mathbf{P}(\theta_{s1})]^{-1} \left(\frac{d}{dt}[\mathbf{P}(\theta_{s1})] \right) [\Phi_{s1p}] \quad (3.32)$$

$$[\mathbf{V}_{s1p}] = [\mathbf{R}_s][\mathbf{I}_{s1p}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{s1p}] + [\mathbf{P}(\theta_{s1})]^{-1} \frac{d\theta}{dt} \frac{d}{dt}([\mathbf{P}(\theta_{s1})][\Phi_{s1p}]) \quad (3.33)$$

On pose : $\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \frac{d\theta_{s2}}{dt} = \omega_s$ (3.34)

D'ou le résultat final :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{s1o} \\ \mathbf{V}_{s1d} \\ \mathbf{V}_{s1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{R}_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{R}_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{s1o} \\ \mathbf{I}_{s1d} \\ \mathbf{I}_{s1q} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{s1o} \\ \Phi_{s1d} \\ \Phi_{s1q} \end{bmatrix} + \omega_s \begin{bmatrix} 0 \\ -\Phi_{s1q} \\ \Phi_{s1d} \end{bmatrix}$$

Ou encore en développant la matrice :

Avec la composante homopolaire nulle, nous obtenons le système d'équation suivant :

$$\begin{cases} V_{s1d} = R_{s1}I_{s1d} + \frac{d}{dt} \Phi_{s1d} - \omega_s \Phi_{s1q} \\ V_{s1q} = R_{s1}I_{s1q} + \frac{d}{dt} \Phi_{s1q} + \omega_s \Phi_{s1d} \end{cases} \quad (3.35)$$

De même raisonnement que pour l'étoile long aura à l'étoile 2 les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_{s2d} = R_{s2}I_{s2d} + \frac{d}{dt} \Phi_{s2d} - \omega_s \Phi_{s2q} \\ V_{s2q} = R_{s2}I_{s2q} + \frac{d}{dt} \Phi_{s2q} + \omega_s \Phi_{s2d} \end{cases} \quad (3.36)$$

De même raisonnement que pour les deux étoiles on aura au rotor les équations suivantes :

$$\begin{cases} 0 = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ 0 = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (3.37)$$

3.5.2 Les équations des tensions définitives de la MASDE:

$$\begin{cases} V_{s1d} = R_{s1}I_{s1d} + \frac{d}{dt} \Phi_{s1d} - \omega_s \Phi_{s1q} \\ V_{s1q} = R_{s1}I_{s1q} + \frac{d}{dt} \Phi_{s1q} + \omega_s \Phi_{s1d} \\ V_{s2d} = R_{s2}I_{s2d} + \frac{d}{dt} \Phi_{s2d} - \omega_s \Phi_{s2q} \\ V_{s2q} = R_{s2}I_{s2d} + \frac{d}{dt} \Phi_{s2q} + \omega_s \Phi_{s2d} \\ 0 = R_r I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega) \Phi_{rq} \\ 0 = R_r I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega) \Phi_{rd} \end{cases} \quad (3.38)$$

3.5.3 Equations magnétiques :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s1} \\ \Phi_{s2} \\ \Phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{s1s1}] & [L_{s1s2}] & [L_{s1r}] \\ [L_{s2s1}] & [L_{s2s2}] & [L_{s2r}] \\ [L_{rs1}] & [L_{rs2}] & [L_{rr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_r \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned}
 [\Phi_{s1}] &= [L_{s1s1}][I_{s1}] + [L_{s1s2}][I_{s2}] + [L_{s1r}][I_r] \\
 [\Phi_{s2}] &= [L_{s2s1}][I_{s1}] + [L_{s2s2}][I_{s2}] + [L_{s2r}][I_r] \\
 [\Phi_r] &= [L_{rs1}][I_{s1}] + [L_{rs2}][I_{s2}] + [L_{rr}][I_r]
 \end{aligned} \tag{3.40}$$

Après la transformation des flux et des courants on aura :

$$\begin{aligned}
 [P(\theta_{s1})][\Phi_{s1p}] &= [L_{s1s1}] [P(\theta_{s1})][I_{s1p}] + [L_{s1s2}] [P(\theta_{s2})][I_{s2p}] + [L_{s1r}] [P(\theta_r)][I_{rp}] \\
 [P(\theta_{s2})][\Phi_{s2p}] &= [L_{s2s1}] [P(\theta_{s1})][I_{s1p}] + [L_{s2s2}] [P(\theta_{s2})][I_{s2p}] + [L_{s2r}] [P(\theta_r)][I_{rp}] \\
 [P(\theta_r)][\Phi_r] &= [L_{rs1}] [P(\theta_{s1})][I_{s1p}] + [L_{rs2}] [P(\theta_{s2})][I_{s2p}] + [L_{rr}] [P(\theta_r)][I_{rp}]
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

En multipliant a gauche par : $[p(\theta_{s1})]^{-1}$, $[p(\theta_{s2})]^{-1}$ et $[p(\theta_r)]^{-1}$ en trouve :

$$\begin{cases} \Phi_{s1d} = L_{s1}I_{s1d} + L_m(I_{s1d} + I_{s2d} + I_{rd}) \\ \Phi_{s1q} = L_{s1}I_{s1q} + L_m(I_{s1q} + I_{s2q} + I_{rq}) \end{cases} \tag{3.42}$$

$$\begin{cases} \Phi_{s2d} = L_{s2}I_{s2d} + L_m(I_{s1d} + I_{s2d} + I_{rd}) \\ \Phi_{s2q} = L_{s2}I_{s2q} + L_m(I_{s1q} + I_{s2q} + I_{rq}) \end{cases} \tag{3.43}$$

