

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : Electrotechnique Industrielle

Présenté par :

RJEM FETHI

LECHAB ABDELGHANI

Thème :

**Commande d'onduleur Multiniveaux
Asymétrique application à la conduite de la
machine asynchrone double étoile.**

Soutenu publiquement

Le :/09/2020

Soumise au jury composé de :

M ^r KOURAS SID ALI	MCA	Président	UKM Ouargla
M ^r BOUAKAZ OUAHID	MCA	Encadreur/rapporteur	UKM Ouargla
M ^r LAAMYAD TAHAR	MCA	Co-Encadreur	UKM Ouargla
Mr KHELIFA MOUSSA	MCB	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire 2019/2020

Remerciements

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

Dédicaces

C'est avec l'aide et la grâce d'ALLAH que nous avons achevé ce travail, que je dédie : A Ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi

A Ceux qui m'ont aidé du mieux qu'ils pouvaient pour réussir ; ceux qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours périlleux ; ceux qui ont toujours été là dans mes moments de détresse

A Ceux qui n'ont jamais cessé de prier pour moi A très chers papa, A la mémoire de ma mère A ma chère femme, A mes frères et sœurs A toute ma grande famille A Tous mes enseignants A Tous mes amis A Tous ceux et celles dont les noms n'ont pu être cités.

FETHI RJEM

Dédicaces

C'est avec l'aide et la grâce d'ALLAH que nous avons achevé ce travail, que je dédie : A Ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi

A Ceux qui m'ont aidé du mieux qu'ils pouvaient pour réussir ; ceux qui m'ont accompagné tout au long de ce parcours périlleux ; ceux qui ont toujours été là dans mes moments de détresse

A Ceux qui n'ont jamais cessé de prier pour moi A mes chers parents, A mes frères et sœurs A toute ma grande famille A Tous mes enseignants A Tous mes amis A Tous ceux et celles dont les noms n'ont pu être cités.

A.ELGANI LECHHEHAB

Résumé

Ce mémoire traite en particulier la commande d'onduleur asymétrique multi-niveaux appliqué à la machine asynchrone à double étoile (MASDE).

L'idée générale s'articule sur le choix du type d'onduleur (Symétrique / Asymétrique) en pont en H et le nombre de cellules optimal dans un convertisseur (Onduleur).

Aussi, l'objectif étant d'une part, d'obtenir un convertisseur qui présente des performances meilleures en terme de rendement, et d'autre part d'avoir une résolution plus élevée avec le même nombre de cellules.

A l'aide du modèle mathématique de la machine asynchrone à double étoile (MASDE) ainsi que la réalisation d'onduleur multi-niveaux asymétrique et symétrique sur l'outil de simulation Simulink de Matlab, une comparaison entre les deux types de convertisseur a été faite, et qui nous a conduit au choix du convertisseur adéquat pour l'application à la MASDE.

Mots clés : *Onduleur Multiniveaux, Onduleur en pont en H, Onduleur Symétrique, Onduleur Asymétrique.*

Summary

This thesis deals in particular with the control of an asymmetric multi-level inverter applied to the double-star asynchronous machine.

The general idea is based on the choice of the type of inverter (Symmetrical / Asymmetrical) in H-bridge and the optimal number of cells in a converter (Inverter).

Also, the objective being, firstly, to obtain a converter which presents better performance in terms of efficiency, and secondly to have a higher resolution with the same number of cells.

Using the mathematical model of the double star asynchronous machine (MASDE) as well as the realization of asymmetric and symmetrical multi-level inverters on simulation tool (Simulink/Matlab), a comparison between the two types of converter was made, which led us to the choice of the adequate converter for the application to the MASDE.

Keywords: *Multilevel Inverter, H-Bridge Inverter, Symmetric Inverter, Asymmetric Inverter.*

Remerciement	.....	2
Dédicace	.....	3
Résumé	.....	5
Sommaire	.....	6
Liste des figures	.....	9
Liste des tableaux	.....	11
Nomenclatures	.....	12

Sommaire

Introduction générale	.....	11
CHAAPITRE I : Etude et modélisation de la machine asynchrone double étoile MASDE		
I.1.Introduction	.....	19
I.2.Applications de la Machine asynchrone double étoile	.....	19
I.3.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile	.....	20
I.4.Caractéristique des machines multi-phasées	.....	21
I.4.1 Machines multi-phasées de "Type 1"	.....	21
I.4.2. Machines multi-phasées de type 2	.....	21
I.5.Avantage de la MASDE	.....	21
I.5.1.2.Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques	.....	22
I.5.2.Inconvénients de la MASDE	.....	22
I.6.Description de la MASDE	.....	22
I.7.Équations générales de la machine	.....	24
17.1.Équations des tensions	.....	24
I.7.2.1.Énergie magnétique	.....	26
I.7.3.Couple électromagnétique	.....	26
I.8. Equations mécaniques	.....	26
I.9.Hypothèses Simplificatrices	.....	27
I.10.Transformée de Park	.....	27
I.11.1.Référentiel lié au stator « α, β »	.....	29
I.11.2.Référentiel lié au rotor « x, y »	.....	29
I.12.Modèle de Park de la MASDE	.....	29
I.13.Application de la transformation de Park	.....	29
I.13.1.	.....	30

I.13.2. Équations magnétiques :	31
I.13.3.Équation mécanique :	33
I.13.4.Couple électromécanique :	33
I.14.Mise sous forme d'équation d'état :	34
I.15.Résultats de la simulation sur Matlab/Simulink :	36
I.17.Conclusion :	40

CHAPITRE II: Etat de l'art des onduleurs symétrique et asymétrisque

II.1. Introduction :	42
II.2. Principe de fonctionnement l'onduleur multiniveaux :	42
II.3. Intérêt des onduleurs multi-niveaux :	43
II.4. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :	43
II.4.1. Onduleur multi niveaux à diode de bouclage(NPC) :	44
II.4.3.1. Onduleurs en pont (H) classiques :	46
II.4.3.2. Onduleurs multiniveaux en cascade :	47
Avantage :	48
Inconvénients :	48
II.4.4. Onduleurs multi-niveau cascade en pont H :	48
II.5. Avantage des Onduleurs multi-niveaux :	49
II.5.1. Les Avantages technologiques :	50
II.5.2. Les Avantages fonctionnelles pour le convertisseur :	50
II.5.3. Les Avantages fonctionnelles pour les machines tournantes :	50
II.6. Domaines d'applications des onduleurs multi-niveaux :	50
II.7 Propriétés des principales structures :	50
II.7.1 Classification des topologies selon leur alimentation :	50
II.7.2 Nombres de composants nécessaires :	50
II.8 Conclusion	52

CHAPITRE III : ONDULEUR MULTI-NIVEAUX ASYMETRIQUE

III.1. Introduction:	54
III.2. Onduleurs multiniveaux symétriques :	54
III.3. Alimentation des cellules :	54
III.4. Uniformité du pas des onduleurs multiniveaux à cellules en série :	55
III.4.1. Niveaux et pas des onduleurs multiniveaux :	55
III.4.2. Condition d'uniformité du pas :	55
III.4.3. Condition d'uniformité pour 2 cellules :	55

III.4.4. Condition générale d'uniformité :	55
III.5. Onduleur monophasé en pont complet (en H):	56
III.6. Dimensionnement d'un onduleur de type Cascade en pont en H :.....	56
III.6.1. Onduleur à trois niveaux de type Cascade en pont en H :	56
III.6.1.1. Principe de fonctionnement :	57
III.6.2. Modulation de largeur d'impulsion (MLI) :.....	58
III.7. La stratégie de Modulation de largeur d'impulsion (MLI) :.....	58
III.9. Onduleur à cinq niveaux de type Cascade en pont en H :.....	59
II.8. Conduite de la MASDE alimentée par un onduleur à 5 niveaux en pont en H :	60
III.9 . conduite de la machine MASDE par un onduleur à sept(7) niveaux :.....	65
III.10. Comparaison des résultats de simulation des onduleurs étudiés :	69
III.11. Conclusion :	69

CHAPITRE IV : ONDULEUR MULTI-NIVEAUX SYMETRIQUE

IV.1. Introduction :	71
IV.2. Techniques de modulation et dimensionnement :	71
IV.3. Nombre de niveaux atteignables :	72
IV.4. Alimentation des onduleurs multiniveaux asymétriques :	72
IV.5. Variantes d'onduleurs multiniveaux asymétriques :	72
IV.6. Propriétés des principales structures :	73
IV.6.1. Classification des topologies selon leur alimentation :.....	73
IV.6.2. Stratégies de commande des onduleurs multiniveaux :.....	73
IV.6.2.1. Commande par paliers :	73
IV.7. Terminologie des convertisseurs multiniveaux :	74
IV.7.1. Concept de dissymétrie totale :	75
IV.7.2. Concept de dissymétrie partielle :.....	75
IV.7.2. Concept de dissymétrie partielle:.....	75
IV.7.4. Onduleurs multiniveaux asymétrique :.....	75
IV.7.5. Onduleurs multiniveaux à pas uniforme :	75
IV.7.6. Les onduleurs multiniveaux hybrides :	76
IV.7.6.1. Stratégie de modulation :.....	76
IV.7.6.2. Modulation par gradin :	77
IV.7.6.3. Modulation hybride :	77
IV.7.7. Onduleur multiniveaux asymétrique monophasée :	77
IV.7.7.1. Principe de fonctionnement :	78
IV.8. Conduite de la machine MASDE par un onduleur en pont en H à 5 niveaux.....	81

IV.10. Comparaison des résultats de simulation des onduleurs étudiés :.....	87
IV.11. Conclusion :.....	88
V. Conclusion générale et perspectives	89

Listes figures

Chapitre I

Figure (I.1)	Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases	19
Figure (I.2)	Représentation du mode de fonctionnement d'une machine.....	20
Figure (I.3)	Représentation schématique des enroulements de la MASDE.....	23
Figure (I.4)	Représentation du Model de Park de la MASDE	
Figure (I.5)	Schéma Bloc du model de la MASDE sous Matlab/Simulink.....	36
Figure (I.6)	Courbe de courant en système triphasées de la MASDE (Ias1).....	37
Figure (I.7)	Courbe de courant Ids1 et Phids1 en système Biphasées (d,q).....	37
Figure (I.8)	Courbe de courant Ids1 et Phids1 en système Biphasées (d,q).....	38
Figure (I.9)	Courbe du couple Cem.....	38
Figure (I.10)	Courbe de Vitesse Wr.....	38

Chapitre II

Figure (II.1.)	Onduleur à niveaux multiples à : a) deux niveaux. b) à trois niveaux. c) à N niveaux.....	42
Figure (II.2)	Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	43
Figure (II.3)	Onduleur en type NPC à (phase A).....	44
Figure (II.4)	Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant à :(a) trois niveaux ,(b) cinq niveaux.....	45
Figure (II.5)	Structure d'un onduleur H-Bridge classique.....	47
Figure (II.6)	Structure d'un onduleur cascade	47
Figure (II.7)	Onduleur cascade en pont H à Trois niveaux.....	49

Chapitre III :

Figure(III.1)	Schéma d'une branche d'onduleur multiniveau cascadié.....	55
Figure (III.2)	Structure d'un onduleur H-Bridge classique.....	57
Figure : (III.3)	Bloc de Commande Onduleur à 3 Niveaux en pont en H	59
Figure (II.4)	Principe de la Commande MLI à deux porteuses.....	59
Figure (III.5)	Structure monophasée d'un onduleur cascade à deux cellules.....	60
Figure (III.6)	Bloc de Commande MASDE Par Onduleur 5 Niveau en pont en H.....	60
Figure(III.7)	tension composé Uab.....	61
Figure (III.8)	tension composé Ubc.....	61
Figure (III.9)	tension composée Uca.....	61
Figure(III.10)	spectre harmonique de la tension.....	61

Figure(III.11)	tension simple U_{an}	62
Figure(III.12)	tension simple U_{bn}	62
Figure(III.13)	tension simple U_{cn}	62
Figure (III.14)	spectre harmonique de courant.....	62
Figure(III.15)	courant statorique $I_{abc s1}$	63
Figure(III.16)	courant statorique $I_{abc s2}$	63
Figure(III.17)	courant rotorique I_{dr}	63
Figure(III.18)	courant rotorique I_{qr}	63
Figure(III.19)	courant statorique I_{ds1}	63
Figure(III.20)	courant statorique I_{qs1}	63
Figure(III.21)	flux rotorique ϕ_{idr}	64
Figure(III.22)	flux rotorique ϕ_{iqr}	64
Figure(III.23)	courbe de vitesse	64
Figure(III.24)	couple electromagnetique ..	64
Figure (III.25)		

Figure (III.26)	tension composée U_{ab}	64
Figure (III.27)	tension composée U_{bc}	65
Figure(III.28)	tension composée U_{ca}	66
Figure(III.29)	spectre harmonique de tension	66
Figure(III.30)	tension simple U_{an}	66
Figure(III.31)	tension simple U_{bn}	66
Figure(III.32)	tension simple U_{cn}	66
Figure (III.33)	spectre harmonique de courant	67
Figure(III.34)	courant statorique I_{abc}	67
Figure(III.35)	courant statorique $I_{abc s2}$	67
Figure(III.36)	courant rotorique I_{dr}	67
Figure(III.37)	courant rotorique I_{qr}	67
Figure (III.38)	courant statorique i_{ds}	68
Figure(III.39)	courant statorique i_{qs}	68
Figure(III.40)	flux rotorique ϕ_{idr}	68
Figure (III.41)	flux rotorique ϕ_{iqr}	68
Figure (III.42)	courbe de vitesse	68
Figure (III.43)	couple électromagnétique	68

CHAPITRE IV :

Figure (IV.1)	Schéma de la structure asymétrique	73
Figure.(IV.2).	Forme d'onde multiniveau (7niveaux) générée par une commande par paliers	74
Figure (IV .3)	Onduleur asymétrique en pont H complet en cascade.....	74

Figure(IV.4)	Exemple Sortie onduleur asymétriques à 7 niveaux	76
Figure (IV-5)	Structure monophasée d'un onduleur cascade à deux cellules	78
Figure(IV.6)	Sortie onduleur aymétrique à 5 niveaux	79
Figure (IV.7)	Bloc de simulation Onduleur asymétrique 5 niveaux associer à la MASDE	79
Figure (IV.8)	spectre harmonique de tension	81
Figure(IV.9)	THD du courant.....	81
Figure(IV.10)	spectre courant statorique Ias1	82
Figure(IV.11)	Courant rotorique	82
Figure(IV.12)	Courant rotorique Idr.....	82
Figure(IV.13)	courant statorique Iabc2.....	82
Figure(IV.14)	Couple électromagnétique	83
Figure (IV.15)	Bloc de simulation Onduleur asymétrique 7 niveaux associer à la MASDE.....	83
figure(IV.16)	tension composé Uca	84
figure(IV.17)	tension composé Ubc	84
Figure(IV.18)	tension simple Uan	84
Figure (IV.19)	tension simple Uan	84
Figure (IV.20)	tensions Vcn	85
Figure(IV.21)	spectre harmonique tension	85
Figure(IV.22)	courant Iabc s1	85
Figure (IV.23)	courant Iabc s2	85
Figure (IV.24)	courant rotorique Idr	85
Figure (IV.25)	courant rotorique Iqr	85
Figure(IV.26)	courant statorique Ids1	86
Figure(IV.27)	courant statorique Iqs1	86
Figure(IV.28)	flux rotorique ϕ Idr	86
Figure(IV.29)	flux rotorique Iqr	86
Figure(IV.30)	flux rotorique Iqs	86
Figure (IV.31)	courbe de vitesse	87
Figure (IV.32)	courbe de couple électromagnétique	87
figure(IV.33)	THD courant	87

LISTES DES TABLEAUX :

Tableau II.1 : Nombres de composants nécessaires pour la topologie à trois niveaux	51
Tableau II.2: Nombres de composants nécessaires pour la topologie à cinq niveaux	51
Tableau II.3 : Nombres de composants nécessaires pour la topologie à sept niveaux.....	51
Tableau II.4 : Nombres de composants nécessaires pour la topologie à neuf niveaux.....	51

Tableau II.5 Nombres de composants nécessaires pour la topologie à n niveaux	52
Tableau (III-1) : États possibles de l'onduleur Cascade à 3 niveaux.	58
Tableau (III-2) : Facteurs de distorsion de chaque type d'onduleur.	69
Tableau(IV.1) Première possibilité d'alimentation des deux cellules à ponts complets (5 niveaux)..	78
Tableau(IV.2): Deuxième possibilité d'alimentation des deux cellules à ponts	80
Tableau(IV.3):Troisième possibilité d'alimentation des deux cellules à ponts	80

Nomenclatures

Machine asynchrone

F	la fréquence des courants statoriques
ω_S	vitesse de synchronisme
ω_g	vitesse de glissement
ω_r	vitesse de rotor
$As1, Bs1, Cs1$	Les phases statoriques de la première étoile
$As2, Bs2, Cs2$	les phases de la deuxième étoile
$Ar, Br, Cr.$	les phases rotoriques
$\omega_m :$	la vitesse mécanique du rotor
$\theta_m :$	la position initiale du rotor par rapport au l'étoile 1.
θ_2	la position du rotor par rapport à l'étoile 2
g	glissement du rotor
$R_{as1}=R_{bs1}=R_{cs1}=R_{s1}$	Résistance d'une phase du 1er stator.
$R_{as2}=R_{bs2}=R_{cs2}=R_{s2}$	Résistance d'une phase du 2ème stator.
$R_{ar}=R_{br}=R_{cr}=R_r:$	Résistance d'une phase du rotor.
$[L_{s1,s1}] :$	Matrice inductance de l'étoile 1.
$[L_{s2,s2}] :$	Matrice inductance de l'étoile 2.
$[L_r, r] :$	Matrice inductance de rotor.
$[L_{s1, s2}] :$	Matrice inductance mutuelle entre étoile 1 et étoile 2.
$[L_{s1, r}] :$	Matrice inductance mutuelle entre étoile 1 et rotor.
$[L_{s2, s1}] :$	Matrice inductance mutuelle entre étoile 2 et étoile 1.

$[L_{s2, r}] :$	Matrice inductance mutuelle entre étoile 2 et rotor.
$[L_{r, s1}] :$	Matrice inductance mutuelle entre rotor et étoile 1.
$[L_{r, s2}]$	Matrice inductance mutuelle entre rotor et étoile 2 .
$L_{s1}=L_{bs1}=L_{cs1}=L_{s1}$	Inductance propre du 1er stator.
$L_{s2}=L_{bs2}=L_{cs2}=L_{s2}$	Inductance propre du 2eme stator.
$L_{ar}=L_{br}=L_{cr}=L_r$	Inductance propre du rotor.
L_{ms}	la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle statorique.
L_{mr}	la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle rotorique.
L_{sr}	la valeur maximale des coefficients d'inductance mutuelle entre un stator et le rotor
J	Moment d'inertie.
Ω	Vitesse de rotation rotorique de la machine.
C_{em}	Couple électromagnétique.
C_r	Couple résistant (couple de charge).
K_f	Coefficient de frottement.
P	nombre de pair de pole
θ_m	Angle magnétique.
θ_e	Angle électrique
G_{abc}	grandeurs triphasées équilibrées.
G_{dq0}	grandeurs biphasées dans le repère (d, q).
$[P(\theta_{s1})]$	Matrice de transformation du premier enroulement statorique (étoile 1).
$[P(\theta_{s2})]$	Matrice de transformation du deuxième enroulement statorique (étoile 2).
$L_{s1}+L_m$	inductance propre cyclique du stator 1.
$L_{s2}+L_m$	inductance propre cyclique du stator 2.
L_r+L_m	inductance propre cyclique du rotor.

$[P(\theta_r)]$	Matrice de transformation d'enroulement rotorique.
α, β	axes lié au stator
x, y	axes lié au rotor
d, q	axes lié au champ tournant
$L_{s1}+L_m$	inductance propre cyclique du stator 1.
$L_{s2}+L_m$	inductance propre cyclique du stator 2.
L_r+L_m	inductance propre cyclique du rotor.
A	matrice d'évolution du système.
X	vecteur d'état.
B	vecteur de commande.
U	vecteur d'entrée.
C_r	couple résistant.

ONDULEURS

NPC	Neutral Point Clamped
FC	Flying Capacitor
H	Pont H (H-bridge)
k	le nombre d'étages ou de cellules
b	le nombre de branches, 2 en monophasés, 3 en triphasé,
T	le nombre de transistors,
D	le nombre de diodes,
C	le nombre de condensateurs,
S	Nombre de source continue
DC	Source continue
AC	source alternatif
k_a	nombre commutateurs principales
V_1	Première source de tension d'entrée DC
V_2	Deuxième source de tension d'entrée DC
E	La tension
α_i	Angles de commutations

MLI	Modulation de Largeur d'Impulsions
V_a, V_b, V_c	Tensions des références
n	le nombre de niveaux de tension obtenus,
D_c	le nombre des diodes clampées,
ΔU_k	Le pas et de niveaux de kième cellule
N_k	Le nombre de niveaux de kième cellule
$U_{i,1}$	Le pas de l'onduleur résultant
$U_{i,k}$	La tension d'entrée de la kième cellule
E_j	Tension continue
N	Numéro de niveaux
K	Nombre de pont complet
λ_j	Facteur de dissymétrie totale de la cellule partielle de rang j
U_{dj}	Tension continue alimentant la cellule partielle de rang j
U_e	Tension continue équivalente que peut générer un convertisseur
multiniveau	
δ	Facteur de dissymétrie partielle entre deux cellules partielles
consécutives	
V_p	Porteuse triangulaire
$f_{\text{réf}}$	Fréquence de la tension de référence
f_p	Fréquence de la porteuse triangulaire
M	Indice de modulation
R	Taux de modulation
U_{ab}, U_{bc} et U_{ca}	Les tensions composées aux bornes de la machine
$V_{\text{réf}} (V)$	Amplitude de la tension de référence.
W_r	Vitesse rotorique
C_e	Couple électromagnétique
THD	Taux de distorsion harmonique
$U_{1'}$	Valeur efficace du fondamental de la tension
$U_{n'}$	Valeur efficace de la tension harmonique de rang n (nième
tension harmonique)	
U_{eff}	Valeur efficace de la tension de sortie

Introduction Générale :

Le concept de la machine asynchrone d'induction a environ 120 ans. Depuis, cette machine s'est imposée dans l'industrie. C'est le moteur le plus répandu.

Relié au réseau électrique à fréquence fixe, il permet la réalisation de la majorité des entraînements à vitesse constante, cela dans une très large gamme de puissance. On devrait plutôt dire à vitesse quasi constante, car ce moteur présente le gros intérêt, lorsqu'on lui demande un effort supplémentaire, de le fournir, mais en glissant c'est-à-dire en diminuant légèrement sa vitesse (fonctionnement asynchrone).

C'est un moteur facile à construire, économique ... On a donc pensé à lui pour la vitesse variable. Il y a quelques dizaines d'années, les solutions techniques de l'époque permirent d'obtenir une variation de vitesse en faisant d'avantage glisser le moteur. Actuellement ce sont les alimentations électroniques de puissance à fréquence variable qui sont amplement utilisées pour obtenir cette variation de vitesse. Certes au prix d'une certaine complexité des alimentations et des commandes associées. [1]

Depuis les premières ères de l'industrialisation, la commande des machines électriques à des vitesses variables présentait un défi majeur pour les chercheurs. Car les entraînements électriques exigent de plus en plus des hautes performances, une fiabilité durable, et un coût réduit.

Au 19^{ème} siècle, ce problème a été résolu avec l'avènement des moteurs à courant continu, dont on peut modifier la vitesse de rotation de zéro 0, à la vitesse maximale, et ceci en agissant sur la tension d'induit tout en gardant le flux d'induction constant. Cependant, la présence du système balais collecteur les pénalise : ces machines ne peuvent servir ni dans le domaine des grandes puissances, ni en milieux corrosifs, s'y ajoute aussi l'entretien que nécessite le collecteur.

Ces contraintes ont donc orienté la recherche dans le domaine de la vitesse variable c'est dire vers les machines à courant alternatif, et plus particulièrement vers les machines asynchrones.

Les machines asynchrones triphasées sont les moteurs employés le plus fréquemment dans l'industrie. Ils possèdent en effet plusieurs avantages : simplicité, robustesse, prix peu élevé et entretien facile. [2]

Les machines asynchrones triphasées sont aujourd'hui un standard pour les entraînements électriques dans l'industrie, où elles offrent des bonnes performances. Pour ces raisons elles

L'une des machines multi-phasés que nous allons l'étudier dans ce travail, est la Machine Asynchrone Double Etoile MASDE (commandée par onduleur asymétrique multi-niveaux).
[3]

Le concept d'utilisation des onduleurs à plusieurs niveaux de tensions a été breveté par un chercheur du MIT il y a une trentaine d'années Les convertisseurs multiniveaux, avec des topologies hybrides, présentent des options maintenant largement approuvées.

Ces convertisseurs sont dits multiniveaux, car ils génèrent des tensions formées de plusieurs niveaux (généralement plus de deux). Parmi les onduleurs multiniveaux, les onduleurs symétriques sont composés de cellules identiques dont la topologie est généralement le pont en H. Au contraire, les convertisseurs multiniveaux asymétriques et aussi appelé hybride, traités dans ce mémoire, combinent des cellules haute tension composées d'interrupteurs présentant peu de pertes par conduction avec des cellules basse tension composées d'interrupteurs présentant peu de pertes par commutation. Le rôle des cellules est distinct, l'objectif étant d'une part d'obtenir un convertisseur présentant globalement de meilleures performances, en termes de rendement, et d'autre part d'obtenir une résolution plus élevée avec le même nombre de cellules.

Le but général du présent travail est de démontrer qu'avec la topologie hybride, il est possible d'augmenter le nombre de niveaux par rapport à un convertisseur présentant le même nombre de cellules symétrique et même de diminuer le taux de distorsion harmonique, et pour le démontrer un contrôle de ces paramètres sera réalisé, comme exemple d'application sur un ensemble onduleur - machine asynchrone.

Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le chapitre I Etude et modélisation de la machine asynchrone double étoile.

Le chapitre : II Etat de l'art des onduleurs multiniveaux.

Le chapitre : III sera consacré aux Onduleur multiniveaux Symétrique et résultat de simulations

Et enfin LE chapitre IV : sera dédié aux Onduleur multiniveaux Asymétrique et résultat de simulations.

Chapitre I : ETUDE ET MODELISATION DE LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ETOILE "MASDE"

I.1.Introduction :

Les machines asynchrones triphasées sont aujourd'hui un standard pour les entraînements électriques dans l'industrie, où elles offrent des bonnes performances tel que la fiabilité, la robustesse, la simplicité de construction, et le coût peu élevé d'entretien. Pour ces raisons elles ont remplacées les machines à courant continu. Néanmoins cette machine reste limitée en puissance.

La croissance de la consommation d'énergie électrique et les applications électriques de forte puissance, ont conduit à utiliser les machines multi-phasées qui sont apparues dans les années 1920.

Dans ce chapitre nous allons présenter les machines multi-phasés, en particulier la machine asynchrone à double étoile représentée par abréviation MASDE tout au long de ce travail.

Nous évoquerons aussi leurs champs et domaines d'application, les avantages et inconvénients ainsi que les types existants des machines multi-phasées et leurs caractéristiques. [4]

I.2.Applications de la Machine asynchrone double étoile :

Les machines asynchrone double étoile (MASDE) sont utilisées beaucoup plus dans les applications de puissances élevées, parmi ces applications par exemple les alternateurs synchrones pour générer une puissance élevée par rapport aux alternateurs conventionnels. Ils sont omni présents dans les stations de pompage, les ventilateurs, les compresseurs, les navires, les moulins du ciment, etc.

Une autre application ci-dessous représentée, concerne l'utilisation de la MASDE dans les systèmes de production de l'énergie à éolienne (voir la Fig. I.1) [5]

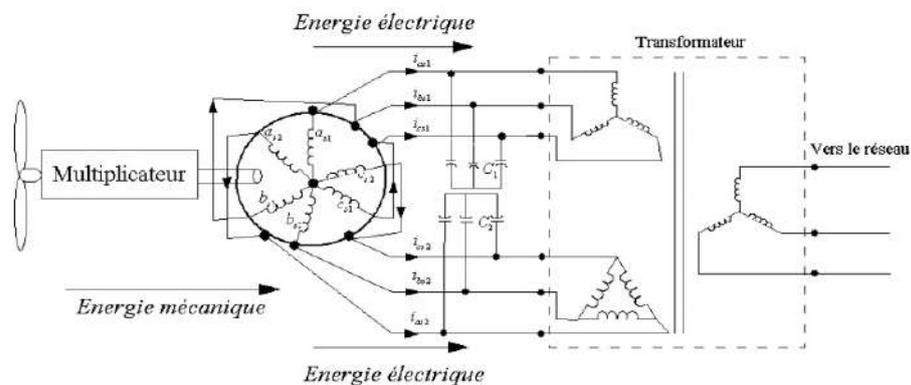


Figure I.1 : Exemple d'application d'une machine asynchrone de 6 phases

I.3.Principe de fonctionnement de la machine asynchrone double étoile :

Les courants statoriques de la machine asynchrone double Etoile créent un champ magnétique tournant dans les deux stators (l'étoile 1 alimenté par des courants triphasés et l'étoile 2 alimenté par les mêmes courants triphasés mais décalé d'un angle $\alpha=30^\circ$).

La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques f c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence de l'alimentation électrique, la vitesse de ce champ tournant est appelée vitesse de synchronisme. Elle définit comme suite [9].

$$\omega_s = \frac{2\pi N_s}{60} \quad [ad/s] \quad (I. 1)$$

Ces deux Champs tournants produits par les deux enroulements statoriques vont introduire des courants dans les barres du rotor. Ainsi générant des forces électromotrices qui feront tourner le rotor à une vitesse inférieure à celui du synchronisme ($\omega_r < \omega_s$), 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.

La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est dite vitesse de glissement égale à [6] :

$$\omega_g = \omega_s - \omega_r \quad (I. 2)$$

On dira alors que ces deux champs glissent par rapport au rotor et on définit ce glissement par le rapport : [7]

$$g = \frac{\omega_g}{\omega_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (I. 3)$$

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

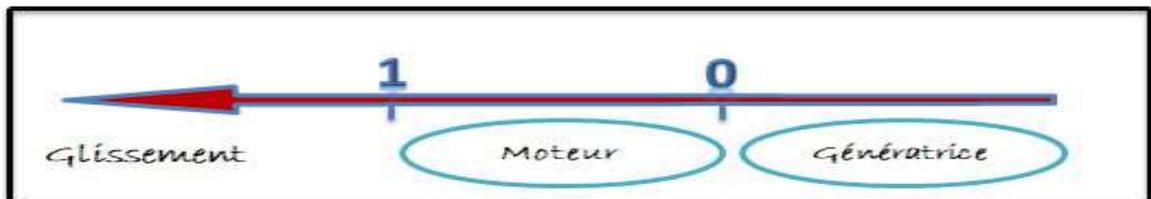


Figure I.2 : Représentation du mode de fonctionnement d'une machine

I.4.Caractéristique des machines multi-phasées :

Comme toutes autres machines électriques, la machines multi-phasées possède un stator et rotor, le stator lui est constitué de deux bobinages en étoile décalé entre eux par un angle de 30°.

Nous distinguons deux types de machines Multi-phasées :

I.4.1 Machines multi-phasées de "Type 1"

Les machines multi-phasées de "Type 1" sont des machines dont le nombre de phases statoriques q est un multiple de trois, de sorte que l'on puisse les grouper en étoiles triphasées : $q=3\Omega$ ($\Omega=1, 2, 3,4\dots$). (Ω est le nombre d'étoile).

Pour un nombre donné de phases, il peut y avoir plusieurs configurations possibles suivant le décalage angulaire α qui correspond au décalage entre étoiles.

En effet, une machine double étoile ($q = 6$) dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \frac{\pi}{6}$ a des caractéristiques différentes de celles d'une machine dont les étoiles sont décalées de $\alpha = \frac{\pi}{3}$.

Pour différencier les configurations possibles, on peut introduire un "nombre équivalent de phases", noté q_α , dont la définition est la suivante : [8]

$$q_\alpha = \frac{\pi}{\alpha} \quad (I.4)$$

Voire le tableau 1 : exemple de configuration de machine multi-phasées type1

I.4.2. Machines multi-phasées de type 2 :

Dans ce type de machines, le nombre de phases statoriques est un nombre impair. Si α représente le décalage angulaire entre deux bobines adjacentes, les phases sont alors régulièrement décalée de [9] :

$$\alpha = \frac{\pi}{q} \quad (I.5)$$

I.5.Avantage de la MASDE :

La MASDE présente plusieurs avantages par rapport aux machines conventionnelles triphasées:

I.5.1.Avantages :

I.5.1.1.Segmentation de puissance : Par l'augmentation du nombre de phases, la puissance est automatiquement augmentée. L'une des solutions pour réduire les courants de phases sans réduire les tensions d'alimentations, est d'augmenter le nombre de phases statoriques. La puissance totale demandée par une machine est alors réduite dans chaque phase. Avec cette

puissance, on peut alimenter la machine par un onduleur dont les composants semi-conducteurs de calibre inférieur peuvent fonctionner à des fréquences de commutation plus élevées. Cela permet de minimiser les ondulations des courants et du couple. La segmentation de puissance est l'avantage principal des machines multi-phasées, que l'on met le plus en avant de nos jours.

I.5.1.2. Minimisation des ondulations du couple et des pertes rotoriques :

Les machines polyphasées permettent la réduction des ondulations de couple (période et amplitude) parce que les harmoniques cinq et sept sont naturellement minimisés dans ces machines [8]. Pratiquement, une machine multi-phasées a des pertes rotoriques moindre qu'une machine triphasée.

I.5.1.3. Fiabilité :

Le régime dégradé (par la perte de l'une des phases par la défection des éléments de semi-conducteurs dont il est constitué l'onduleur alimentant la machine) engendre une perte de contrôle de la machine, ainsi que des ondulations du couple de fortes amplitudes. L'une des solutions pour pouvoir commandé la machine dans ce régime consiste à relier le neutre de la machine au point milieu de la source de tension continue. Dans les machines multi-phasées, cette contrainte peut être évitée tant qu'au moins trois phases restent actives, on peut avoir jusqu'à $(n_{ph} - 3)$ phases ouvertes sans que la solution concerne la connexion du neutre au point milieu de la source de tension continue. Plus le nombre de phases augmente, plus on a de degrés de liberté pour commander la machine.

I.5.2. Inconvénients de la MASDE :

L'inconvénient majeur des machines double étoile est l'apparition de courants harmoniques de circulation lors d'une alimentation par onduleur de tension. [12]

Cependant, la MASDE présente d'autres inconvénients tels que : Le nombre de semi-conducteurs augmente avec le nombre de phases, ce qui peut éventuellement augmenter le coût de l'ensemble convertisseur- machine ; La multiplication du nombre des semi-conducteurs avec la structure dynamique est fortement non linéaire et l'existence d'un fort couplage entre le couple et le flux, ce qui complique évidemment sa commande;

I.6. Description de la MASDE :

La machine asynchrone double étoile comporte dans le stator deux systèmes de bobinages triphasés décalés entre eux d'un angle électrique α (dans notre cas on prend $\alpha = 30^\circ$) et un rotor selon le cas, bobinée ou à cage d'écureuil.

Pour simplifier l'étude, nous considérons les circuits électriques du rotor comme équivalant à un enroulement triphasé en court-circuit.

La figure (I. 3) 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 (stator 1) et par l'indice S2 pour celles relatives à la deuxième étoile (stator 2).

Les phases statoriques 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'étoile 1 (phase $As1$). θ_2 est la position du rotor par rapport à l'étoile 2, ces angles sont définis par les équations suivantes :

$$\theta_r = \omega_m t + \theta_0 \quad (I.6)$$

$$\theta_2 = \theta_m - \alpha \quad (I.7)$$

Les deux enroulements statoriques sont alimentés chacun par un système triphasé équilibré des courants entraînant la création d'un champ tournant dans le long de l'entrefer.

Le rapport $g = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$: est appelé glissement du rotor par rapport au champ tournant du stator.

La pulsation des courants rotoriques est alors : $\omega_g = g \cdot \omega_s$

La relation de la vitesse mécanique du rotor ω_m en fonction de la vitesse de synchronisme ω_s et du nombre de paires de pôles p de la machine est exprimée comme suit : $\omega_m = (1 - g) \frac{\omega_s}{p}$

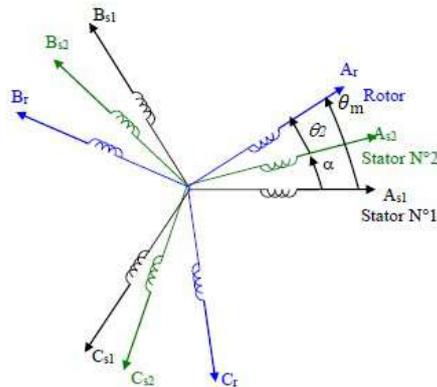


Figure I.3 : Représentation schématique des enroulements de la MASDE. [13]

I.7.Équations générales de la machine :

17.1.Équations des tensions :

Par application de la loi de Faraday à l'un de ses enroulements statorique et rotorique de la machine, la loi des mailles s'exprime par la relation : [15]

$$V=RI + \frac{d\phi}{dx} \quad (I.8)$$

On déduit pour l'ensemble des phases, statorique.

$$\text{Pour l'Etoile 1: } \begin{cases} V_{as1} = R_{as1} * I_{as1} + \frac{d}{dx} \phi_{as1} \\ V_{bs1} = R_{bs1} * I_{bs1} + \frac{d}{dx} \phi_{bs1} \\ V_{cs1} = R_{cs1} * I_{cs1} + \frac{d}{dx} \phi_{cs1} \end{cases} \quad (I.9)$$

$$R_a=R_b=R_c$$

$$\text{Pour l'Etoile 2: } \begin{cases} V_{as2} = R_{s2} * I_{as2} + \frac{d}{dx} \phi_{as2} \\ V_{bs2} = R_{s2} * I_{bs2} + \frac{d}{dx} \phi_{bs2} \\ V_{cs2} = R_{s2} * I_{cs2} + \frac{d}{dx} \phi_{cs2} \end{cases} \quad (I.10)$$

$$\text{Pour le Rotor } \begin{cases} 0 = R_{ar} * I_{ar} + \frac{d}{dx} \phi_{ar} \\ 0 = R_{br} * I_{br} + \frac{d}{dx} \phi_{br} \\ 0 = R_{cr} * I_{cr} + \frac{d}{dx} \phi_{cr} \end{cases} \quad (I.11)$$

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

Sous forme matricielle on a:

$$\text{Pour l'Etoile 1: } [V_{s1}] = [R_{s1}] * [I_{s1}] + \frac{d}{dx} [\phi_{s1}] \quad (I.12)$$

$$\text{Pour l'Etoile 2: } [V_{s2}] = [R_{s2}] * [I_{s2}] + \frac{d}{dx} [\phi_{s2}] \quad (I.13)$$

$$\text{Pour le Rotor: } 0 = [R_r] * [I_r] + \frac{d}{dx} [\phi_r] \quad (I.14)$$

$$[R_{s1}] = \begin{vmatrix} R_{as1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs1} \end{vmatrix} ; [R_{s2}] = \begin{vmatrix} R_{as2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{bs2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cs2} \end{vmatrix} ; [R_r] = \begin{vmatrix} R_{ar} & 0 & 0 \\ 0 & R_{br} & 0 \\ 0 & 0 & R_{cr} \end{vmatrix}$$

Les vecteurs de tension, courants et flux totaux statoriques:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_{as1} \\ V_{bs1} \\ V_{cs1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_{as1} \\ I_{bs1} \\ I_{cs1} \end{bmatrix} ; & \begin{bmatrix} \phi_{as1} \\ \phi_{bs1} \\ \phi_{cs1} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V_{as2} \\ V_{bs2} \\ V_{cs2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I_{as2} \\ I_{bs2} \\ I_{cs2} \end{bmatrix} ; & \begin{bmatrix} \phi_{as2} \\ \phi_{bs2} \\ \phi_{cs2} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

1.7.2. Équations magnétiques de la MASDE :

Les flux sont exprimés en fonction des courants par [16] :

$$\begin{bmatrix} \phi_{abc S1} \\ \phi_{abc S2} \\ \phi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_{S1,S1}] & [L_{S1,S2}] & [L_{S1,r}] \\ [L_{S2,S1}] & [L_{S2,S2}] & [L_{S2,r}] \\ [L_{r,S1}] & [L_{r,S2}] & [L_{r,r}] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_{abcS1} \\ I_{abcS2} \\ I_r \end{bmatrix} \quad (I.16)$$

Le développement de la matrice inductance en tenant compte des hypothèses simplificatrices citées précédemment nous permet d'écrire :

$$[L_{S1,S1}] = \begin{bmatrix} (L_{as1} + L_{ms}) & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & (L_{bs1} + L_{ms}) & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & (L_{cs1} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (I.17)$$

$$[L_{S2,S2}] = \begin{bmatrix} (L_{as2} + L_{ms}) & -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & (L_{bs2} + L_{ms}) & -\frac{L_{ms}}{2} \\ -\frac{L_{ms}}{2} & -\frac{L_{ms}}{2} & (L_{cs2} + L_{ms}) \end{bmatrix} \quad (I.18)$$

$$[L_{r,r}] = \begin{pmatrix} (L_{as2} + L_{ms}) & -\frac{L_{mr}}{2} & -\frac{L_{mr}}{2} \\ -\frac{L_{mr}}{2} & (L_{bs2} + L_{ms}) & -\frac{L_{mr}}{2} \\ -\frac{L_{mr}}{2} & -\frac{L_{mr}}{2} & (L_{cs2} + L_{ms}) \end{pmatrix} \quad (I.19)$$

$$[L_{S1,S2}] = L_{ms} \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 4\pi/3) \\ \cos(\alpha - 4\pi/3) & \cos(\alpha) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \quad (I.20)$$

$$[L_{S1,r}] = L_{Sr} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (I.21)$$

$$[L_{S1,r}] = L_{Sr} \begin{pmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha - 4\pi/3) \\ \cos(\theta - \alpha - 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha) & \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) \\ \cos(\theta - \alpha + 2\pi/3) & \cos(\theta - \alpha - 4\pi/3) & \cos(\theta - \alpha) \end{pmatrix} \quad (I.22)$$

$$[L_{S2}, s1] = [L_{S1}, s2]^t ; \quad [L_r, s1] = [L_{S1}, r]^t ; \quad [L_r, s2] = [L_{S2}, r]^t$$

I.7.2.1. Énergie magnétique :

Elle peut être calculée à partir de l'expression : [17]

$$W_{mag} = \frac{1}{2} \cdot \left([I_{S1}]^t \cdot [\Phi_{S1}] + [I_{S2}]^t \cdot [\Phi_{S2}] + [I_r]^t \cdot [\Phi_r] \right) \quad (I.23)$$

I.7.3. Couple électromagnétique :

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

$$C_{em} = \frac{d}{d\theta_m} W_{mag} = P \cdot \frac{d}{d\theta_e} W_{mag} \quad (I.24)$$

$$C_{em} = \frac{P}{2} \cdot [i_{S1}]^t \cdot \frac{d}{d\theta_r} [L_{S1,r}] [i_r]^t + [i_{S2}]^t \frac{d}{d\theta_r} [L_{S2}] \cdot [i_r]^t \quad (I.25)$$

I.8. Equations mécaniques :

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - Cr - K_f \cdot \Omega \quad (I.26)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} \quad (I.27)$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par: [18]

$$C_{em} = \frac{P}{2} \cdot \left([i_{abcS1}] \cdot \frac{d}{d\theta} [L_{S1,r}] [i_{abcr}]^t + [i_{abcS2}] \cdot \frac{d}{d\theta} [L_{s2}] \cdot [i_{abcr}]^t \right) \quad (I.28)$$

I.9.Hypothèses Simplificatrices :

La machine asynchrone à 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, et comme nous l'avons déjà soulevé, il est alors nécessaire d'adopter certaines hypothèses simplificatrices, [14]

On considère les hypothèses suivantes :

- Le circuit magnétique est non saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaire des courants.
- Les pertes (par hystérésis et courant de Foucault) sont négligées. les forces magnétomotrices créés par chacun des phases des deux armatures sont à répartition sinusoïdale.
- L'effet de la variation de la température sur les résistances statorique et rotorique est négligeable.
- La parfaite symétrie de la machine tant magnétique qu'électrique.
- L'entrefer est constant.
- Effet de peau négligé.