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m(I_{s1d} + I_{s2d} + I_{rd}) \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m(I_{s1q} + I_{s2q} + I_{rq}) \end{cases} \tag{3.44}$$

La forme matricielle est la suivante :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s1d} \\ \Phi_{s2d} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_{s2} + L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1d} \\ I_{s2d} \\ I_{rd} \end{bmatrix} \tag{3.45}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_{s1q} \\ \Phi_{s2q} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{s1} + L_m & L_m & L_m \\ L_m & L_{s2} + L_m & L_m \\ L_m & L_m & L_r + L_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s1q} \\ I_{s2q} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \tag{3.46}$$

$(L_{s1}+L_m)$, $(L_{s2}+L_m)$: Inductances propre cyclique de l'étoile 1 et 2.

(L_r+L_m) : inductance propre cyclique du rotor.

$L_m = \frac{3}{2} L_{ms} = \frac{3}{2} L_{mr} = \frac{3}{2} L_{sr}$: Inductance mutuelle cyclique entre l'étoile 1 et 2 et le rotor.

3.5.4 Equation mécanique :

3.5.4.a Puissance instantanée :

La transformation de PARK repose sur l'invariance de la puissance instantanée P dans les deux systèmes de transformation .Ce qui de toute évidence conduit à leur équivalence physique.

$$P= [V_s]^T [I_s]=V_{sa1}I_{sa1}+V_{sb1}I_{sb1}+V_{sc1}I_{sc1} +V_{sa2}I_{sa2}V_{sb2}I_{sb2}+V_{sc2}I_{sc2} \quad (3.47)$$

Et comme la transformation de park utilisée conserve la puissance instantanée, on peut écrire :

$$P= (V_{sd1}I_{sd1}+V_{sd2}I_{sd2}+V_{sq1}I_{sq1} +V_{sq2}I_{sq2}) \quad (3.48)$$

$$P= \frac{3}{2} \left\{ \left[\left(R_{s1}I_{s1d} + \frac{d}{dt} \Phi_{s1d} - \omega_s \Phi_{s1q} \right) (I_{s1d}) \right] + \left[\left(R_{s2}I_{s2d} + \frac{d}{dt} \Phi_{s2d} - \omega_s \Phi_{s2q} \right) (I_{s2d}) \right] \right\} +$$

$$\frac{3}{2} \left\{ \left[\left(R_{s1}I_{s1q} + \frac{d}{dt} \Phi_{s1q} + \omega_s \Phi_{s1d} \right) (I_{s1q}) \right] + \left[\left(R_{s2}I_{s2q} + \frac{d}{dt} \Phi_{s2q} + \omega_s \Phi_{s2d} \right) (I_{s2q}) \right] \right\} \quad (3.49)$$

$$P= \frac{3}{2} \left[R_{s1}(I_{s1d})^2 + R_{s2}(I_{s2d})^2 + R_{s1}(I_{s1q})^2 + R_{s2}(I_{s2q})^2 \right] +$$

$$\frac{3}{2} \left[\frac{d}{dt} \Phi_{s1d} I_{s1d} + \frac{d}{dt} \Phi_{s2d} I_{s2d} + \frac{d}{dt} \Phi_{s1q} I_{s1q} + \frac{d}{dt} \Phi_{s2q} I_{s2q} \right] +$$

$$\frac{3}{2} \left[\omega_s (\Phi_{s1d} I_{s1q} + \Phi_{s2d} I_{s2q} - \Phi_{s1q} I_{s1d} - \Phi_{s2q} I_{s2d}) \right] \quad (3.50)$$

Le premier terme entre accolade est identifiable aux pertes joules. Le second terme correspond à la puissance électromagnétique stockée dans le champ. Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique.

3.5.4.b Couple électromagnétique :

$$P_{em}=C_{em} \cdot \Omega$$

$$P_{em} = \frac{3}{2} \omega_s \left[\Phi_{s1d} I_{s1q} + \Phi_{s2d} I_{s2q} - \Phi_{s1q} I_{s1d} - \Phi_{s2q} I_{s2d} \right] \quad (3.51)$$

$$\Rightarrow C_{em} = \frac{3}{2} \frac{\omega_s}{\Omega} \left[\Phi_{s1d} I_{s1q} + \Phi_{s2d} I_{s2q} - \Phi_{s1q} I_{s1d} - \Phi_{s2q} I_{s2d} \right]$$

$$\Rightarrow C_{em} = \frac{3}{2} p \left[\Phi_{s1d} I_{s1q} + \Phi_{s2d} I_{s2q} - \Phi_{s1q} I_{s1d} - \Phi_{s2q} I_{s2d} \right] \quad (3.52)$$

P : nombre de pair de pole.