I.10.Transformée de Park :

Afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système on utilise des transformations orthogonales. On obtient donc des équations simples par des changements de variables appropriés. Parmi les transformations les plus utilisées, on a celle de Park.

La transformée de Park, souvent confondue avec la transformée dq0, est un outil mathématique utilisé en électrotechnique, et en particulier pour la commande vectorielle, afin de modéliser un système triphasé grâce à un modèle diphasé. Il s'agit d'un changement de repère. Les deux premiers axes dans la nouvelle base sont traditionnellement nommés d, q.

Les grandeurs transformées sont généralement des courants, des tensions ou des flux.

Dans le cas d'une machine tournante, le repère de Park est fixé au rotor.

La composante homopolaire ne participe pas à cette création de sorte que l'axe homopolaire peut être choisi orthogonal au plan (d, q).

La matrice de Park en générale :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix} \quad (I.29)$$

La matrice inverse de Park

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix} \quad (I.30)$$

La transformation de Park :

$$[G_{dgo}] = [P(\theta)] [G_{abc}] \quad (I.31)$$

$$[G_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} [G_{dgo}] \quad (I.32)$$

La transformation de Park inverse $[G_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} [G_{dgo}]$. Sachant que : $[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$

$$\text{Pour l'étoile 1: } [P(\theta_{s1})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix} \quad (I.33)$$

Pour l'étoile 1:

$$[P(\theta_{s2})] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} \cos(\theta - \alpha) & \cos\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \alpha) & \sin\left(\theta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \alpha + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix} \quad (I.34)$$

Pour le rotor :

$$[P(\theta_r)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{vmatrix} \cos(\theta - \theta_r) & \cos\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta - \theta_r) & \sin\left(\theta - \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{vmatrix} \quad (I.35)$$

I.11.Choix du référentiel :

Pour étudier la théorie des régimes transitoires de la machine asynchrone double étoile, on peut utiliser trois systèmes d'axes de coordonnées du plan d'axes. [19]

Trois types de référentiels sont intéressants en pratique, le choix du référentiel fait selon le problème à étudier. [20]

I.11.1. Référentiel lié au stator « α, β » :

Dans ce référentiel, les axes (α, β) sont immobiles par rapport au stator ($\omega_{\text{coor}} = 0$). Dans ce cas, la phase A_{S1} et α coïncident. Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées et dont l'avantage ne nécessite pas une transformation vers le système réel. L'utilisation de ce système permet d'étudier les régimes de démarrage et de freinage de machine à courant alternatif.

I.11.2. Référentiel lié au rotor « x, y » :

Dans ce référentiel, les axes (x, y) sont immobiles par rapport au rotor tournant à une vitesse ω_s donc ($\omega_{\text{coor}} = \omega_r$).

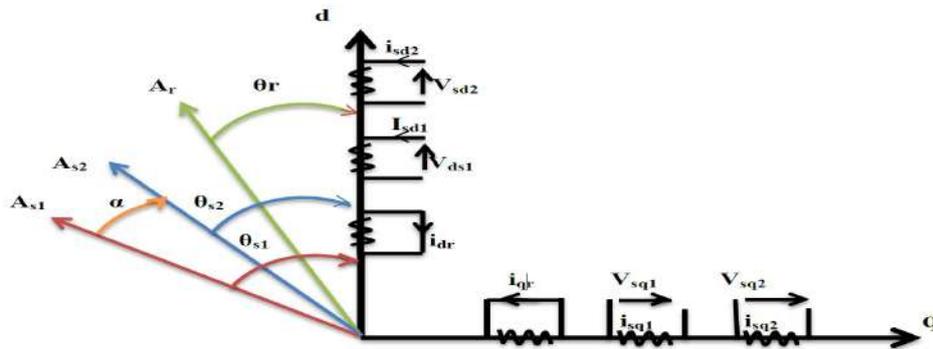
L'utilisation de ce référentiel permet d'étudier les régimes transitoires les machines alternatives synchrone et asynchrone.

I.12.3. Référentiel lié au champ tournant « d, q » :

Dans ce référentiel, les axes (d, q) sont immobiles par rapport au champ tournant créé par les deux étoiles du stator ($\omega_{\text{coor}} = \omega_s$). Ce référentiel est généralement utilisé dans le but pouvoir appliquer une commande. Dans notre travail, nous utilisons ce référentiel.

I.12. Modèle de Park de la MASDE :

La figure (I.4) représente le modèle de Park de la MASDE :



La figure I.4 : Représentation du Model de Park de la MASDE. [21]

I.13. Application de la transformation de Park :

Avec le choix du référentiel lié au champ tournant et appliquant la transformation de Park aux équations précédentes, nous obtenons le système d'équations suivant :

Transformation de Park des tensions :

$$[V_{dq0, S1}] = [P(\theta_{s1})] [V_{s1}]$$

$$[V_{dq0, S2}] = [P(\theta_{s2})] [V_{s2}]$$

(I.36)

Transformation de Park des courants :

$$\begin{aligned}
[I_{dq0, s1}] &= [P(\theta_{s1})] [I_{s1}] \\
[I_{dq0, s2}] &= [P(\theta_{s2})] [I_{s2}] \\
[I_{dq0, r}] &= [P(\theta_r)] [I_r]
\end{aligned} \tag{I.37}$$

Transformation de Park des flux :

$$\begin{aligned}
[\Phi_{dq0, s1}] &= [P(\theta_{s1})] [\Phi_{s1}] \\
[\Phi_{dq0, s2}] &= [P(\theta_{s2})] [\Phi_{s2}] \\
[\Phi_{dq0, r}] &= [P(\theta_r)] [\Phi_r]
\end{aligned} \tag{I.38}$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} V_{dq0, s1} \\ V_{qs1} \\ V_{os1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds1} \\ V_{qs1} \\ V_{os1} \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} I_{dq0, s1} \\ I_{qs1} \\ I_{os1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ds1} \\ I_{qs1} \\ I_{os1} \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \phi_{dq0, s1} \\ \phi_{qs1} \\ \phi_{os1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{ds1} \\ \phi_{qs1} \\ \phi_{os1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_{dq0, s2} \\ V_{qs2} \\ V_{os2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds2} \\ V_{qs2} \\ V_{os2} \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} I_{dq0, s2} \\ I_{qs2} \\ I_{os2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ds2} \\ I_{qs2} \\ I_{os2} \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \phi_{dq0, s2} \\ \phi_{qs2} \\ \phi_{os2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{ds2} \\ \phi_{qs2} \\ \phi_{os2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{dq0, r} \\ I_{qr} \\ I_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dr} \\ I_{qr} \\ I_{or} \end{bmatrix} ; \quad \begin{bmatrix} \phi_r \\ \phi_{qr} \\ \phi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \\ \phi_{or} \end{bmatrix}$$

I.13.1. Équations des tensions :

L'application de la transformée de Park sur le système d'équations (I.12), (I.13) et (I.14) nous donne :

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{bmatrix} V_{ds1} \\ V_{qs1} \\ V_{os1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s1} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s1} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds1} \\ i_{qs1} \\ i_{os1} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{ds1} \\ \phi_{qs1} \\ \phi_{os1} \end{bmatrix} - \frac{d\theta_{s1}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{ds1} \\ \phi_{qs1} \\ \phi_{os1} \end{bmatrix} \tag{I.39}$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{bmatrix} V_{ds2} \\ V_{qs2} \\ V_{0s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s2} & 0 & 0 \\ 0 & R_{s2} & 0 \\ 0 & 0 & R_{s2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds2} \\ i_{qs2} \\ i_{0s2} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{0s2} \end{bmatrix} \frac{d\theta_{s2}}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{0s2} \end{bmatrix} \quad (I.40)$$

Pour le rotor : Le rotor étant en court-circuit :

Var=0, Vbr=0, Vcr=0,

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{0r} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{0r} \end{bmatrix} \frac{d\theta_r}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{0r} \end{bmatrix} \quad (I.41)$$

Avec :

$$\frac{d\theta_{s1}}{dt} = \frac{d\theta_2}{dt} = \frac{d(\theta_{s1}-\alpha)}{dt} = \omega_S ,$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d(\theta_{s1}-\theta)}{dt} = \omega_S - \omega_r = \omega_{gl}$$

ω_{gl} : vitesse de glissement.

Sous forme d'équation :

$$\begin{cases} V_{ds1} = R_{s1} i_{ds1} + \frac{d\Phi_{ds1}}{dt} - \omega_s \Phi_{qs1} \\ V_{qs1} = R_s i_{s1} + \frac{d\Phi_{qs1}}{dt} - \omega_s \Phi_{ds1} \\ V_{ds2} = R_s i_{ds2} + \frac{d\Phi_{ds2}}{dt} - \omega \Phi_{qs2} \\ V_{qs2} = R_s i_{qs2} + \frac{d\Phi_{qs2}}{dt} - \omega \Phi_{ds2} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - \omega \Phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} - \omega \Phi_{dr} \end{cases} \quad (I.40)$$

I.13.2. Équations magnétiques :

La décomposition de l'équation (I.16) donne :

$$\begin{aligned} [\phi_{abc\ S1}] &= [L_{S1,S1}] [I_{abcS1}] + [L_{S1,S2}] [I_{abcS2}] + [L_{S1,r}] [I_r] \\ [\phi_{abc\ S2}] &= [L_{S2,S1}] [I_{abcS1}] + [L_{S2,S2}] [I_{abcS2}] + [L_{S2,r}] [I_r] \\ [\phi_r] &= [L_{r,S1}] [I_{abcS1}] + [L_{r,S2}] [I_{abcS2}] + [L_{r,r}] [I_r] \end{aligned} \quad (I.41)$$

Appliquant la transformation de Park sur le système d'équations (II.38), on obtient :

Pour l'étoile 1 :

$$\begin{aligned} [\phi_{dqo\ S1}] &= [P(\theta_{S1})] [L_{S1}] [P(\theta_{S1})]^{-1} [I_{dqo,S1}] + [P(\theta_{S1})] [L_{S1}] [P(\theta_{S2})]^{-1} [I_{dqo,S2}] + \\ & [P(\theta_{S1})] [L_{S1,r}] [P(\theta_r)]^{-1} [I_{dqo,r}] . \end{aligned} \quad (I.42)$$

Pour l'étoile 2 :

$$\begin{aligned} [\phi_{dqo\ S2}] &= [P(\theta_{S2})] [L_{S2}] [P(\theta_{S1})]^{-1} [I_{dqo,S1}] + [P(\theta_{S2})] [L_{S2}] [P(\theta_{S2})]^{-1} [I_{dqo,S2}] + \\ & [P(\theta_{S2})] [L_{S2,r}] [P(\theta_r)]^{-1} [I_{dqo,r}] \end{aligned} \quad (I.43)$$

Pour le Rotor :

$$\begin{aligned} [\phi_{dqo,r}] &= [P(\theta_r)] [L_r] [P(\theta_{S1})]^{-1} [I_{dqo,S1}] + [P(\theta_r)] [L_r] [P(\theta_{S2})]^{-1} [I_{dqo,S2}] + \\ & [P(\theta_r)] [L_r] [P(\theta_r)]^{-1} [I_{dqo,r}] \end{aligned} \quad (I.44)$$

Donc les équations de flux sont :

$$\begin{aligned} \phi_{ds1} &= L_{s1} I_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{ds1} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{ds2} + \frac{3}{2} L_{sr} I_{dr} \\ \phi_{qs1} &= L_{s1} I_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{qs1} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{qs2} + \frac{3}{2} L_{sr} I_{qr} \\ \phi_{ds2} &= L_{s2} I_{ds2} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{ds2} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{ds1} + \frac{3}{2} L_{sr} I_{dr} \\ \phi_{qs2} &= L_{s2} I_{qs2} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{qs2} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{qs1} + \frac{3}{2} L_{sr} I_{qr} \\ \phi_{dr} &= L_r I_{dr} + \frac{3}{2} L_{mr} I_{dr} + \frac{3}{2} L_{sr} I_{ds1} + \frac{3}{2} L_{sr} I_{ds2} \\ \phi_{qr} &= L_r I_{qr} + \frac{3}{2} L_{mr} I_{qr} + \frac{3}{2} L_{sr} I_{qs1} + \frac{3}{2} L_{sr} I_{qs2} \end{aligned} \quad (I.45)$$

On pose : $\frac{3}{2} L_{mr} = \frac{3}{2} L_{sr} = \frac{3}{2} L_{ms} = L_m$

L_m : inductance mutuelle cyclique entre le stator 1, stator 2 et le rotor.

Donc le système d'équations (I.45) est écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \phi_{ds1} &= L_{s1} I_{ds1} + L_m (I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \phi_{qs1} &= L_{s1} I_{qs1} + L_m (I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \phi_{ds2} &= L_{s2} I_{ds2} + L_m (I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \phi_{qs2} &= L_{s2} I_{qs2} + L_m (I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \\ \phi_{dr} &= L_r I_{dr} + L_m (I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr}) \\ \phi_{qr} &= L_r I_{qr} + L_m (I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \end{aligned} \quad (I.46)$$

I.13.3. Équation mécanique :

La puissance instantanée absorbée par la machine asynchrone double étoile est donnée par l'expression suivante :

$$P = [V_s]^{-1} [I_s] = V_{as1} I_{as1} + V_{bs1} I_{bs1} + V_{cs1} I_{cs1} + V_{as2} I_{as2} + V_{bs2} I_{bs2} + V_{cs2} I_{cs2}$$

Pour calculer l'expression du couple instantané, il est nécessaire de déterminer la puissance instantanée. Et comme la transformation de Park utilisée conserve la puissance instantanée, on peut écrire:

$$P = V_{ds1} I_{ds1} + V_{ds2} I_{ds2} + V_{qs1} I_{qs1} + V_{qs2} I_{qs2} \quad (I.47)$$

En introduisant le système d'équation (I.40) dans l'expression de la puissance instantanée (I.47) on obtient :

$$P = \frac{3}{2} \left\{ \left[\left(R_{s1} i_{ds1} + \frac{d\phi_{ds1}}{dt} - \omega_s \phi_{qs1} \right) (I_{ds1}) \right] + \left[\left(R_{s2} i_{ds2} + \frac{d\phi_{ds2}}{dt} - \omega_s \phi_{qs2} \right) (I_{ds2}) \right] \right\} + \frac{3}{2} \left\{ \left[\left(R_{s1} i_{qs1} + \frac{d\phi_{qs1}}{dt} - \omega_s \phi_{ds1} \right) (I_{qs1}) \right] + \left[\left(R_{s2} i_{qs2} + \frac{d\phi_{qs2}}{dt} - \omega_s \phi_{ds2} \right) (I_{qs2}) \right] \right\} \quad (I.48)$$

$$P = \frac{3}{2} \left[R_{s1} I_{ds1}^2 + R_{s2} I_{ds2}^2 + R_{s1} I_{qs1}^2 + R_{s2} I_{qs2}^2 \right] + \frac{3}{2} \left[\left(\frac{d\phi_{ds1}}{dt} - \omega_s \phi_{qs1} \right) (I_{ds1}) + \left(\frac{d\phi_{ds2}}{dt} - \omega_s \phi_{qs2} \right) (I_{ds2}) + \left(\frac{d\phi_{qs1}}{dt} - \omega_s \phi_{ds1} \right) (I_{qs1}) + \left(\frac{d\phi_{qs2}}{dt} - \omega_s \phi_{ds2} \right) (I_{qs2}) \right] \quad (I.49)$$

On constate que la puissance instantanée développée se compose de trois termes :

- Le premier terme est identifiable aux pertes joules.
- Le second terme correspond à la puissance électromagnétique emmagasinée.
- Le troisième terme représente la puissance électrique transformée en puissance mécanique (les pertes fer sont supposées négligeables).

I.13.4. Couple électromécanique :

$$P_{em} = C_{em} \cdot \Omega_s \quad (I.50)$$

$$P_{em} = \frac{3}{2} \left[\omega_s (\phi_{ds1} I_{qs1} + \phi_{ds2} I_{qs2} - \phi_{qs1} I_{ds1} - \phi_{qs2} I_{ds2}) \right] \quad (I.51)$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \left[\omega_s (\phi_{ds1} I_{qs1} + \phi_{ds2} I_{qs2} - \phi_{qs1} I_{ds1} - \phi_{qs2} I_{ds2}) \right] \quad (I.52)$$

Il est possible d'obtenir d'autres expressions du couple instantané en utilisant les expressions des flux statoriques et en remplaçant (I.37) dans (I.44), on obtient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P L_m [(I_{qs1} + I_{qs2}) I_{dr} + (I_{qs1} + I_{qs2}) I_{qr}] \quad (I.53)$$

Le couple électromagnétique peut être déduit à partir du flux rotorique :

$$\Phi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m (I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr})$$

$$\Phi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m (I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr})$$

$$I_{dr} = \frac{\Phi_{dr}}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r} (I_{ds1} + I_{ds2}) \quad (I.54)$$

$$I_{qr} = \frac{\Phi_{qr}}{L_m + L_r} - \frac{L_m}{L_m + L_r} (I_{qs1} + I_{qs2})$$

En introduisant I_{dr} et I_{qr} dans l'expression (II.45), on obtient :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P L_m \frac{L_m}{L_m + L_r} (\Phi_{dr} (I_{qs1} + I_{qs2}) I_{dr} + \Phi_{qr} (I_{qs1} + I_{qs2}) I_{qr}) \quad (I.55)$$

Finalement, l'équation mécanique de la machine peut s'écrire comme suite :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \quad (I.56)$$

I.14. Mise sous forme d'équation d'état :

Le flux magnétisant Φ_m est la somme des deux flux Φ_{md} et Φ_{mq} , d'où :

$$\Phi_m = \sqrt{\Phi_{md}^2 + \Phi_{mq}^2} \quad (I.57)$$

Avec :

$$\Phi_{md} = L_m (I_{ds1} + I_{ds2} + I_{dr})$$

$$\Phi_{mq} = L_m (I_{qs1} + I_{qs2} + I_{qr}) \quad (I.58)$$

A partir de l'équation (I.58) et (I.46) on peut écrire :

$$\begin{aligned} I_{ds1} &= \frac{\Phi_{ds1} - \Phi_{md}}{L_{s1}} \\ I_{ds2} &= \frac{\Phi_{ds2} - \Phi_{md}}{L_{s2}} \\ I_{qs1} &= \frac{\Phi_{qs1} - \Phi_{mq}}{L_{s1}} \\ I_{qs2} &= \frac{\Phi_{qs2} - \Phi_{mq}}{L_{s2}} \\ I_{dr} &= \frac{\Phi_{dr} - \Phi_{md}}{L_r} \end{aligned} \quad (I.59)$$

$$I_{qr} = \frac{\Phi_{qr} - \Phi_{mq}}{L_r}$$

En remplaçant (I.59) dans (I.40) on obtient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Phi_{ds1}}{dt} = V_{ds1} - \frac{R_{S1}}{L_{S1}} (\Phi_{ds1} - \Phi_{md}) + \omega_S \Phi_{qs1} \\ \frac{d\Phi_{qs1}}{dt} = V_{qs1} - \frac{R_{S1}}{L_{S1}} (\Phi_{qs1} - \Phi_{mq}) - \omega_S \Phi_{ds1} \\ \frac{d\Phi_{ds2}}{dt} = V_{ds2} - \frac{R_{S2}}{L_{S2}} (\Phi_{ds2} - \Phi_{md}) + \omega_S \Phi_{qs2} \\ \frac{d\Phi_{qs2}}{dt} = V_{qs2} - \frac{R_{S2}}{L_{S2}} (\Phi_{qs2} - \Phi_{mq}) - \omega_S \Phi_{ds2} \\ \frac{d\Phi_{dr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} (\Phi_{rd} - \Phi_{md}) - \omega_{gl} \Phi_{rq} \\ \frac{d\Phi_{qr}}{dt} = -\frac{R_r}{L_r} (\Phi_{rq} - \Phi_{mq}) - \omega_{gl} \Phi_{rd} \\ J \frac{d\Omega}{dt} = P \frac{L_m}{L_m + L_r} [\Phi_{dr} (I_{qs1} + I_{qs2}) - \Phi_{qr} (I_{ds1} + I_{ds2})] - C_r - K_f \Omega \end{array} \right. \quad (I.60)$$

A partir de l'équation (I.53) on peut écrire :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{mq} = La \left(\frac{\Phi_{ds1}}{L_{S1}} + \frac{\Phi_{ds2}}{L_{S2}} + \frac{\Phi_r}{L_r} \right) \\ \Phi_{mq} = La \left(\frac{\Phi_{qs1}}{L_{S1}} + \frac{\Phi_{qs2}}{L_{S2}} + \frac{\Phi_r}{L_r} \right) \end{array} \right. \quad (I.61)$$

Avec :

$$La = \frac{1}{\frac{1}{L_{S1}} + \frac{1}{L_{S2}} + \frac{1}{L_r} + \frac{1}{L_m}}$$

Nous mettons le système d'équations (II.52) sous forme d'un système d'équation d'état.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (I.62)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} V_{ds1} \\ V_{ds2} \\ V_{qs1} \\ V_{qs2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; X = \begin{bmatrix} \Phi_{ds1} \\ \Phi_{ds2} \\ \Phi_{qs1} \\ \Phi_{qs2} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \omega_s & 0 & \frac{R_{s2}L_a}{L_rL_{s1}} & 0 \\ \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} & 0 & \omega_s & \frac{R_{s2}L_a}{L_rL_{s2}} & 0 \\ -\omega_s & 0 & \frac{R_{s1}L_a}{L_{s1}^2} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & 0 & \frac{R_{s1}L_a}{L_rL_{s1}} \\ 0 & -\omega_s & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s1}L_{s2}} & \frac{R_{s2}L_a}{L_{s2}^2} - \frac{R_{s1}}{L_{s1}} & 0 & \frac{R_{s2}L_a}{L_rL_{s2}} \\ \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & 0 & 0 & \frac{R_rL_a}{L_r^2} - \frac{R_r}{L_r} & \omega_{gl} \\ 0 & 0 & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s1}} & \frac{R_rL_a}{L_rL_{s2}} & -\omega_{gl} & \frac{R_rL_a}{L_r^2} - \frac{R_r}{L_r} \end{bmatrix}$$

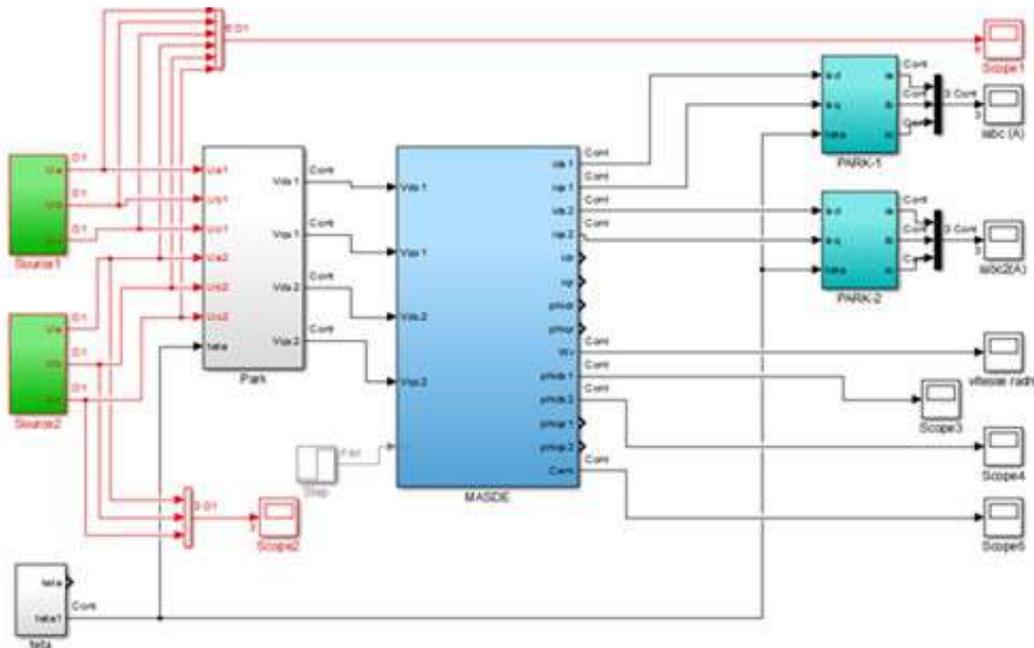


Figure I.5: Schéma Bloc du model de la MASDE sous Matlab/Simulink

I.15. Résultats de la simulation sur Matlab/Simulink :

Après introduction des paramètres de fonctionnement de la MASDE sur le model sous Matlab/Simulink de MASDE, et l'application d'un couple résistant d'une valeur de $C_r=14$ N.m nous avons obtenu les résultats ci-après :

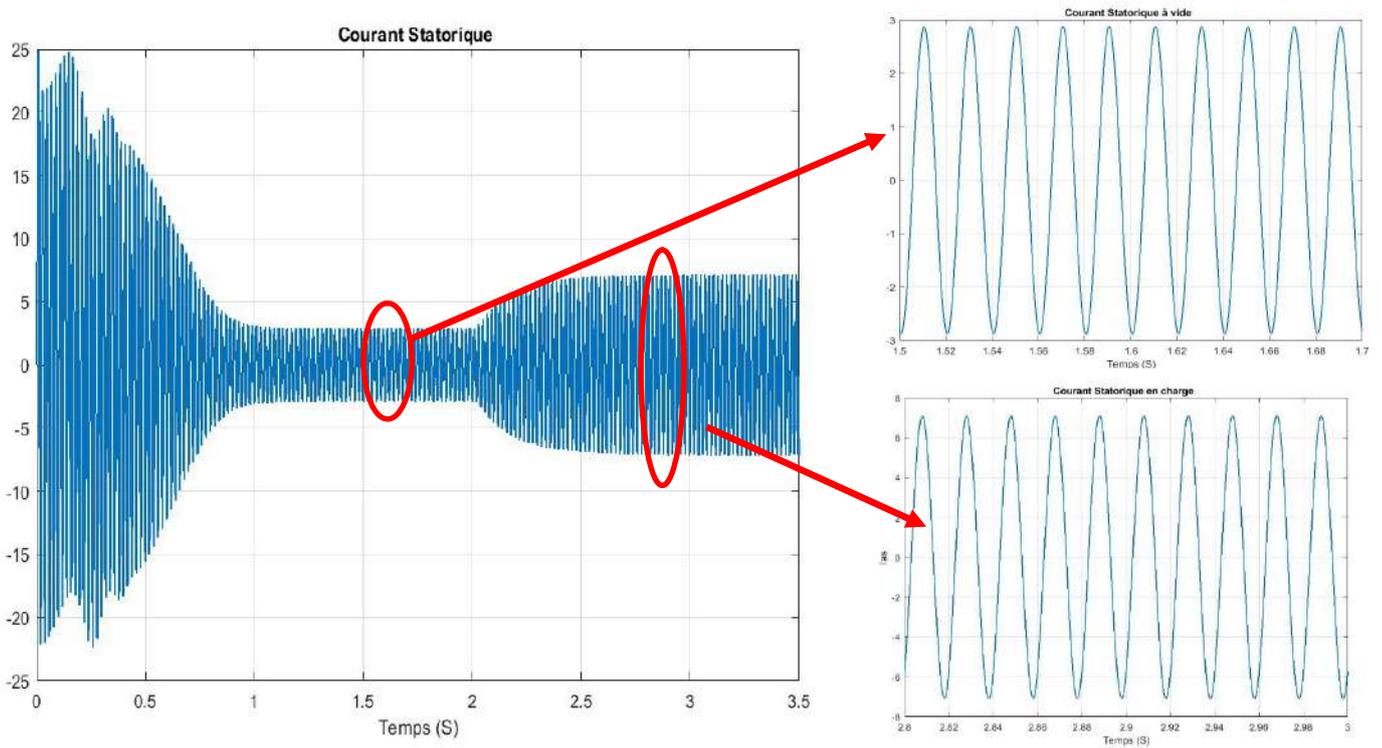


Figure I.6 : Courbe de courant en système triphasées de la MASDE (Ias1)

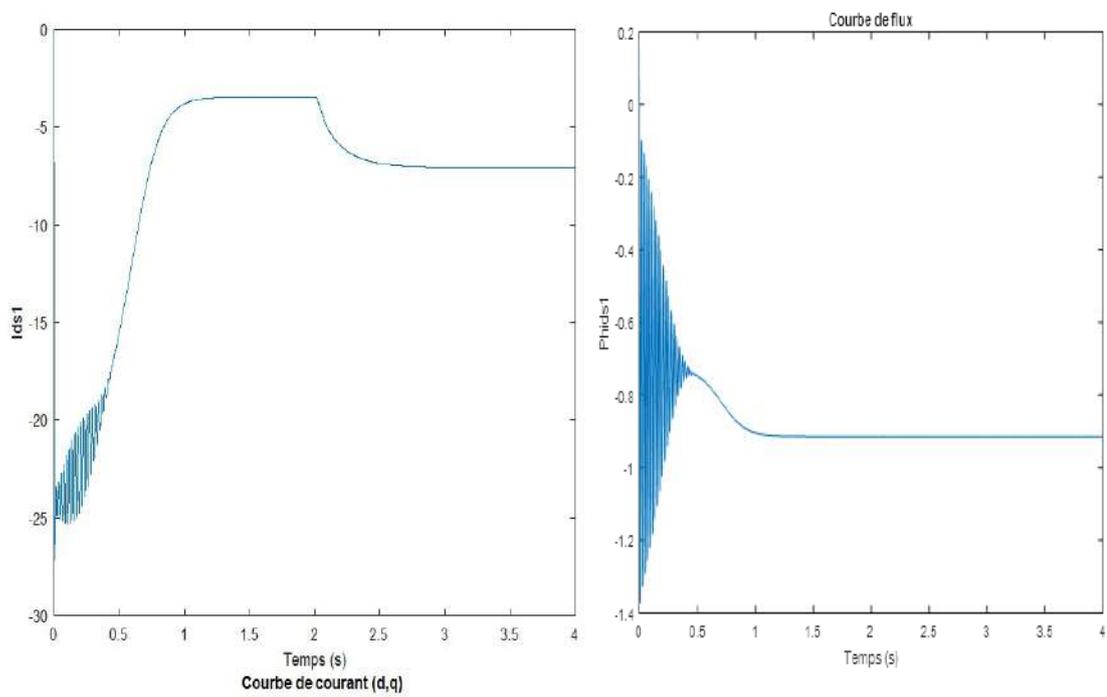


Figure I.7 : Courbe de courant Ids1 et Phids1 en système Biphases (d,q)

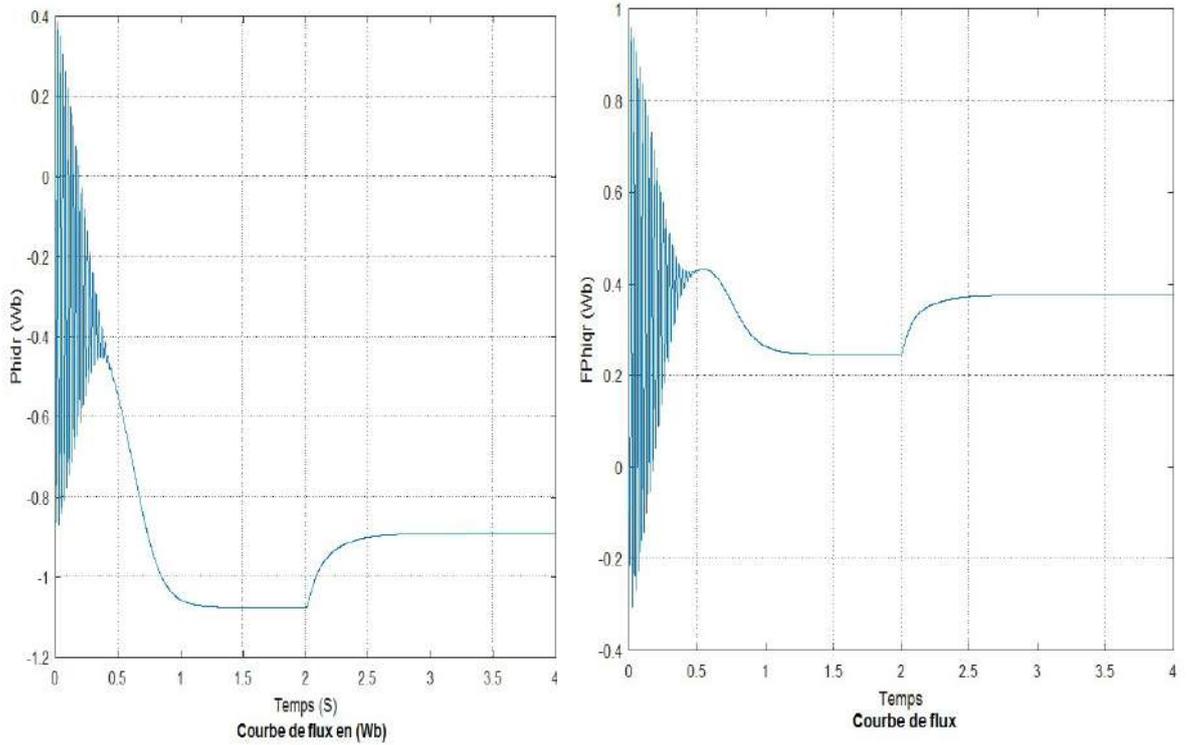


Figure I.8 : Courbe de Flux Φ_{hidr} et Φ_{PPhidr} en système Biphasées (d,q)

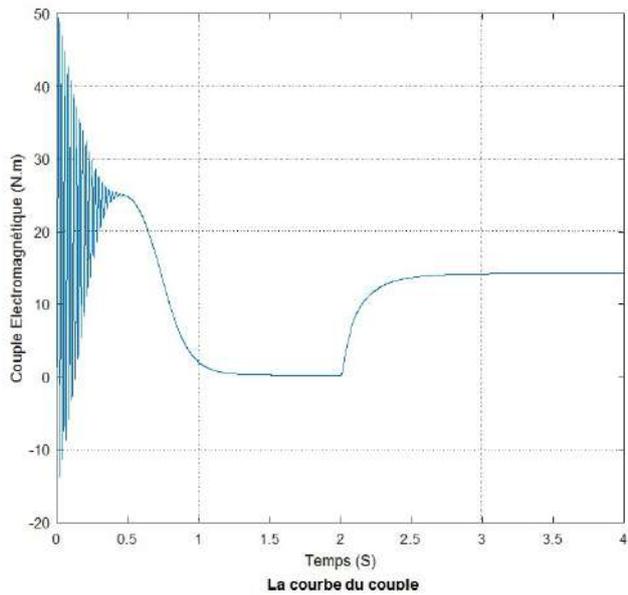


Figure I.9 : Courbe du couple C_{em} .

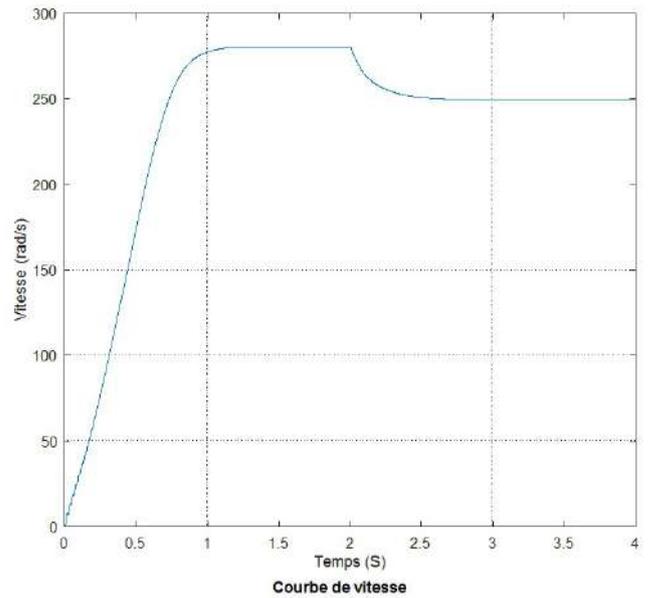


Figure I.10 : Courbe de Vitesse ω_r

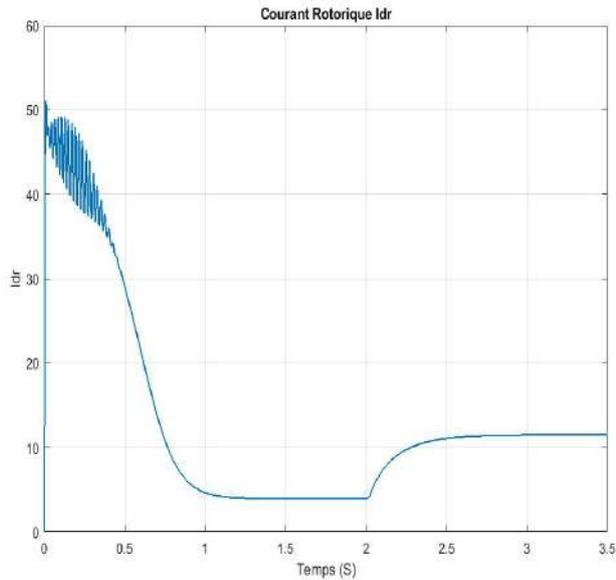


Figure I.11 : Courant rotorique Idr.

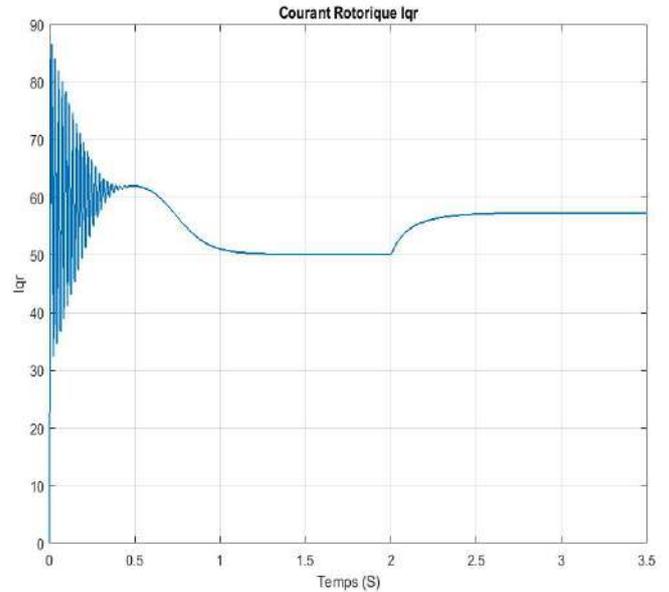


Figure I.12 : Courant rotorique Iqr

I.16. Interprétation du résultat de la simulation :

Les figures ci-dessus montrent les performances de la conduite de MASDE alimentée directement par les tensions sinusoïdales (220 / 380V, 50Hz), avec un fonctionnement à vide entre [0, 2] s et en charge de $C_r=14$ N.m.

Au démarrage les courants statoriques passent par un régime transitoire, puis ils se stabilisent, à l'instant d'application du couple résistant ($C_r=14$ N.m), l'amplitude des courants augmente. Le couple électromagnétique au démarrage atteint une valeur importante, en régime permanent le couple se stabilise, au début la vitesse de rotation du rotor, augmente de manière linéaire, et se stabilise à une valeur légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme, en charge cette valeur décroît puisqu'elle est inversement proportionnelle à la charge, puis elle se stabilise.

Pendant le passage du régime transitoire, les courants rotoriques oscillent autour d'une valeur de 25 [A], soit 4 à 5 fois le courant nominal pour permettre au couple électromagnétique de vaincre l'inertie de la machine, puis chutent à partir de $t=1$ s, et prennent une forme sinusoïdale au régime permanent.

Lorsqu'on applique un couple résistant $C_r=14$ N.m, on remarque que la vitesse diminue jusqu'à 2750tr/min et l'amplitude des courants augmente jusqu'à 6A.

I.17.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons modélisé la machine asynchrone double étoile dont la complexité a été réduite à travers la mise en équations des relations électriques, magnétiques et mécaniques en tenant compte des hypothèses simplificatrices et en effectuant un changement de repère par l'application de la transformation de PARK.

Pour étudier le comportement dynamique de la machine asynchrone double étoile, nous avons implémenté le modèle de la MASDE sous l'environnement MATLAB /SIMULINK dont les résultats de la simulation ont été discutés ci-dessus.

Dans le chapitre suivant nous aborderons le convertisseur symétrique et asymétrique multi-niveaux et leurs associations à la MASDE.