On remplaçant les équations des flux dans l'équation de couple on aura :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \left[\left\{ L_{s1} I_{s1d} + L_m (I_{s1d} + I_{s2d} + I_{rd}) \right\} I_{s1q} + \left\{ L_{s2} I_{s2d} + L_m (I_{s1d} + I_{s2d} + I_{rd}) \right\} I_{s2q} \right] - \frac{3}{2} p \left[\left\{ L_{s1} I_{s1q} + L_m (I_{s1q} + I_{s2q} + I_{rq}) \right\} I_{s1d} + \left\{ L_{s2} I_{s2q} + L_m (I_{s1q} + I_{s2q} + I_{rq}) \right\} I_{s2d} \right] \quad (3.53)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} p L_m \left[I_{rd} (I_{s1q} + I_{s2q}) - I_{rq} (I_{s1d} + I_{s2d}) \right] \quad (3.54)$$

Ou bien encore en faisant appel aux flux rotoriques :

$$\Phi_{rd} = L_r I_{rd} + L_m (I_{s1d} + I_{s2d} + I_{rd}) \quad (3.55)$$

$$\Phi_{rq} = L_r I_{rq} + L_m (I_{s1q} + I_{s2q} + I_{rq})$$

On tire :

$$I_{rd} = \frac{\Phi_{rd}}{L_r + L_m} - \frac{L_m}{L_r + L_m} (I_{s1d} + I_{s2d}) \quad (3.56)$$

$$I_{rq} = \frac{\Phi_{rq}}{L_r + L_m} - \frac{L_m}{L_r + L_m} (I_{s1q} + I_{s2q}) \quad (3.57)$$

On remplaçant I_{rd} et I_{rq} dans l'équation du couple, on aura :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r + L_m} \left[\Phi_{rd} (I_{s1q} + I_{s2q}) - \Phi_{rq} (I_{s1d} + I_{s2d}) \right] \quad (3.58)$$

Equation mécanique :

$$C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r + L_m} \left[\Phi_{rd} (I_{s1q} + I_{s2q}) - \Phi_{rq} (I_{s1d} + I_{s2d}) \right] \quad (3.59)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - F_r \Omega \quad (3.60)$$

3.6 Résultats de simulation :

Le schéma bloc de la Machine asynchrone double étoile :

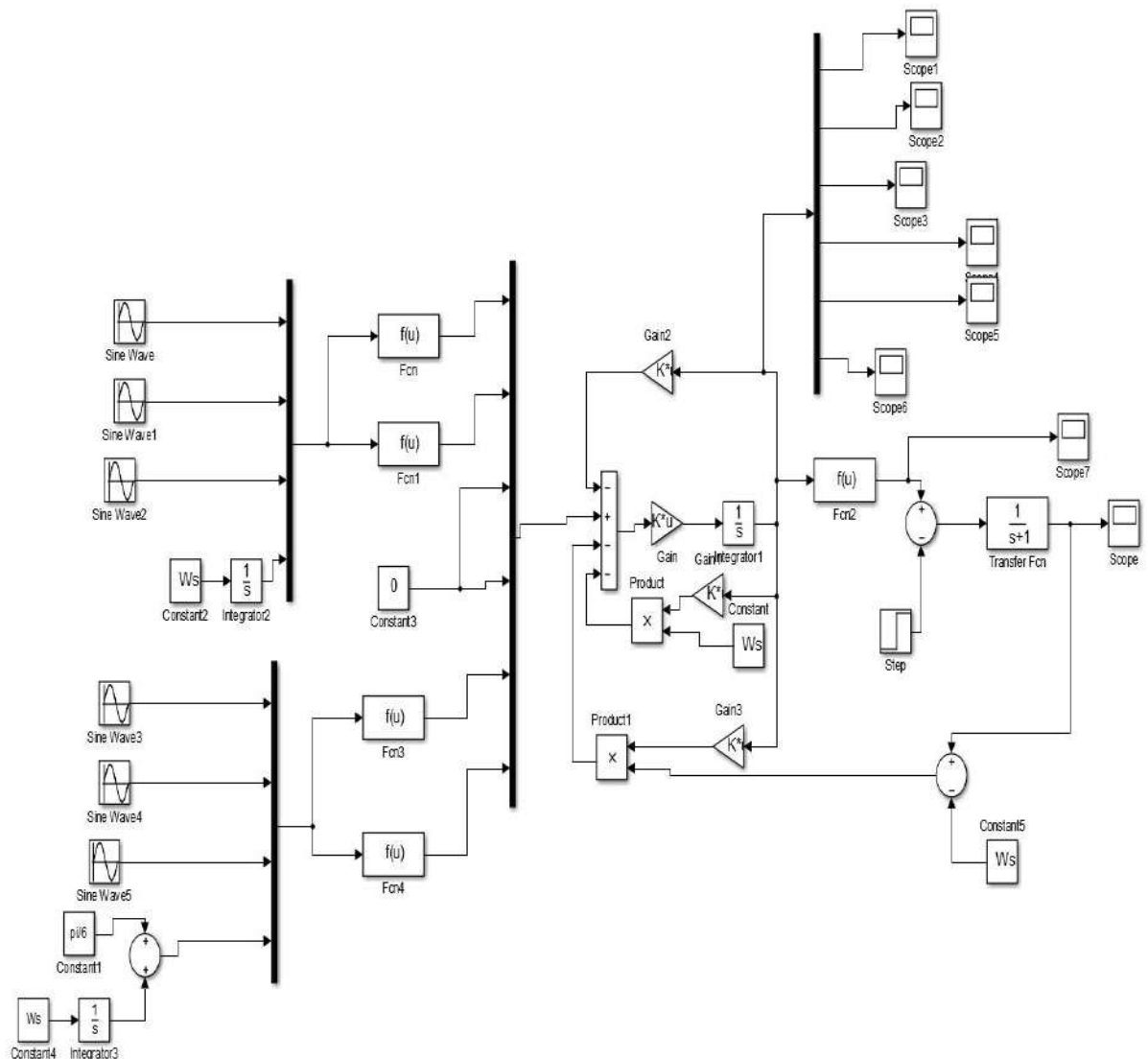


Figure3.3 : Le schéma bloc de la Machine asynchrone double étoile sous matlab/simulink