CHAPITRE II Etat de l'art des onduleurs symétrique et asymétrique

II.1. Introduction :

Au début des années 90, l'évolution croissante des calibres en tension et en courant des semi-conducteurs de puissance a stimulé le marché des convertisseurs statiques de puissance spécialement dédiés aux applications de moyennes et de fortes puissances, allant de quelques kilowatts jusqu'à plusieurs mégawatts.

Néanmoins, malgré les avancées significatives des technologies utilisées en développement et en fabrication des interrupteurs de puissance, l'évolution des technologies des semi-conducteurs est assez lente par rapport au marché mondial, Les principales applications de la topologie multi niveau se trouvent généralement dans la traction et la propulsion électriques : locomotives de 3kV, navires électriques, variateurs de vitesse de 4.5kV, ainsi que dans les systèmes de génération et de transport de l'énergie électrique. L'utilisation des convertisseurs multi niveaux dans les installations industrielles a été motivée par des avantages énergétiques, largement éprouvés de nos jours. Toutefois, ces convertisseurs présentent des inconvénients. On peut citer : le nombre élevé de composants électriques, la complexité de la commande, Ce chapitre comprend deux parties. Tout d'abord, nous effectuons une présentation des différentes catégories d'onduleurs multi niveaux et les différentes topologies. Ensuite, nous décrivons les points forts et les points faibles des onduleurs existants.

II.2. Principe de fonctionnement l'onduleur multiniveaux :

La figure suivante aide à comprendre comment travaillent les convertisseurs multiniveaux. Un convertisseur à deux niveaux est représenté à la figure (II.1.a), dans laquelle les commutateurs semi-conducteurs ont été remplacés par un interrupteur idéal. La tension de sortie ne peut prendre que deux valeurs : 0 ou E sur la figure (II.1. b). la tension de sortie de trois niveaux peut prendre trois valeurs: 0, E ou 2E. dans la figure (II.1.c) le cas général le n niveaux est présenté.

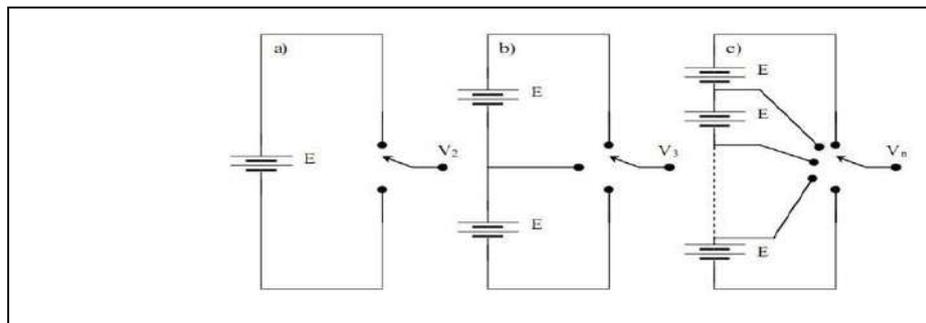


Figure (II.1.) : Onduleur à niveaux multiples à :
a) deux niveaux. b) à trois niveaux. c) à N niveaux.

L'augmentation de nombre du niveau permet d'améliorer les formes d'ondes en sortie du convertisseur, notamment en termes de contenu harmonique, mais cela nécessite une commande beaucoup plus complexe et un nombre important des semi-conducteurs utilisés. Cela rend le système global plus couteux et surtout plus complexe.

II.3. Intérêt des onduleurs multi-niveaux :

Un convertisseur statique est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux. Ce type de convertisseur présente essentiellement deux avantages. D'une part les structures multi-niveaux permettent de limiter les contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance : chaque composant, lorsqu'il est à l'état bloqué, supporte une fraction d'autant plus faible de la pleine tension de bus continu que le nombre de niveaux est élevé. D'autre part, la tension de sortie délivrée par le convertisseur 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.

II.4. Les différentes topologies des onduleurs multi-niveaux :

L'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux.

Ce chapitre est consacré à la présentation d'une brève synthèse des principales topologies des convertisseurs multi niveaux, leurs principes de fonctionnement et on cite quelque avantages et inconvénients.

La figure suivante représente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes.

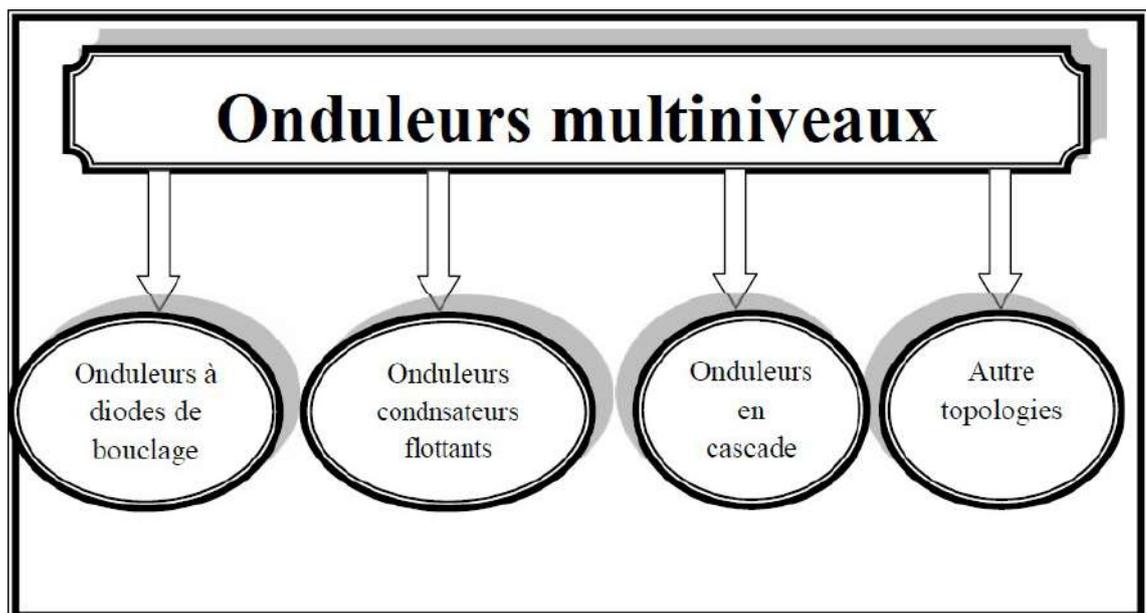


Figure (II.2): Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux

La figure (II.2) : représente les trois topologies principales des onduleurs multi-niveaux les plus récentes :

- La topologie à diode de bouclage (NPC),
- La topologie au condensateur flotteur (à cellules imbriquées),
- La topologie en cascade,
- Et une autre topologie C'est : topologie en pont en H (H-Bridge).

II.4.1. Onduleur multi niveaux à diode de bouclage(NPC) :

La première topologie la plus pratique d'onduleur de tension multi niveaux est le NPC (Neutral Point Clamped). Cette topologie à été initialement proposé par A.Nabac en 1981.pour la génération de N niveaux de tension.[27].

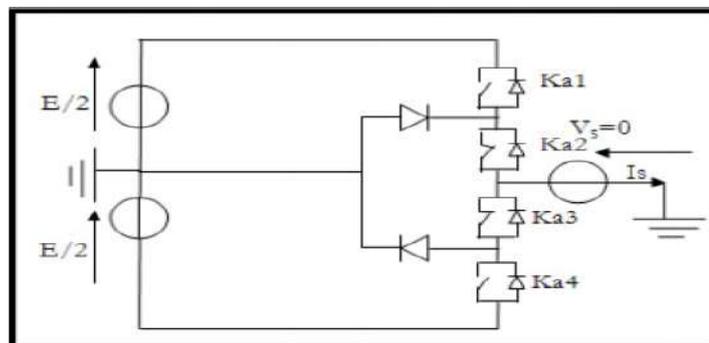


Figure (II.3) : Onduleur en type NPC à (phase A).

Cette topologie présente plusieurs avantages dont quelques-uns sont énumérés ci-dessous [28] :

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

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

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

II.4.2. Onduleur multi niveaux à condensateurs flottants :

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

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

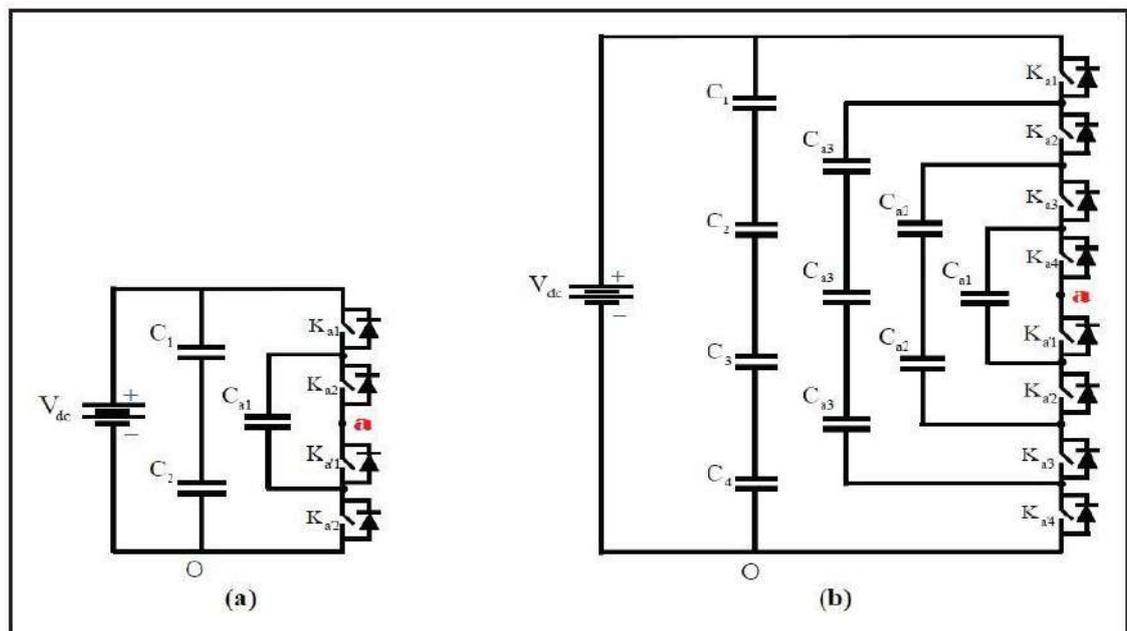


Figure (II.4) : Topologies d'onduleurs NPC à condensateur Flottant à :

- (a) trois niveaux

- (b) cinq niveaux

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

Cette topologie présente quelques **inconvenients, 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.
- 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.

II.4.3. Les onduleurs multiniveaux en pont en H (H-Bridge) :

II.4.3.1. Onduleurs en pont (H) classiques :

En 1975 est apparu le premier modèle d'onduleur à thyristors en pont H (Onduleur de Mc Murray). L'association série de plusieurs ponts permet de recueillir en sortie une tension synthétisée représentant en amplitude la somme des tensions de sortie partielles et de forme approximant une onde sinusoïdale. En 1988, la première application d'onduleur en pont H a vu le jour pour la stabilisation des plasmas.

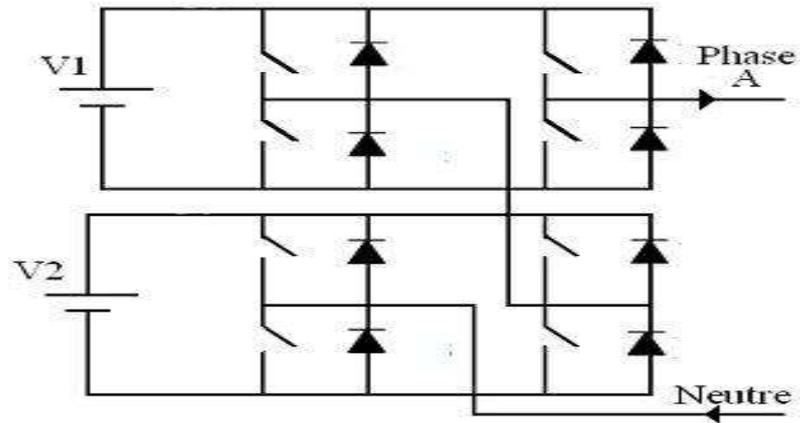


Figure (II.5) : Structure d'un onduleur H-Bridge classique.

II.4.3.2. Onduleurs multiniveaux en cascade :

Les onduleurs multi-niveaux en cascade est une structure relativement nouvelle.

Un onduleur multi-niveaux en cascade est tout simplement une connexion en série de plusieurs Onduleurs monophasés.

Les onduleurs multi-niveaux en cascade on introduit l'idée d'utiliser des sources DC séparée pour produire une onde de tension AC. Chaque onduleur monophasé est connecté à sa propre source en courant continue. Les sorties de chaque onduleur monophasé, sont une onde de tension alternative.

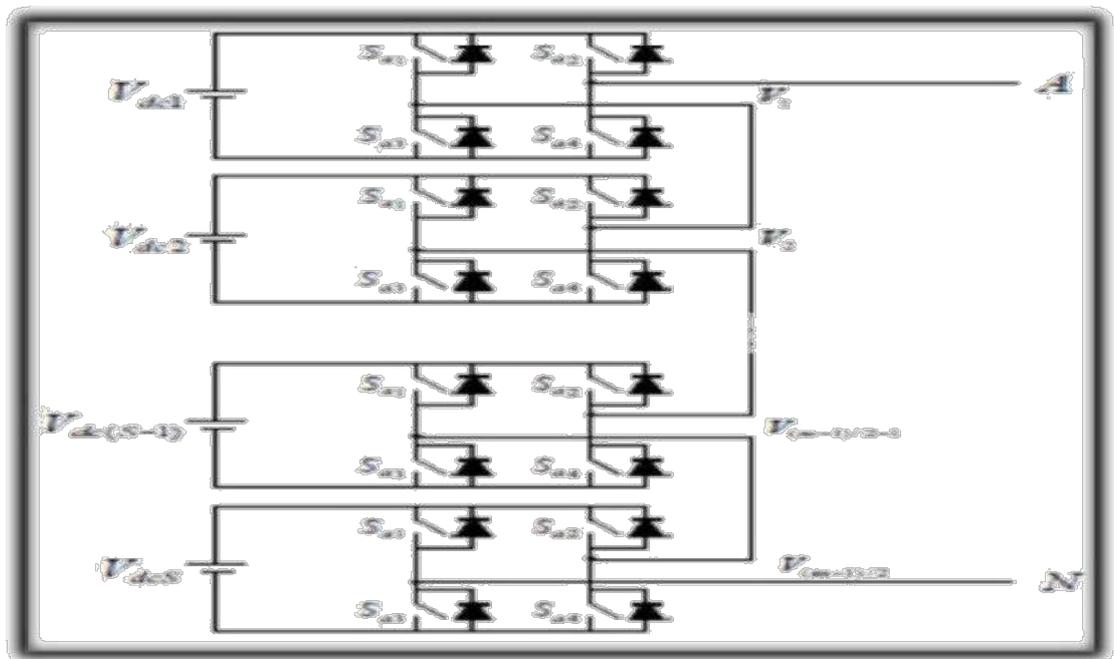


Figure (II.6) : Structure d'un onduleur cascade

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

Avantage :

- L'onduleur multi niveaux en cascade est une structure de convertisseurs d'énergie, il présente l'idée d'employer des sources séparées à courant continu pour produire une forme d'onde d'une tension alternative.
- Pour atteindre le même nombre de niveaux de tension, ce type de convertisseur nécessite moins de composants.
- Contrairement à l'onduleur à diode de bouclage et à condensateur flottant, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire.
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par chaque onduleur monophasé.
- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins De problèmes de sécurité.
- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est plus du double du nombre de sources à Courant continu ($N = 2s + 1$).

Inconvénients :

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

II.4.4. Onduleurs multi-niveau cascade en pont H :

Cette structure a été proposée en 1975, elle consiste à la mise en série de plusieurs ponts à deux niveaux monophasé ; ces ponts étant connectés à des sources de tension continues séparées.

La figure (II-8) montre respectivement le schéma de base d'un convertisseur trois et cinq niveaux en cascade formé par l'association en série de

$(N-1)/2$ ponts à deux niveaux pour chaque bras. La tension V_s en sortie d'une telle structure est donnée par la somme des $(N-1)/2$ tensions en sortie des ces ponts.

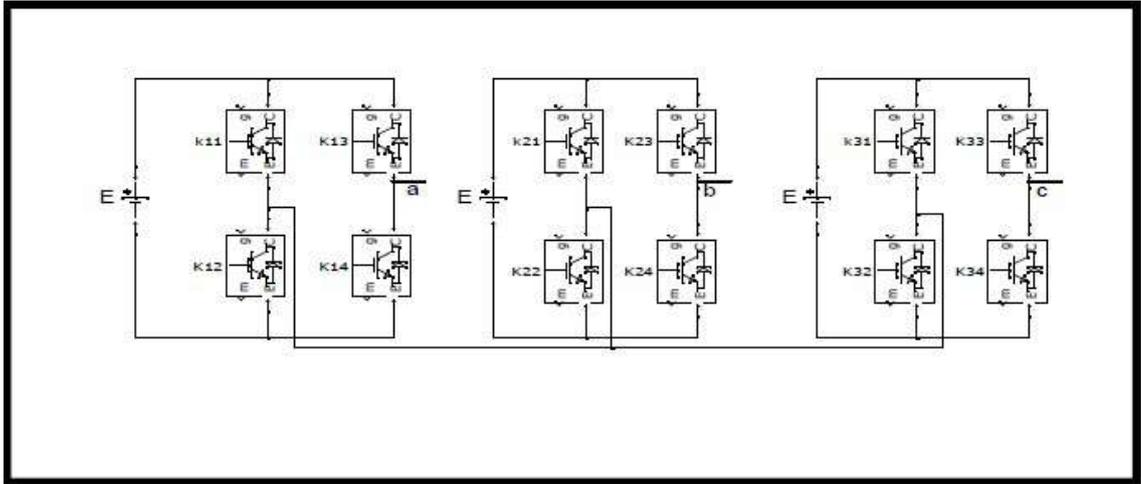


Figure (II.7) : Onduleur cascade en pont H à Trois niveaux

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

Les avantages :

- 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 en pont en H, aucune diode supplémentaire n'est nécessaire.
- La tension de sortie totale de phase est une sommation des tensions produites par Chaque onduleur monophasé.
- Les petites sources à courant continu sont généralement impliquées, ce qui entraîne moins de problèmes de sécurité.
- Le nombre de niveaux possibles de tension de sortie est définit par $N = 2s + 1$.

Les inconvénients :

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

II.5. Avantage des Onduleurs multi-niveaux :

Les onduleurs multi-niveaux offrent d'énormes avantages par rapport aux onduleurs deux niveaux. Ces avantages sont visibles, d'une part d'un point de vue technologique et d'autre part d'un point de vue fonctionnel :

II.5.1. Les Avantages technologiques :

Dans les onduleurs multi niveaux, la répartition de la tension est obtenue de manière naturelle en régime établi, ce qui permet de commuter chaque semi-conducteur indépendamment des autres. Ceci rend le convertisseur plus robuste et plus performant pendant les commutations. La tension commutée est d'amplitude réduite et la commutation est donc plus simple à gérer.

II.5.2. Les Avantages fonctionnelles pour le convertisseur :

Possibilité d'accéder à des applications de plus forte puissance. Possèdent de meilleurs Compromis entre performances statiques (tension de saturation) et performances dynamiques (temps de commutation, pertes par commutation, fréquence de découpage).

II.5.3. Les Avantages fonctionnelles pour les machines tournantes :

Le nombre de tension généré par un onduleur multi-niveaux plus élevé que celui d'onduleur deux niveaux de tension, permet d'améliorer la qualité de sa forme d'onde, qui se traduira par une réduction de sa distorsion harmonique. Ceci peut entraîner des avantages considérables comme la diminution des pertes fer, l'augmentation du temps de vie des isolants ou la diminution du rayonnement électromagnétique issu des bobinages de la machine.

II.6. Domaines d'applications des onduleurs multi-niveaux :

Deux grands domaines d'application classique des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entrainements à vitesse variable des machines à courants alternatifs, Ils sont également caractéristiques de deux grandes familles, respectivement celle des systèmes à fréquence fixe et celle des systèmes à fréquence variable.

II.7 Propriétés des principales structures :

II.7.1 Classification des topologies selon leur alimentation :

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation, la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique Au contraire, les structures telles que les onduleurs en cascade élèvent leur tension d'alimentation, la tension maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation, elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation.

II.7.2 Nombres de composants nécessaires :

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

obligatoires dans la configuration à diode clampée et onduleur cascadi. Implicitement, l'onduleur cascadi exige le moindre nombre de composants.

Un autre avantage d'onduleur cascadi est la flexibiliti de disposition de circuit. La disposition du circuit de modulation est possible parce que chaque niveau a la m^eme structure, et il n'y a aucune diode clampi suppliementaires ou un condensateur d'equilibrage de tension. Le nombre de niveaux de tension de sortie peut ^etre facilement ajusti en ajoutant ou en enlevant les cellules de pont complet.