Les résultats suivants représentent l'évolution des caractéristiques de la MASDE avec la charge

$$C = 14 \text{ entre l'intervalle de temps } = [2, 3.5]s$$

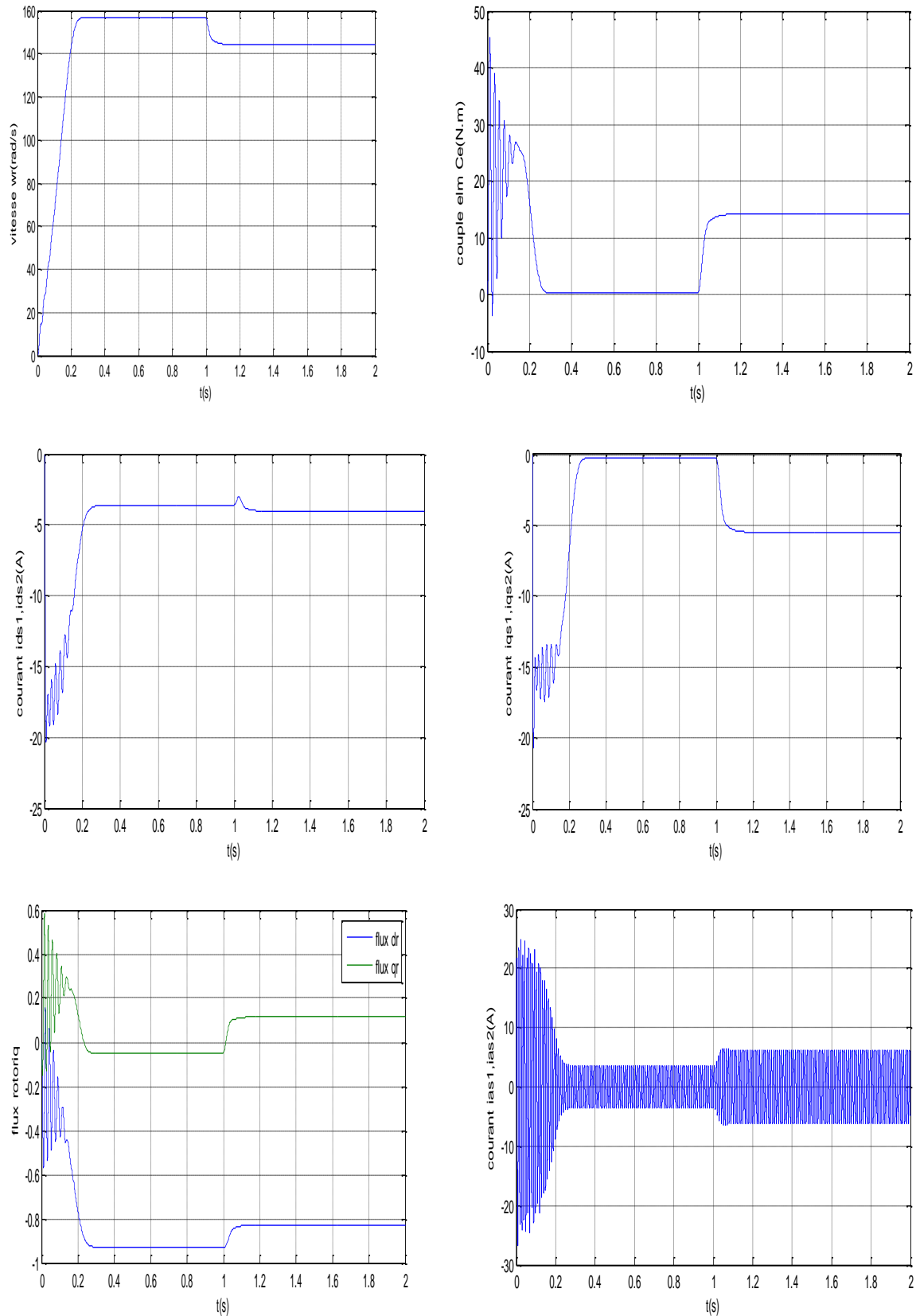


Figure 3.4 : Performances de la machine asynchrone double étoile avec application d'un couple de charge $C_r=14$ N.m entre 2 et 3.5s

3.7 Alimentation de la machine asynchrone double étoile:

Pour élaborer la tension triphasée qui attaque la machine, on fait appel au convertisseur statique délivrant ainsi des tensions à amplitude et fréquences réglables à partir d'un réseau standard 220/380-50Hz. L'existence des deux enroulements statoriques nécessite une alimentation par deux onduleurs de tension dont la commande de la MLI est décalée d'un angle α . Les deux onduleurs sont alimentés par un même pont à diodes dont la tension de sortie est filtrée par un filtre passe-bas LC .