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

Tableau II.1 : Nombres de composants n^ecessaires pour la topologie i trois niveaux

Topologie	n	s	K	D	D _c	C
NPC	3	2	4	4	2	0
Condensateur flotteur	3	2	4	4	0	1
Cascade	3	1	4	4	0	0

Tableau II.2: Nombres de composants n^ecessaires pour la topologie i cinq niveaux

Topologie	n	s	K	D	D _c	C
NPC	5	6	8	8	12	0
Condensateur flotteur	5	6	8	8	0	6
Cascade	5	3	8	8	0	0

Tableau II.3 : Nombres de composants n^ecessaires pour la topologie i sept niveaux

Topologie	N	s	K	D	D _c	C
NPC	7	6	12	12	30	0
Condensateur flotteur	7	6	12	12	0	15
Cascade	7	3	12	12	0	0

Tableau II.4 : Nombres de composants n^ecessaires pour la topologie i neuf niveaux

Topologie	N	s	K	D	D _c	C
NPC	9	8	16	16	56	0
Condensateur flotteur	9	8	16	16	0	28
Cascade	9	4	16	16	0	0

Tableau II.5 Nombres de composants nécessaires pour la topologie à n niveaux :

Topologie	n	s	K	D	D _c	C
NPC	n	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	(n-1).(n-2)	0
Condensateur flotteur	n	(n-1)	2(n-1)	2(n-1)	0	(n-1).(n-2)/2
Cascade	n	(n-1)/2	2(n-1)	2(n-1)	0	0

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

II.8 Conclusion

Il existe plusieurs topologies d'onduleur, dont chacun correspond à un type d'application déterminer ou permettent d'atteindre des performances recherchées. Dans ce chapitre, nous avons Présenté Les différents types et topologies des onduleurs multi-niveaux ou nous avons donné leurs avantages et leurs inconvénients.

Chapitre III : Onduleur Multi Niveaux Symétriques

III.1. Introduction:

L'histoire de la conversion multiniveau commence dans les années 60. La première structure décrite est une mise en série de pont en H. Puis dans la fin des années 70 est apparu le convertisseur clampé par le neutre (NPC). Cette structure est considérée comme le premier convertisseur multiniveaux pour des applications de moyennes puissances.

Un onduleur est un convertisseur statique, assurant la conversion continue alternatif. Ces dernières années, des convertisseurs statiques sont de plus en plus exploités dans des applications diverses. Certaines d'entre elles exigent une alimentation électrique à haute ou moyenne tension, facilement réglable et ayant de bonnes performances spectrales.

De nouvelles techniques dites multiniveaux ainsi que de nouvelles topologies de convertisseurs ont été développées. Elles permettent de générer plusieurs niveaux de tension à la sortie du convertisseur. Le nombre de semi-conducteurs nécessaires à la réalisation de ces topologies augmente avec le nombre de niveaux désirés,

Ce chapitre représente une étude comparative de structures d'onduleurs multiniveaux à potentiels distribués cascade en pont en H, nous faisons une analyse théorique des convertisseurs cascade en pont en H de niveaux trois et cinq suivie de l'application des stratégies de commande des onduleurs multi niveaux : la commande plein onde et la commande trianguler- sinusoïdale. [22]

III.2. Onduleurs multiniveaux symétriques :

La dénomination complète de cette topologie, introduite par (Marchesoni et al.) en 1988 devrait être onduleur multiniveaux symétriques à cellules en série.

Ces onduleurs sont également connus sous l'appellation « onduleurs multiniveaux cascades » (« cascade multilevel inverter» dans la littérature anglo-saxonne). Cette dénomination est imprécise, elle provient du fait que la structure n'a tout d'abord été employée qu'avec des cellules symétriques, de sorte que la précision était superflue. [23]

III.3. Alimentation des cellules :

La principale difficulté de cette topologie réside dans l'alimentation des ponts en H. Il faut autant d'alimentations isolées les unes des autres qu'il y a de cellules. Pour des applications ne nécessitant pas d'apport de puissance active, on peut se passer d'alimentation et se contenter d'éléments stockeurs, comme des condensateurs. C'est par exemple le cas avec la compensation statique de réactif ou d'harmoniques. Cette structure est très avantageuse pour ce type d'applications, le seul inconvénient étant que les échanges de puissance entre phases ne sont pas possibles, ce qui a pour effet d'augmenter les fluctuations de tension.

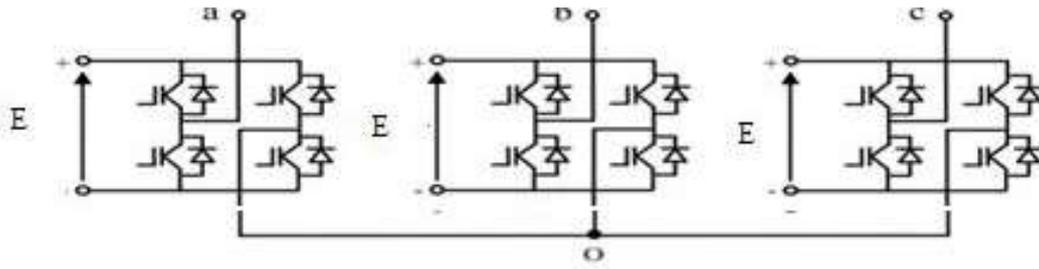


Figure (III.1) : Schéma d'une branche d'onduleur multiniveau cascadi.

III.4. Uniformité du pas des onduleurs multiniveaux à cellules en série :

III.4.1. Niveaux et pas des onduleurs multiniveaux :

Un onduleur multiniveau peut ˆtre considéré comme une source de tension contrˆlable, capable de prendre un nombre limité de valeurs de tension de sortie. Nous appellerons ces valeurs, les niveaux de l'onduleur, et la différence entre 2 niveaux successifs, le pas de l'onduleur.

Lorsque les tensions d'entrée sont équilibrées, le pas des topologies d'onduleurs existantes est toujours uniforme. Un pas uniforme permet d'obtenir des lois de commande simples. Dans cette première partie, nous allons décrire les conditions que les tensions d'entrées doivent respecter pour obtenir l'uniformité du pas

III.4.2. Condition d'uniformité du pas :

Il a été établi que les facteurs 2 et 3 entre les tensions d'entrée des différentes cellules étaient des cas particuliers permettant d'obtenir un pas uniforme.

III.4.3. Condition d'uniformité pour 2 cellules :

Pour obtenir une cellule à pas uniforme en associant 2 cellules à pas uniforme en série, le pas de chacune des cellules doit respecter l'inégalité suivante :

$$\Delta U_A \leq \Delta U_B \leq a \cdot \Delta U_A \quad (\text{II.1})$$

Avec ΔU_A et ΔU_B le pas des cellules, a le nombre de niveaux de la cellule ayant le plus petit pas. D'autre part, ΔU_B doit ˆtre un multiple de ΔU_A .

III.4.4. Condition générale d'uniformité :

A partir des relations (1) et (3), nous obtenons la condition d'uniformité pour un nombre quelconque de cellules :

$$\Delta U_k \leq \Delta U_{k+1} \leq \Delta U_1 + (n_j - 1) \cdot \Delta U_j \quad (\text{II.2})$$

Avec ΔU_k et n_k le pas et le nombre de niveaux de k ième cellule ; ΔU_1 est également le pas de l'onduleur résultant.

III.5. Onduleur monophasé en pont complet (en H):

En 1975 les auteurs ont proposé une structure d'un convertisseur multiniveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés ou pont en H, ou cellule partielle (structure cascade). Chaque cellule partielle est alimentée par une tension continue E_j . Le convertisseur est dit uniforme ou régulier si la différence entre deux niveaux consécutifs est constante.

$$E_2 - E_1 = E_3 - E_2 = \dots = \Delta U \quad (\text{II.3})$$

Dans le cas contraire, le convertisseur est dit non uniforme ou irrégulier.

Pour obtenir un onduleur multiniveaux asymétrique à pas uniforme ou régulier, les tensions continues d'alimentation des cellules partielles $E_j = (j=1\dots k)$ doivent respecter les deux Conditions suivantes :

$$E_1 \leq E_2 \leq \dots \leq E_k \quad (\text{II.4})$$

$$E_j \leq 1 + 2 \sum_{l=1}^{j-1} E_l \quad (\text{II.5})$$

j : Numéro de niveaux. Et k : Nombre de pont complet.

Le nombre de niveaux N pour un groupe de tensions données, s'obtient à partir de la relation suivante, [21] :

$$N = 1 + 2 \sum_{j=1}^k E_j \quad (\text{II.6})$$

Le nombre de niveaux minimum N_{\min} , et le nombre maximum N_{\max} que l'on peut générer est obtenu dès lors que chaque E_j prend sa valeur minimale, respectivement maximale. Nous avons donc les deux relations ci-dessous, [22].

$$N_{\min} = 2k + 1 \quad (\text{II.7})$$

$$N_{\max} = 3k \quad (\text{II.8})$$

Le nombre N dépend non seulement du nombre d'onduleurs partiels en série par phase, mais aussi de la tension continue qui alimente chacun d'eux, [24].

III.6. Dimensionnement d'un onduleur de type Cascade en pont en H :

III.6.1. Onduleur à trois niveaux de type Cascade en pont en H :

La structure d'un convertisseur multiniveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle) est montrée sur la figure (II-2)

III.6.1.1. Principe de fonctionnement :

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure cascade en pont en H à trois niveaux de tension, nous allons nous limiter notre étude à sa structure monophasée, figure (II.2).

La structure d'un bras d'onduleur trois niveaux de type cascade en pont en H est identique à celui d'un onduleur classique monophasé en pont complet voir figure (II-2).

Cependant la technique de commande est différente ce qui permettra d'avoir les trois niveaux de tension.

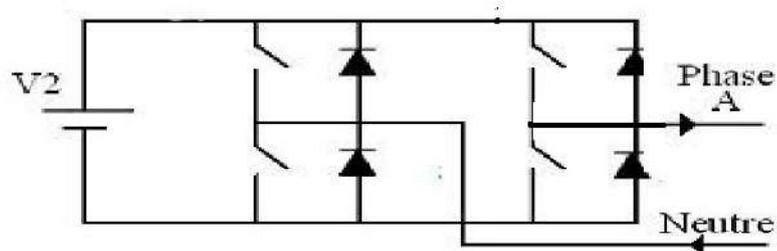


Figure (III.2) : Structure d'un onduleur H-Bridge classique.

L'objectif visé est donc de déterminer les valeurs que peut prendre la tension V_{ao} pour les différents états possibles des interrupteurs, de montrer les séquences de conductions des interrupteurs.

Nous avons trois séquences de fonctionnement possibles :

Séquences 1 : Génération du niveau maximum Dans ce cas, les interrupteurs K_1 , K_4 sont passants et K_2 , K_3 sont bloqués).

Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = +E$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_2 , K_3 vaut : $V_{K3} = V_{K2} = +E$.

Séquences 2 : Génération du niveau intermédiaire

Dans ce cas, les interrupteurs K_2 , K_4 sont passants et K_1 , K_3 sont bloqués. Et la tension de sortie V_{ao} est: $V_{ao} = 0$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1 , K_3 vaut : $V_{K1} = V_{K3} = +E$.

Séquences 3 : Génération du niveau minimum

Dans ce cas, les interrupteurs K_1 , K_4 sont bloqués et K_2 , K_3 sont passants. Et la tension de sortie V_{ao} est : $V_{ao} = -E$.

La tension inverse appliquée aux interrupteurs K_1 , K_4 vaut : $V_{K1} = V_{K4} = +E$.

Les 3 états ou séquences de commutation possibles sont résumés au tableau (III-5). [13]

K1	K2	K3	K4	Vao
1	0	0	1	+E
0	1	0	1	0
0	0	1	1	-E

Tableau (III-1) : États possibles de l'onduleur Cascade à 3 niveaux.

III.6.2. Modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

Pour générer les impulsions de commande MLI d'un convertisseur à N-niveaux de tensions, N-1 porteuses triangulaires sont nécessaires. Ces porteuses ont la même fréquence f_c et la même amplitude A_c . Les porteuses peuvent être horizontalement ou verticalement décalées. Si elles le sont horizontalement, le déphasage entre deux signaux consécutifs est donné par $2/(N-1)$. Et si elles sont décalées verticalement, les signaux N -1 triangulaires peuvent être en phase ou non et occupent une bande continue avec le même décalage vertical.

Ils sont ensuite comparés au signal de référence d'amplitude A_r et de fréquence f_r . Chaque comparaison donne 1 si une porteuse est supérieure ou égale à la référence, et 0 dans le cas contraire. A la sortie du modulateur, la somme des résultats issus des comparaisons est ensuite décodée, et donne la valeur correspondant à chaque niveau de tension.

Pour un convertisseur de N niveaux, l'indice de modulation en amplitude m_a , et l'indice de modulation en fréquence m_f sont définies comme suit :

$$m_a = \frac{A_r}{(N - 1)A_c} \quad (\text{II.9})$$

$$m_f = \frac{f_c}{f_r} \quad (\text{II.10})$$

III.7. La stratégie de Modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

On crée deux signaux :

- Un signal sinusoïdal d'amplitude et de fréquence variable appelé (référence) V_{ref} .
- Un signal triangulaire de fréquence très élevée appelé (porteuse) V_p .

Ces deux signaux sont comparés. Le résultat de la comparaison sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance.

Si $V_{ref} \geq V_p$, $V_{sortie} = 1$; Si $V_{ref} < V_p$, $V_{sortie} = 0$.

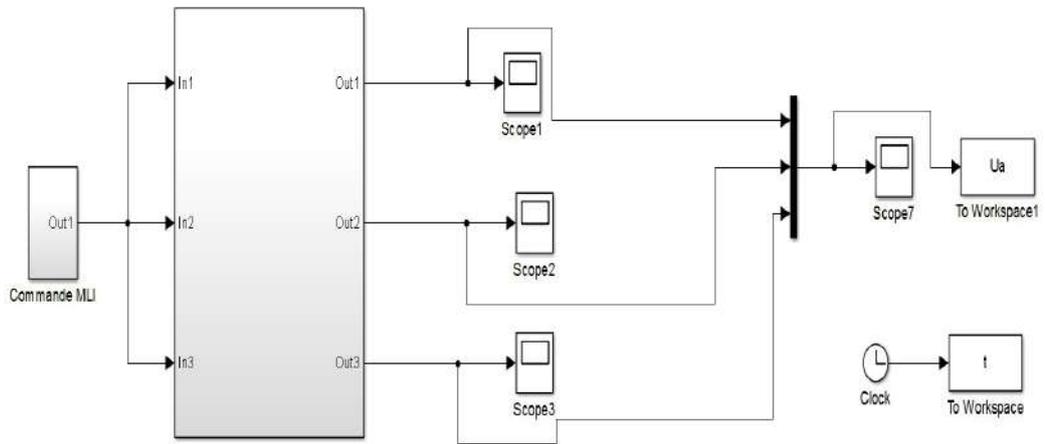


Figure : (III.3) : Bloc de Commande Onduleur à 3 Niveaux en pont en H

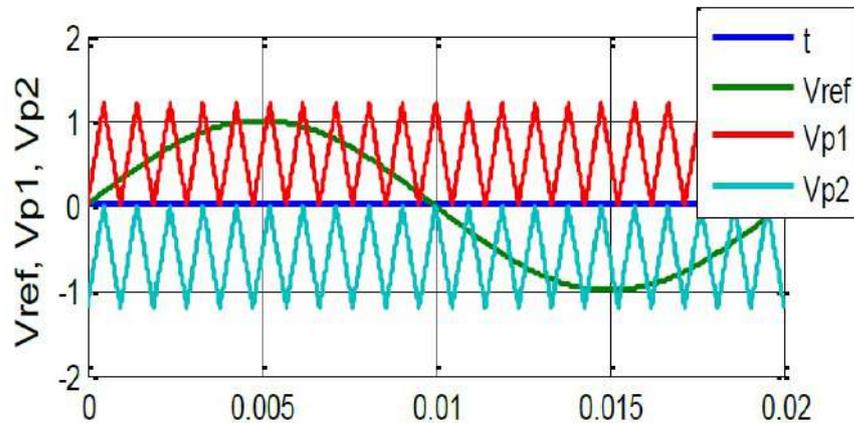


Figure (II.4) : Principe de la Commande MLI à deux porteuses

Résultats de simulation :

Dans ce cas, on utilise la technique MLI à deux porteuses figure (II-5). A 3 niveaux, la modulante est comparée à 2 porteuses triangulaires. Les trois niveaux de la tension de sortie « V_s » sont : 0, +E et -E.

III.9. Onduleur à cinq niveaux de type Cascade en pont en H :

La structure d'un convertisseur multiniveaux basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés (ou pont en H, ou cellule partielle).

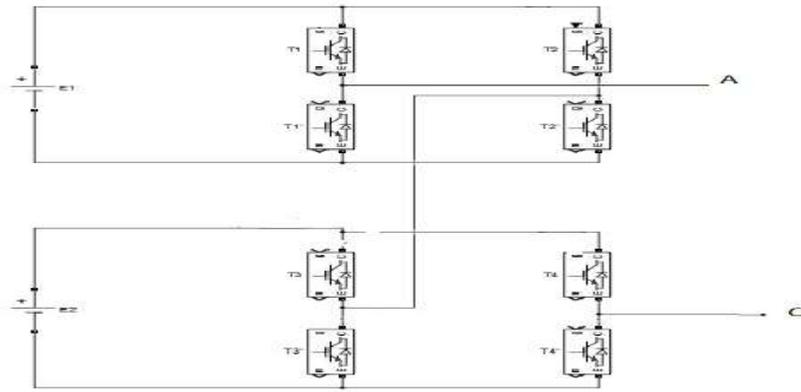


Figure (III.5) : Structure monophasée d'un onduleur cascade à deux cellules

II.8. Conduite de la MASDE alimentée par un onduleur à 5 niveaux en pont en H :

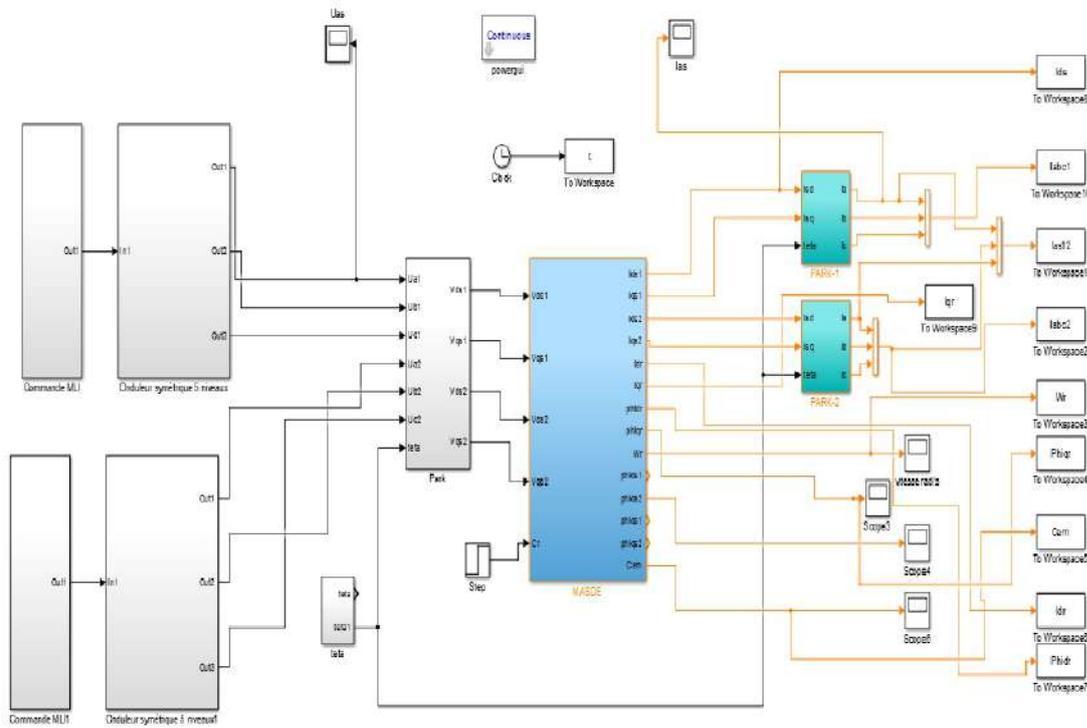
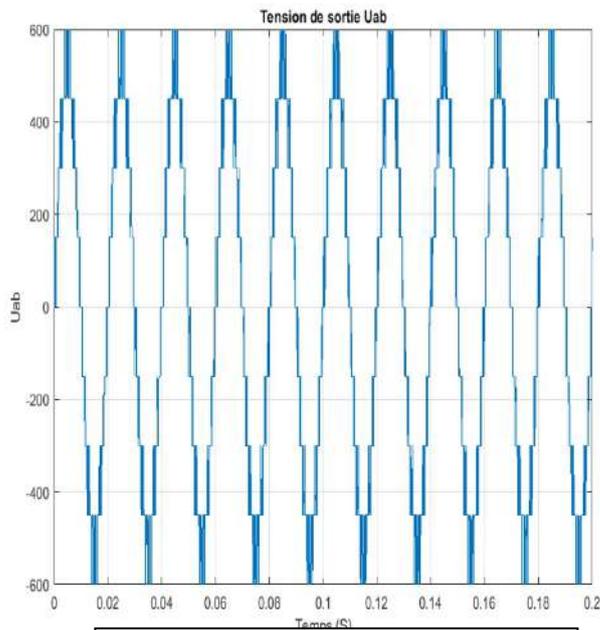


Figure (III.6) : Bloc de Commande MASDE Par Onduleur 5 Niveau en pont en H

Résultats de la simulation :