La structure générale de l'alimentation de la MASDE est représentée sur la figure 3.5 :

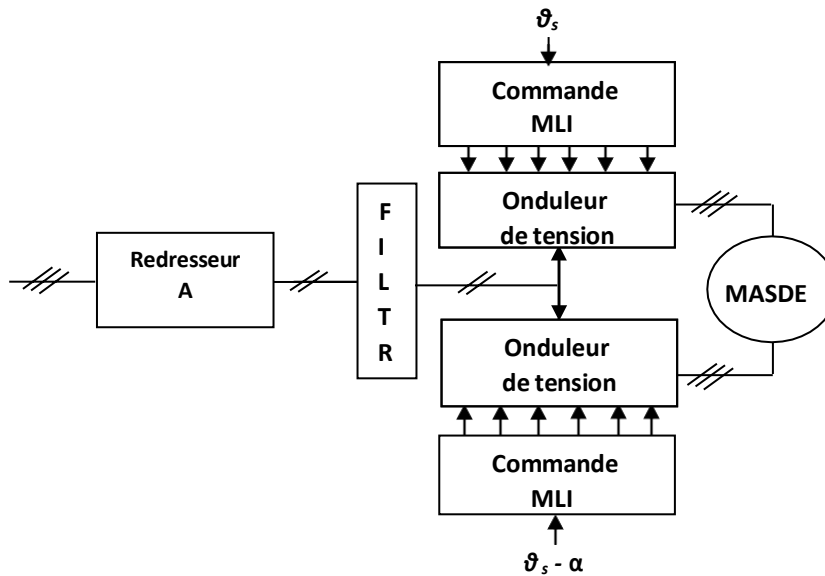


Figure 3.5 : Structure générale de l'alimentation de la MASDE.

3.8 Stratégie de commande triangulo - sinusoïdale à deux porteuses:

Les progrès technologique récents dans le domaine des dispositifs à semi conducteur, comme les transistors de puissance et GTO ont ouvert un large domaine d'application des techniques de modulation de largeur d'impulsion (MLI) dans le contrôle de la tension de sortie des convertisseurs statiques.

L'emploi de cette technique est particulièrement intéressant dans le cas d'onduleur triphasé associés à des machines à courant alternatifs, rendant possible le contrôle en amplitude et en fréquence des tensions de sortie de l'onduleur.

Il nous importe ici de voir de quelle manière les signaux de commande de l'onduleur sont élaborés pour générer une source de tension la plus sinusoïdale possible. Pour cela, différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension à trois niveaux ont été étudiées. Dans ce travail, on se limitera à la présentation d'une seule stratégie qui est la commande triangulo-

sinusoïdale à deux porteuses bipolaires. L'analyse de cette dernière sera basée sur le taux d'harmoniques des tensions de sortie.

3.8.1 Principe de la commande triangulo - sinusoïdale à deux porteuses:

Pour déterminer en temps réel les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs, on fait appel à l'électronique de commande analogique ou numérique. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) nous permet cette détermination.

Le principe consiste à utiliser les intersections d'une onde référence ou modulante (qui est l'image de l'onde de sortie qu'on veut obtenir) généralement sinusoïdale, avec deux porteuses triangulaires bipolaires, d'où l'appellation triangulo sinusoïdale [26].

La figure 3.6 présente le principe de cette stratégie

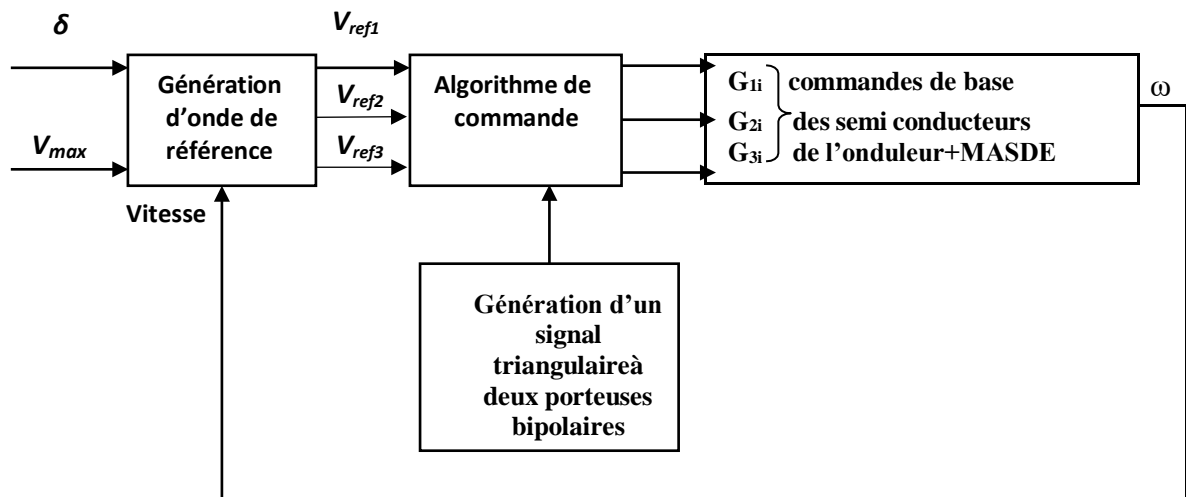


Figure 3.6 : Principe de la commande triangulo – sinusoïdale à deux porteuses bipolaires

3.8.2 Caractéristique de la modulation:

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la modulation[Ber 04] [30][31]:

- Indice de modulation m : égal au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_r de la référence $m = \frac{f_p}{f_r}$;
- Taux de modulation r : égal au rapport de l'amplitude V_{rm} de la tension de référence à l'amplitude V_{pm} de la porteuse $r = \frac{V_{rm}}{V_{pm}}$

D'ordinaire la modulation est synchrone, c'est-à-dire que f_p est un multiple de f_r (m entier), elle est dite asynchrone dans le cas contraire.