Figure(III.7) : tension composé Uab

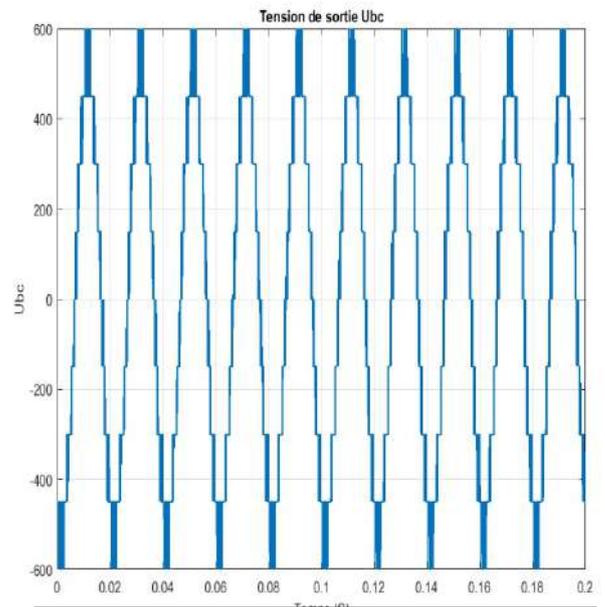


Figure (III.8) : tension composé Ubc

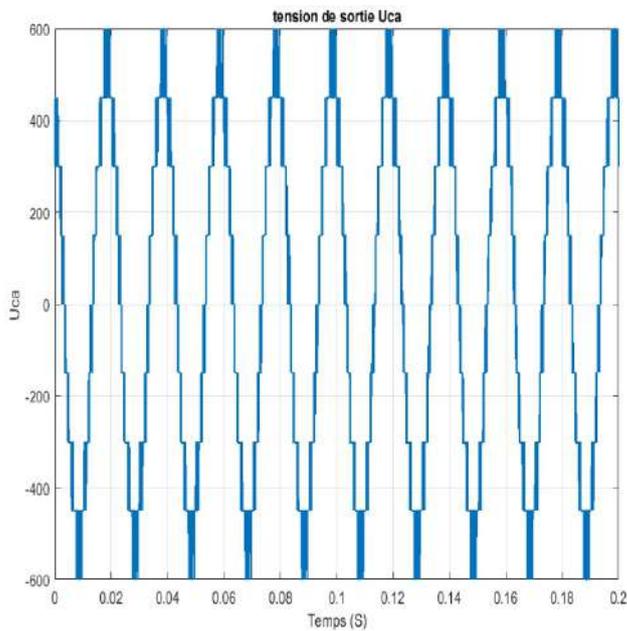
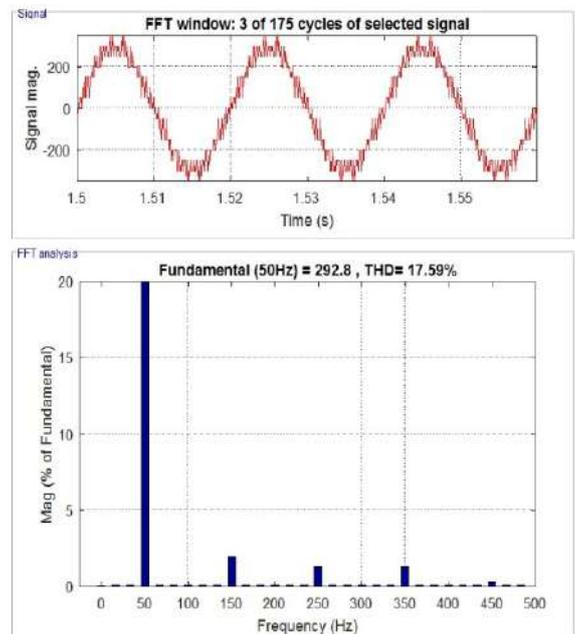
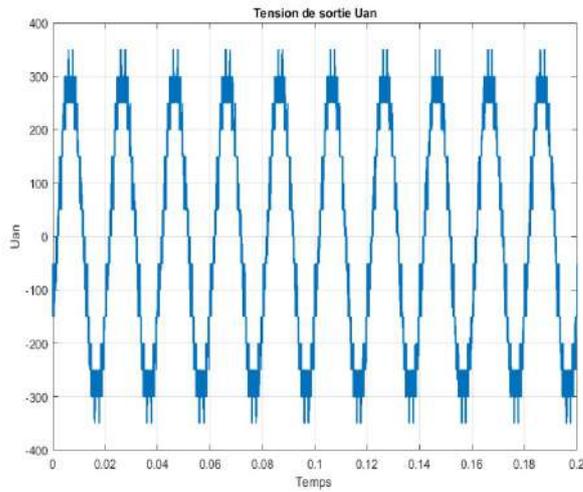


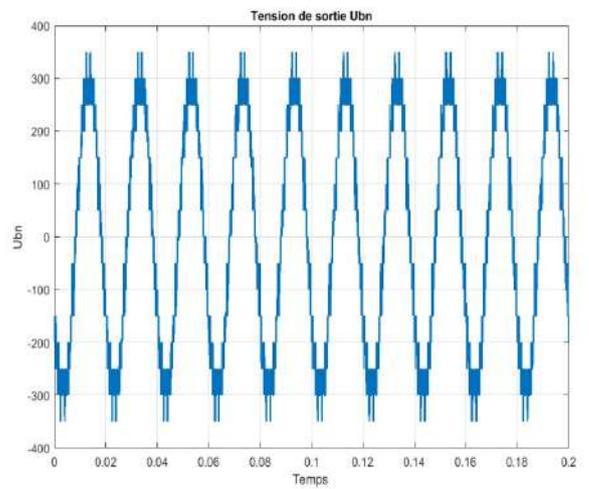
Figure (III.9) : tension composée Uca



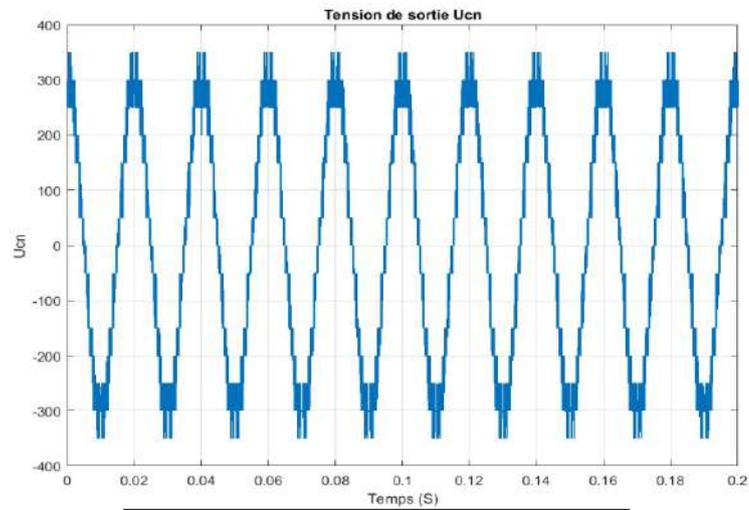
Figure(III.10) : spectre harmonique de la tension



Figure(III.11) : tension simple Uan



Figure(III.12) : tension simple Ubn



Figure(III.13) : tension simple Ucn

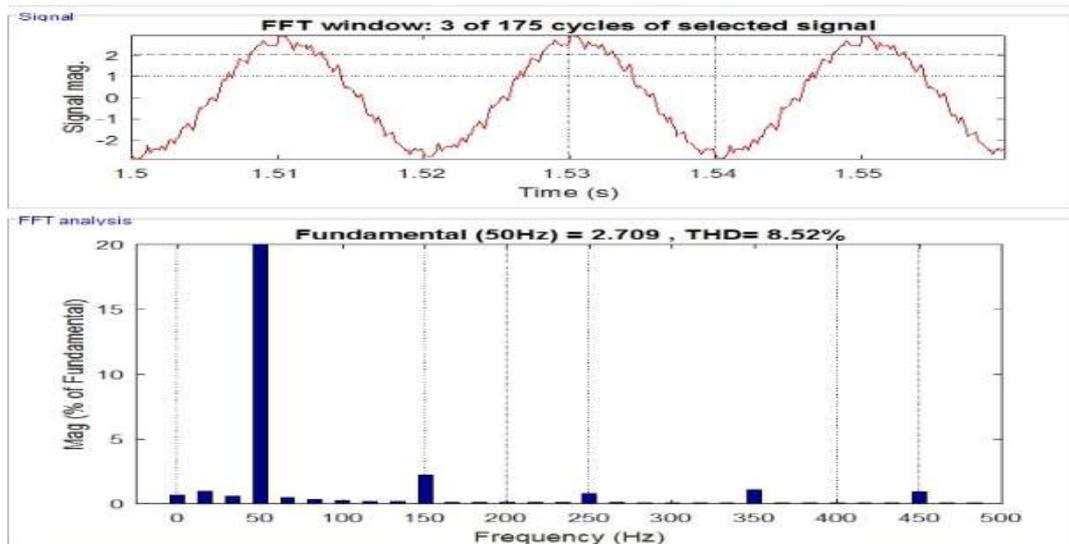
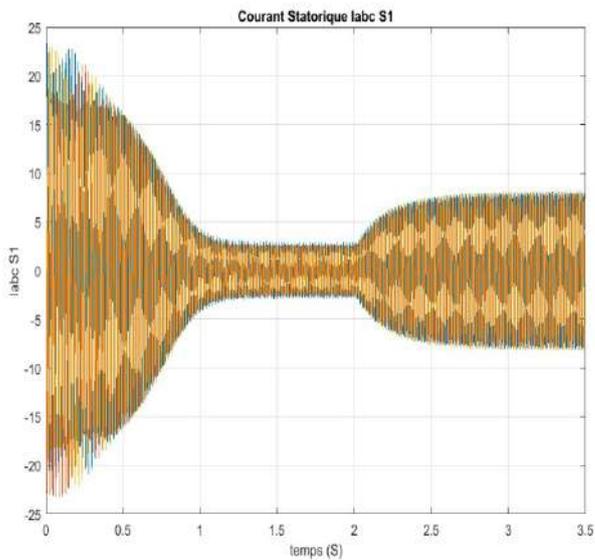
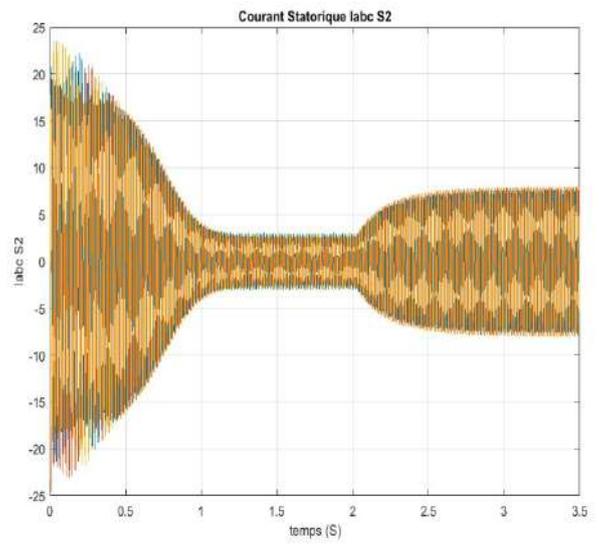


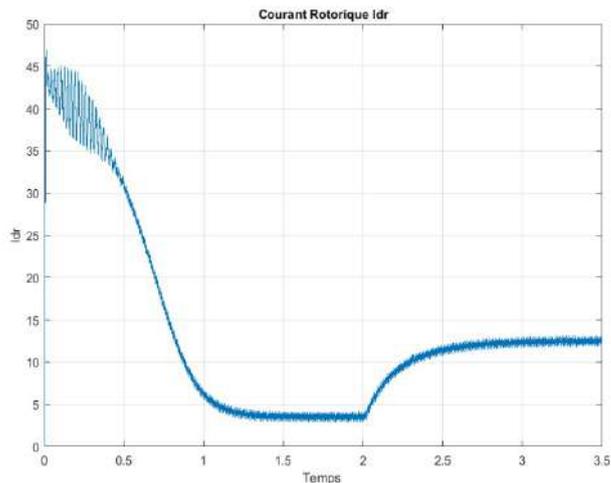
Figure (III.14) : spectre harmonique de courant



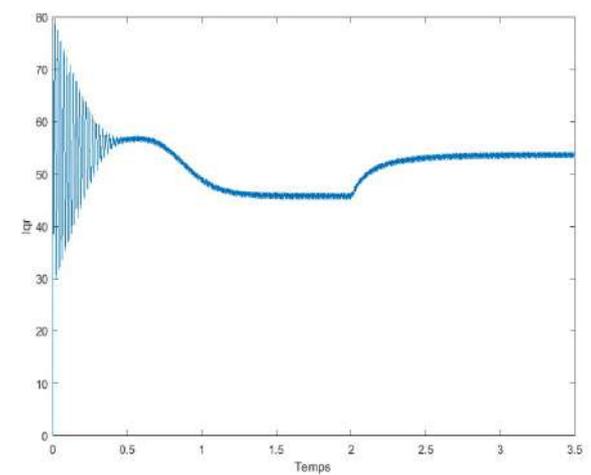
Figure(III.15) : courant statorique Iabc s1



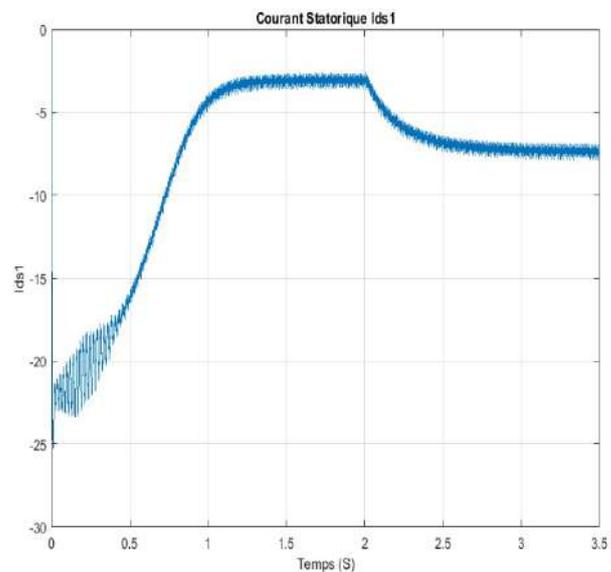
Figure(III.16) : courant statorique Iabc s2



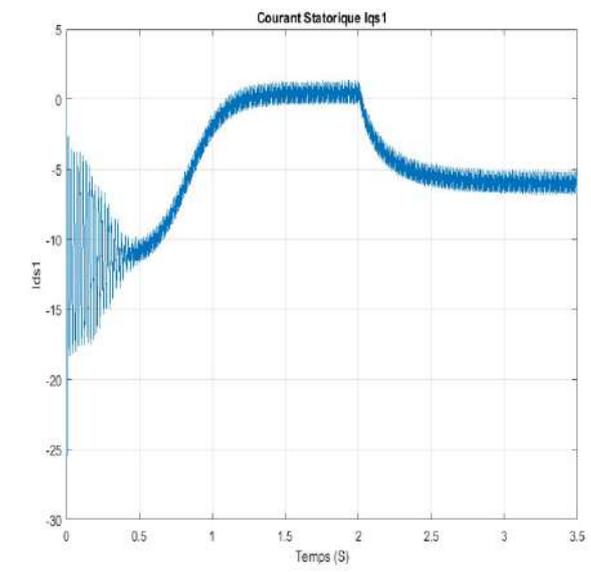
Figure(III.17) : courant rotorique Idr



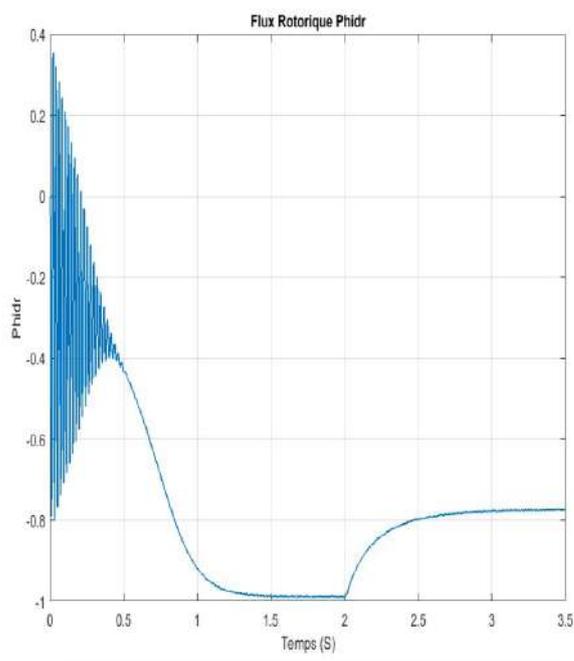
Figure(III.18) : courant rotorique Iqr



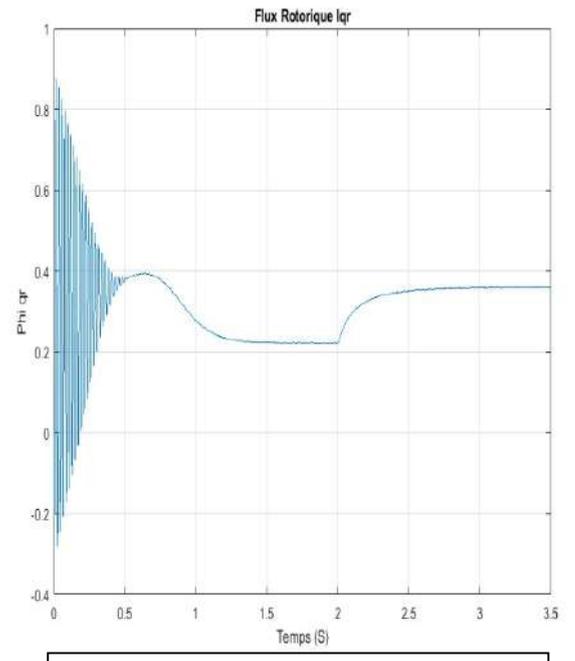
Figure(III.19) :courant statorique Ids1



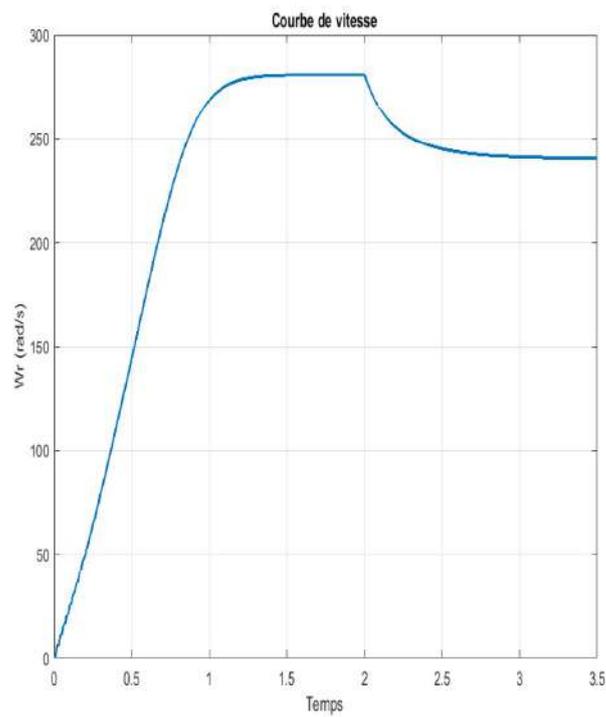
Figure(III.20) : courant statorique Iqs1