Les tensions de référence de l'onduleur triphasé qui permettent d'obtenir un système de tension

triphasee équilibrée directe ou inverse ainsi que les porteuses triangulaires sont définies comme suit :

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_{rm} \sin W_t \\ V_{ref2} = V_{rm} (W_t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3} = V_{rm} (W_t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{p1}(t) = \begin{cases} V_c \left(4 \cdot \frac{1}{T_p} - 1\right) & 0 \leq T \leq \frac{T_p}{2} \\ V_c \left(-4 \cdot \frac{1}{T_p} + 3\right) & \frac{T_p}{2} \leq T \leq T_p \end{cases} \\ V_{p2}(t) = V_{p1}(t + \frac{T_p}{2}) \end{cases}$$

3.8.3 Algorithme de la commande:

L'algorithme de commande de la stratégie triangulo – sinusoïdale à deux Porteuses bipolaires est une conséquence de la caractéristique qu'un onduleur à trois niveaux est une mise en série de deux onduleurs à deux niveaux. Pour un bras k de l'onduleur à trois niveaux, cet algorithme se résume aux deux étapes suivantes :

Etape 1 : détermination des tensions intermédiaires (v_{k1}, v_{k2})

$$\begin{cases} V_{refk} \geq V_{p1} \Rightarrow V_{k1} = V_c \\ V_{refk} < V_{p1} \Rightarrow V_{k1} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{refk} \geq V_{p2} \Rightarrow V_{k1} = 0 \\ V_{refk} < V_{p2} \Rightarrow V_{k1} = -V_c \end{cases}$$

Etape 2 : détermination du signal v_{km} et les ordres de commandes G_{ks} des interrupteurs

$$V_{km} = V_c \Rightarrow G_{k1} = 1 \quad ; \quad G_{k2} = 1$$

$$V_{km} = 0 \Rightarrow G_{k1} = 1 \quad ; \quad G_{k2} = 0$$

$$V_{km} = -V_c \Rightarrow G_{k1} = 0 \quad ; \quad G_{k2} = 0$$

Avec : $V_{km} = V_{k1} + V_{k2}$

$$E_t: \begin{cases} G_{k1} = \overline{G_{k4}} \\ G_{k2} = \overline{G_{k3}} \end{cases}$$

3.9 Résultats de simulation:

La figure 3.10 représente les performances de la conduite de la machine asynchrone triphasée double étoile alimentée par deux onduleurs à trois niveaux commandés par la stratégie triangulo-sinusoïdale à deux porteuses bipolaires ($m=21, r=0.8$) avec l'application d'un couple

de charge ($C_r=14 \text{ N.m}$) à l'instant $t=2\text{s}$.

On remarque que les résultats obtenus sont approximativement similaires avec ceux obtenus par l'alimentation directe (figure 1.6). Cependant, ces allures et en particulier celles, du couple électromagnétique, des courants statoriques, montre que cette technique engendre des ondulations dues principalement aux harmoniques délivrés par les onduleurs, qui se répercutent essentiellement sur le couple électromagnétique.

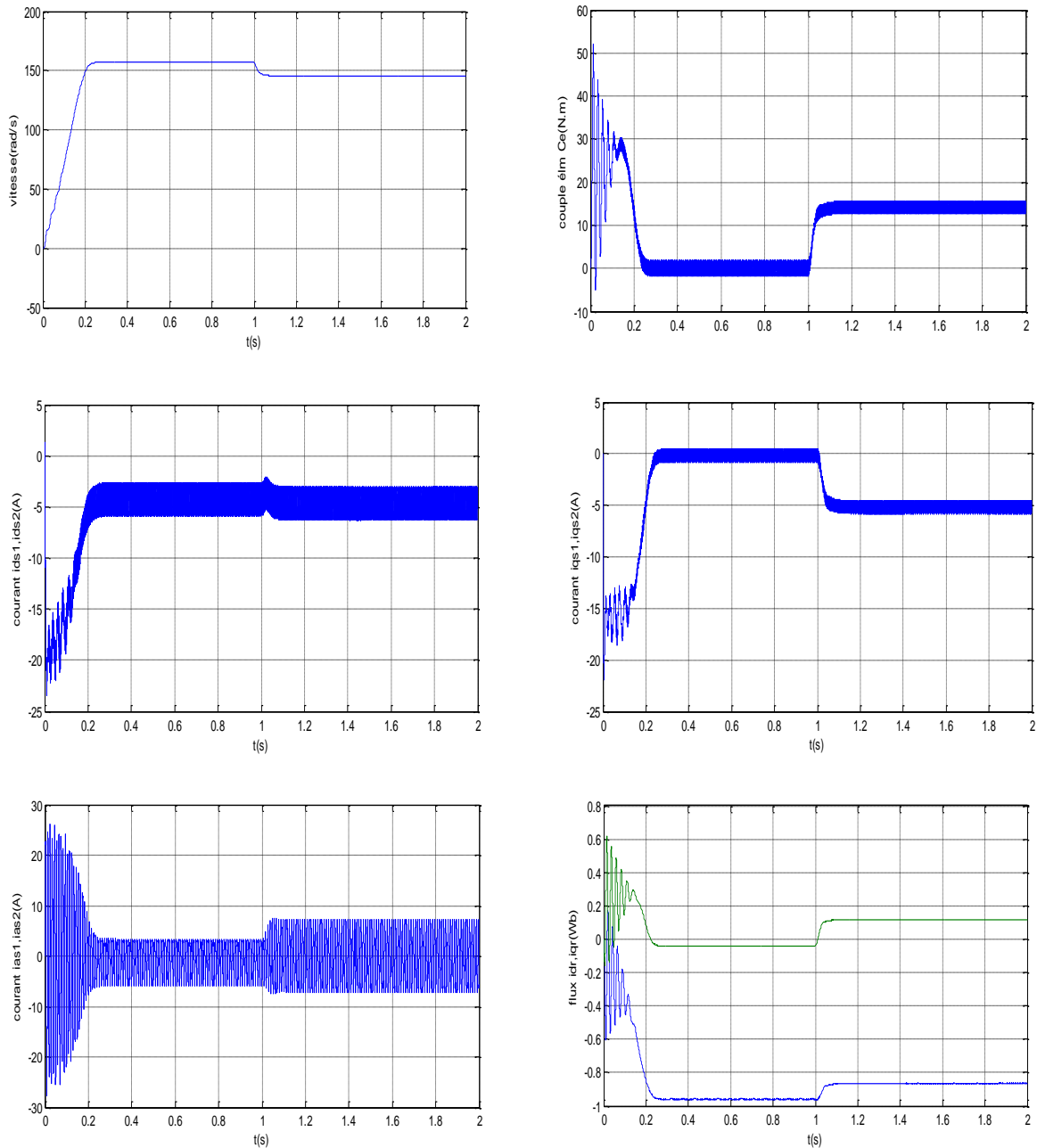


Figure 3.7 : Performances de la conduite de la MASDE alimentée par deux onduleurs à troisniveaux commandés par la stratégie triangulo – sinusoïdale à deux porteuses bipolaires on charge

3.8 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons étudié la modélisation de la machine asynchrone double étoile en vue d'une alimentation par convertisseur statiques. Cette modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique de cette machine dont la complexité a été réduite moyennant un certain nombre d'hypothèses simplificatrices.

Le modèle de la machine asynchrone double étoile est un système à dix équations différentielles dont les coefficients sont des fonctions périodiques du temps. Afin de simplifier ce modèle, nous avons utilisé la transformation de PARK. Ainsi, le système d'état de la machine a été réduit de dix à sept équations que nous avons validé à travers une simulation numérique.

Enfin, l'analyse des performances du système a été réalisée, en se concentrant sur des aspects tels que la régulation de vitesse, le couple de démarrage, la qualité de l'alimentation électrique et l'efficacité énergétique. Cette analyse a permis de mieux comprendre les performances du système, d'identifier ses limites de fonctionnement et de proposer des améliorations potentielles.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Nous avons commencé par la présentation de la généralité sur les onduleurs, différents types monophasés et triphasés, ainsi que leurs applications, principe de fonctionnement et une description des principales topologies des convertisseurs multiniveau avec leurs avantages et inconvénients. Ces topologies comprennent principalement la technique des onduleurs NPC à potentiels distribués.

les onduleurs à trois niveaux NPC sont une solution efficace pour les besoins en conversion d'énergie électrique. Leur utilisation permet d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique, de réduire les pertes d'énergie et de répondre aux exigences croissantes en matière d'efficacité énergétique. Avec les avancées continues dans la modélisation, la commande et la gestion des onduleurs, on peut s'attendre à une utilisation plus répandue de cette technologie dans un large éventail d'applications.

Grâce à simulation ,il est possible d'optimiser les paramètres de commande de l'onduleur à trois niveaux NPC pour obtenir les meilleures performances de la machine asynchrone double étoile. On peut ajuster les stratégies de MLI, les schémas de commutation, les réglages de régulation, etc., afin d'optimiser l'efficacité énergétique, la stabilité et la réponse dynamique du système.

Bibliographie

Bibliographie

- [1]Violaine Didier, « Les onduleurs des systèmes photovoltaïques», Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances- Août 2007
- [2]M. Pinard, « convertisseurs et électronique de puissance et puissance de commande, description », mise en œuvre Dunode, Paris, ISBN 978-10-049674-7, p116.
- [3]F. Labrique, G. Séguier, R. Bausière, "Les convertisseurs de l'électronique de puissance" Volume 4 : La conversion continu alternatif. Editions LAVOISIER.
- [4]B. Ouahid, "Contribution à l'analyse des onduleurs multi-niveaux", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [5] Martin AIMÉ, " Evaluation et Optimisation de la Bande Passante des convertisseurs Statiques (Application aux Nouvelles Structures Multicellulaires". Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2003.
- [6] N.Celanovic, D.Boroyevich, " A Fast Space Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three Phase Converters ". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 37, March/April 2001.
- [7]K.V. Patil, R.M. Mathur, J. Jiang, S.H. Hosseini, " Distribution System Compensation Using a New Binary Multilevel Voltage Source Inverter ", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, N°2, pp. 459-464, April 1999.
- [8] A,BOUKAROURA , « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche BondGraph », mémoire Magister en Electrotechnique. Université Ferhat Abbas de Sétif, 2009.
- [9] S. Kouro, M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Pou, L. G. Franquelo, Bin Wu, J. Rodriguez, M. A. Pérez, "Recent Advances and Industrial Applications of Multilevel Converters", IEEE Trans. on Ind. Elec, Vol. 57,N°8, pp. 2553-2580, 2010.
- [10] J. Rodriguez, J. S. Lai, et F. Z. Peng, "Multilevel Inverters : A Survey of Topologies, Controls, and Applications", IEEE trans. on Ind. elec, Vol. 49, No. 4, pp. 724-738, August 2002.
- [11] RAKOTOMALALA Tsihoarana Ramaherisoa, « Simulation sur Matlab Simulink des Onduleurs 3 niveaux Application à la régulation de la vitesse du Moteur asynchrone», Mémoire

Bibliographie

en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieure, UNIVERSITE D'ANTANANARIVO ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE DOMAINE : SCIENCE DE L'INGENIEUR, 2019

[12] A. Boukandoul, « Etude et réalisation d'un onduleur multiniveaux a topologie cascade », Mémoire de Magister, Université Abderrahman Mira – Bejaia, Septembre 2013.

[13] L. Delmas, T. A. Meynard, and G. Gateau. Computed pwm for flying capacitors Multicell converters. In Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, volume 2, pages 953–956, Ajaccio, France, 2004.

[14] T. A. Maynard, M. Fadel, and N. Aouda. Modeling of multilevel converters. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 44(3):356 – 364, June 1997.

[15] M. D. Manjrekar, P. Steimer, T. A. Lipo, "Hybrid Multilevel Power Conversion System: A Competitive Solution for High Power Applications", IEEE-IAS Conference, 1999.

[16] A. MOHDEB et A. MEZIANI Abdelmalek , « Etude comparative entre les performances d'un onduleur de tension à deux niveaux et multi- niveaux », MEMOIRE MASTER, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2021

[17] MOHAMED GAAD, « Modélisation et Réalisation d'un Onduleur Triphasé à trois niveaux à Structure NPC Application à la conduite de Machine Asynchrone », Mémoire de Magister EMP, 2000.

[18] J. P. HAUTIER, G. MANESSE, « Utilisation des réseaux de pétri pour l'analyse des systèmes électrotechniques », Technique de l'Ingénieur, traité Génie Electrique, PARIS ,1992 .

[19] FADLI OUAHIBA , « MODELISATION ET COMMANDE NON LINEAIRE DE L'ASSOCIATION : MACHINE SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS – ONDULEUR DE TENSION A TROIS NIVEAUX », Mémoire de Magister , Université de Batna, 2006.

[20] F. Labrique, G. Séguier, R. Bausière, “Les Convertisseurs de L'électronique de Puissance, La Conversion Continu Alternatif“, Tec Doc Paris 1995.

[21] M. Gaad, “Modélisation et Réalisation d'un Onduleur Triphasé à Trois Niveaux à Structure NPC. Application à la Conduite de la Machine Asynchrone“, Mémoire De Magister, EMP 2000.

Bibliographie

- [22] E.M.Berkouk, "Contribution à la Conduite des Machines Asynchrones Monophasée et Triphasées Alimentées par des Convertisseurs Directs et Indirects, Application aux Gradateurs et aux Onduleurs Multiniveaux ", Thèse de Doctorat, CNAM. Paris, 1995.
- [23] K.Ghedamsi, " Etude et Réalisation de Différentes Stratégies MLI de Commande del'Onduleur triphasé à Trois Niveaux", Mémoire De Magister, EMP ,2002.
- [24] O.Bouakaz, "Contribution à l'Analyse des Onduleurs Multiniveaux, Fonctionnement Symétrique et Asymétrique", Mémoire de Magister, Université de Batna, 2005.
- [25] El hadj BOUNADJA , " Commande vectorielle sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone double étoile", Mémoire de Magister , Université Hassiba Benbouali de Chlef ,2008.
- [26] D. Beriber, "Machine asynchrone à double stator alimentée par onduleurs à trois niveaux à structure NPC", Mémoire de Magister, ENP Alger, 2004.
- [27] K. Dahmane, "Contribution à la modélisation et à la commande d'une machine asynchrone double étoile alimentée par convertisseur matricielle", Mémoire de Magister, ENP Alger, 2004.
- [28] D. Hadiouche, "Contribution à l'étude de la machine asynchrone double étoile, modélisation, alimentation et structure", Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy, France, 2000.
- [29] S. Arezki, "Contribution à l'étude et la commande d'une machine asynchrone à double étoile alimentée par onduleurs multiniveaux", Mémoire de Magister, Université Houari Boumediene, Alger, 2005.
- [30] R. Taleb, "Commande vectorielle par réseaux de neurones d'une mas alimentée par un onduleur de tension à trois niveaux", Mémoire de Magister, UHBB Chlef, 2004.
- [31] F. Labrique, "Les convertisseurs de l'électronique de puissance", Edition Lavoisier, Paris, France, 1995.