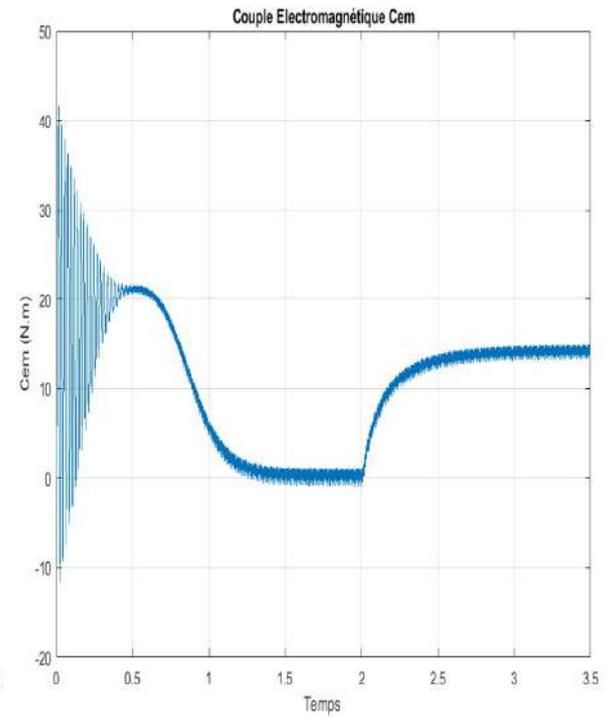
Figure(III.21) : flux rotorique ph idr



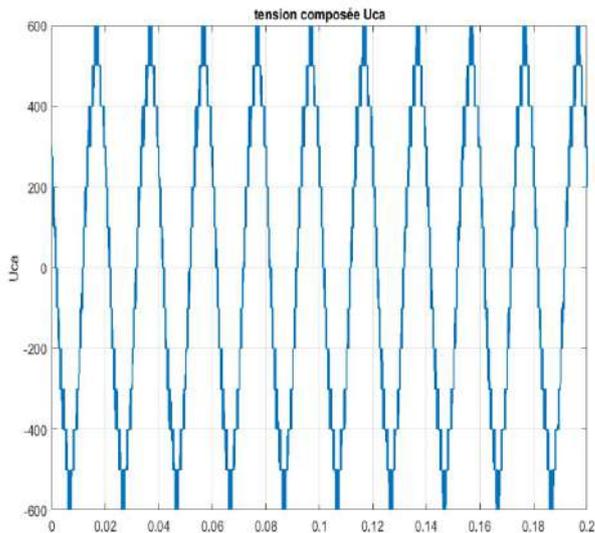
Figure(III.22) :flux rotorique phiqr



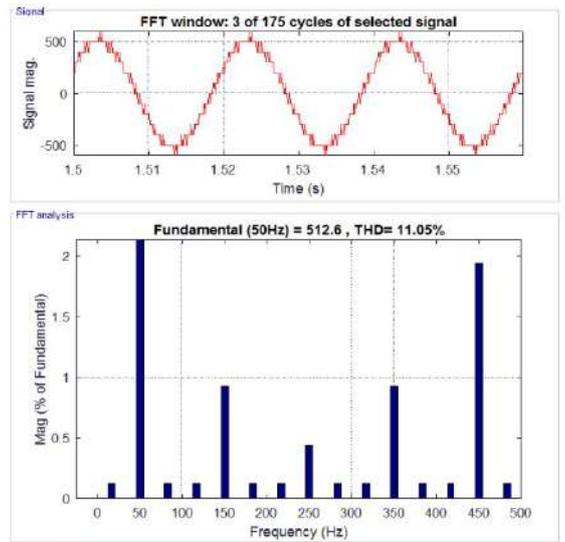
Figure(III.23) : courbe de vitesse



Figure(III.24) :couple electromagnetique

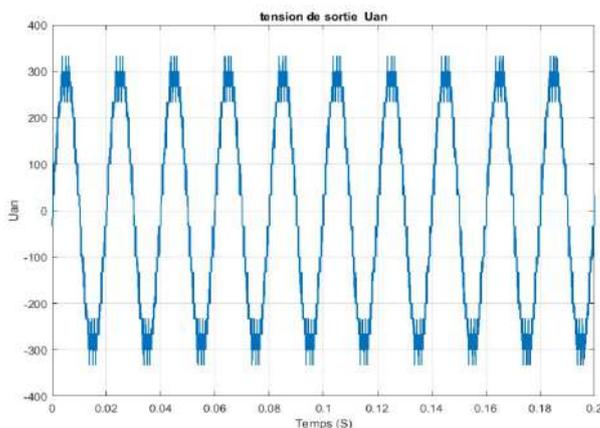


Figure(III.28) : tension composée Uca

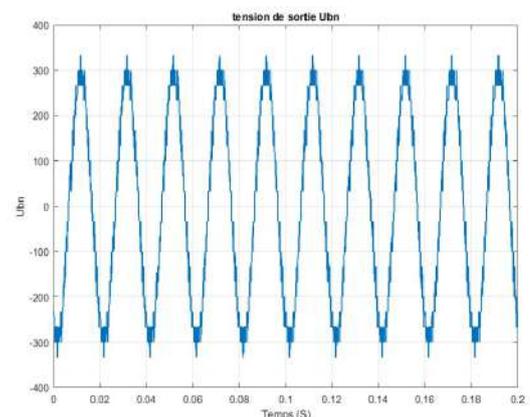


Figure(III.29) : spectre harmonique de tension

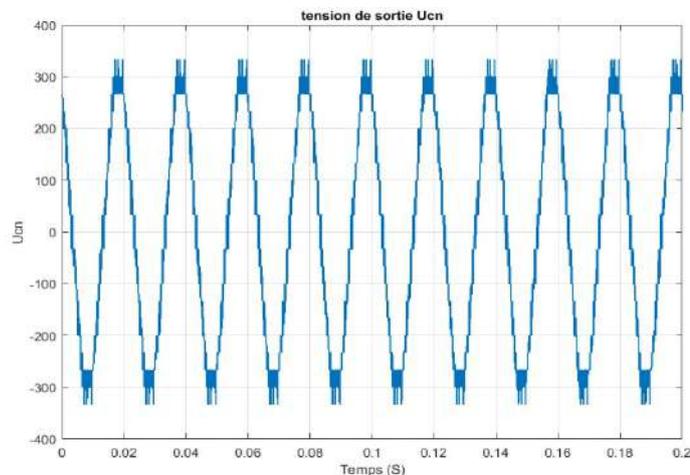
Le THD de la tension composée est de 11,05%. Les harmoniques quasinsuls par rapport au fondamental d'amplitude 512.6V, et on remarque une augmentation d'amplitude aux environs 10V.



Figure(III.30) :tension simple Uan



Figure(III.31) :tension simple Ubn



Figure(III.32) : tension simple Ucn

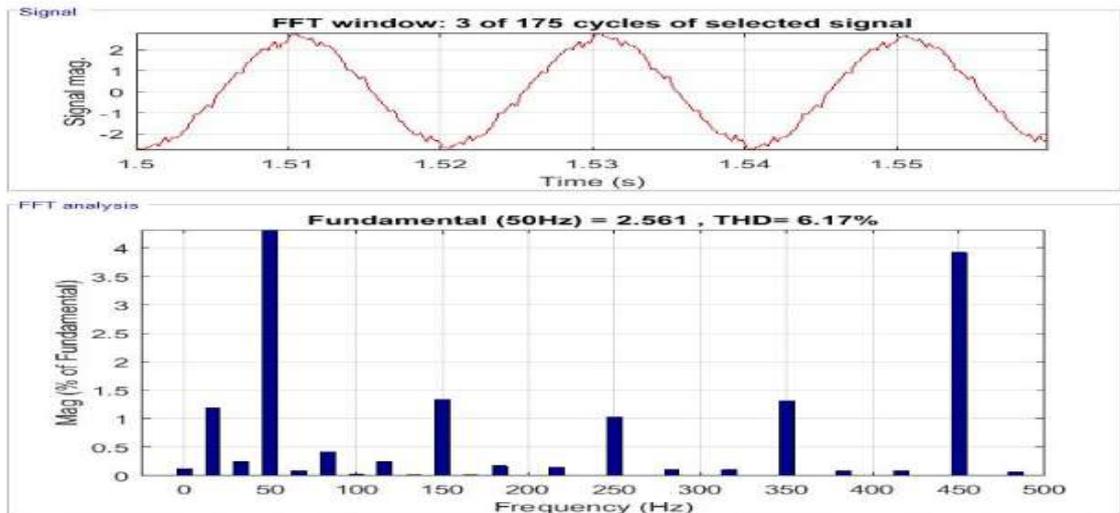
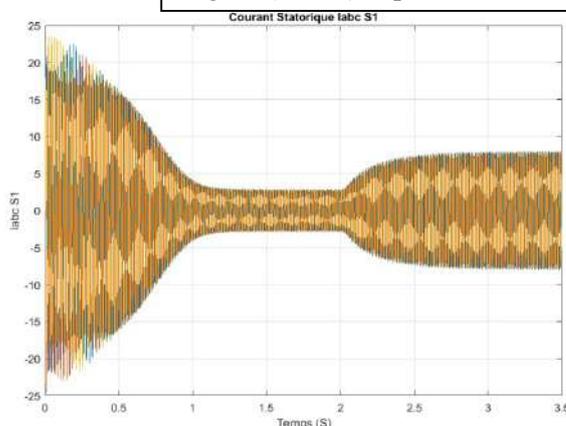
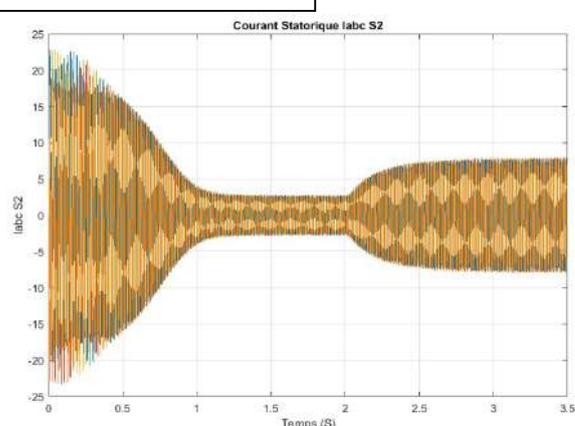


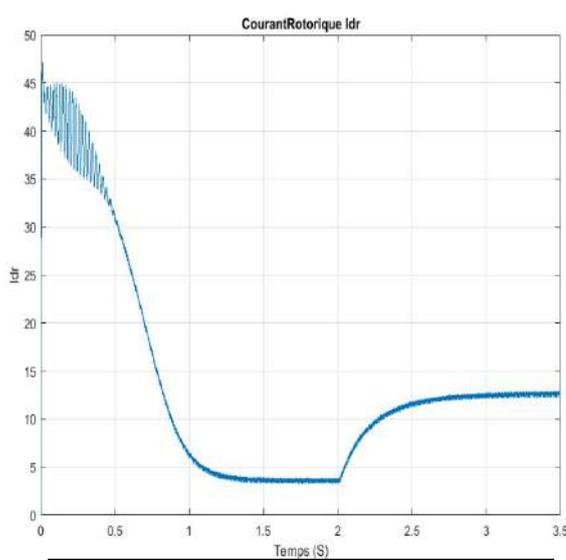
Figure (III.33) : spectre harmonique de courant



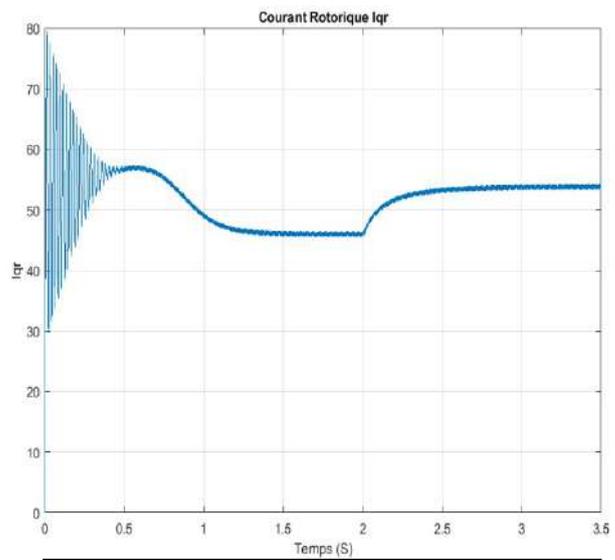
Figure(III.34) :courant statorique Iabc



Figure(III.35) : courant statorique Iabc s2



Figure(III.36) :courant rotorique Idr



Figure(III.37) :courant rotorique Iqr

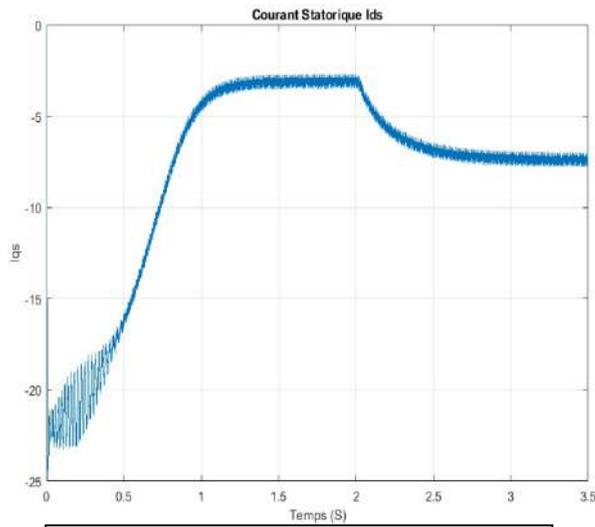
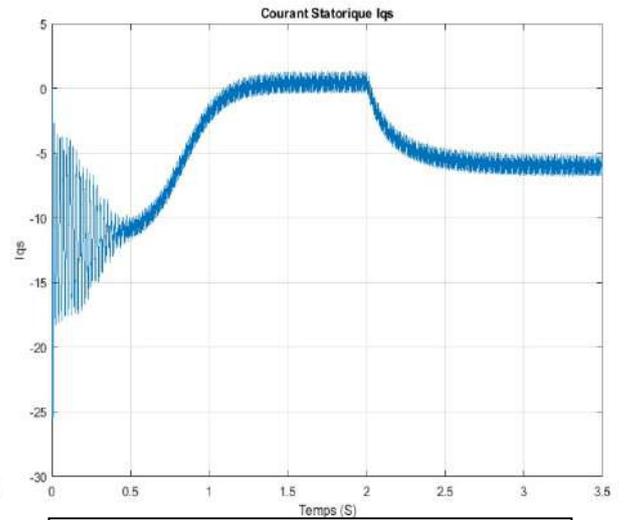
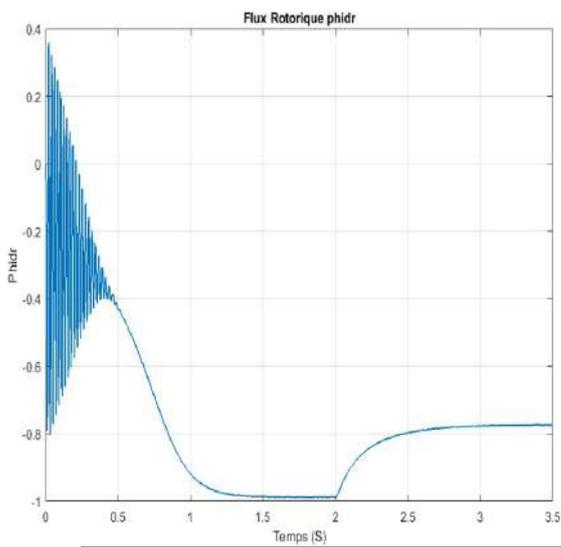


Figure (III.38) : courant statorique ids



Figure(III.39) :courant statorique iqs



Figure(III.40) :flux rotorique phidr

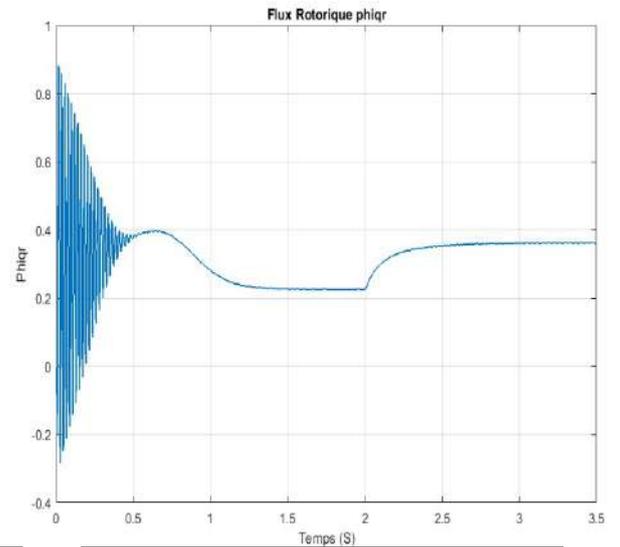


Figure (III.41) :flux rotorique phiqr

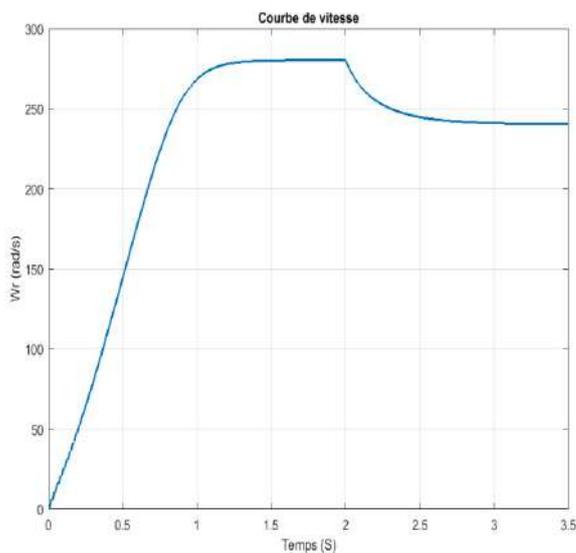


Figure (III.42) : courbe de vitesse

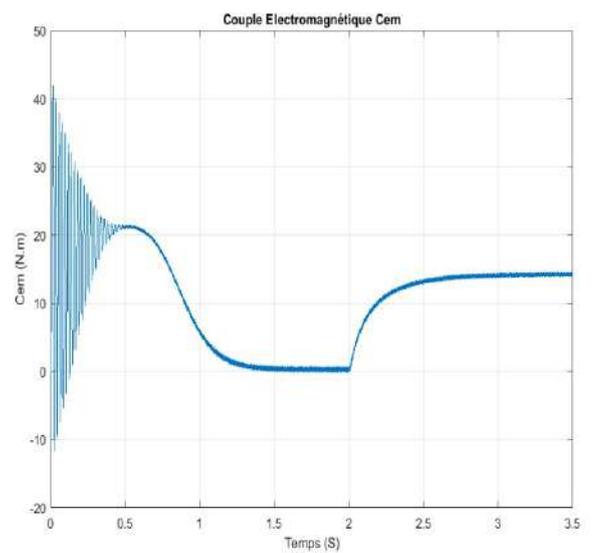


Figure (III.43):couple électromagnétique

Interprétation des résultats :

Dans cette illustration, on a utilisé quatre porteuses identiques, les résultats obtenus, nous ont décrit la forme d'onde du courant qui est plus au moins proche à la sinusoïdale.

III.10. Comparaison des résultats de simulation des onduleurs étudiés :

Le tableau montre bien et donne une idée générale sur la qualité de forme d'onde réelle avec sa composante fondamentale. Le facteur de distorsion [THD (%)] montre bien l'avantage du niveau. On remarque aussi que l'augmentation du niveau de l'onduleur permet d'améliorer le signal de sortie de l'onduleur,

Niveau de l'onduleur	5 niveaux		7 niveaux	
	Tension de Sortie	Courant de Sortie	Tension de Sortie	Courant de Sortie
THD en %	17.9	8.52	11.05	6.17

Tableau (III-2) : Facteurs de distorsion de chaque type d'onduleur.

En MLI et en comparant les spectres des différents onduleurs on remarque que lorsque le nombre de niveaux augmente, le THD diminue.

III.11. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté les études théoriques des deux catégories : Onduleurs Multiniveaux en série des ponts complets (trois niveaux, cinq niveaux), ainsi que la simulation. Si on augmente le niveau de l'onduleur, la forme de la tension de sortie V_s et du courant s'améliorent tandis que l'amplitude des harmoniques indésirables s'abaisse. Donc, on conclut que l'emploi d'un onduleur à un niveau aussi élevé est le meilleur choix.

CHAPITRE IV: LES ONDULEURS MULTI-NIVEAUX ASYMETRIQUES

IV.1. Introduction :

Les onduleurs de l'électronique de puissance gagnent en popularité pour diverses applications d'entraînements industriels. Au cours des dernières années, des applications moyennes tension de forte puissance ont également été installées. Cependant, les solutions existantes souffrent de certains inconvénients majeurs.

Le convertisseur multiniveaux hybride présente beaucoup d'avantages sur les autres topologies.

Ce type de structure est aussi appelé à juste titre « onduleur hybride ». Dans cette topologie dérivée de la précédente, le principe de mise en série de cellules de conversion est généralisé. Par degré d'hybridation croissant, on distingue trois types d'associations :

- La mise en série de pont en H alimentés avec des tensions de différentes valeurs.
- La mise en série d'onduleurs de topologies différentes (par exemple un onduleur NPC triphasé combiné avec des ponts en H monophasés.
- La mise en série de cellules de conversion de topologie et de nature différentes (par exemple pont en H et amplificateur linéaire comme pour la mise en série de ponts en H, la seule contrainte porte sur les alimentations des cellules qui doivent être isolées les unes des autres.

IV.2. Techniques de modulation et dimensionnement :

Un convertisseur multiniveau, qu'il soit symétrique ou asymétrique, ne peut être modulé que par un circuit adéquat permettant de définir les états d'enclenchement des différents dispositifs à semi-conducteurs de chaque cellule élémentaire.

Il s'agit cependant pour les montages asymétriques de respecter les propriétés liées à chaque technologie employée pour les cellules respectives.

Le dimensionnement des différentes valeurs des niveaux élémentaires devra être fait en considérant les complémentarités existant entre des technologies différentes, c'est-à-dire par exemple les tensions de blocage des dispositifs de chaque cellule. On pourra combiner dans des cellules associées l'utilisation de la technologie(IGBT) et de la technologie (MOSFET), la première étant mieux adaptée à la réalisation des niveaux « élevés », et la seconde à la réalisation des niveaux plus faibles.

Lors de l'utilisation de convertisseurs à trois cellules, on peut exploiter également des techniques telles que celle de l'IGCT, à blocage encore plus élevé, mais avec une rapidité de commutation plus faible.

IV.3. Nombre de niveaux atteignables :

L'intérêt de réaliser des convertisseurs à niveaux multiples réside dans leur capacité à générer des formes d'ondes de très bonne qualité, et de définition temporelle augmentée. Ces propriétés sont liées à de nombreux avantages, à commencer par la réduction des harmoniques de courant produites dans le circuit interfacé.

Pour les convertisseurs multiniveaux à étages symétriques, il est évident que l'on ne peut que générer par somme un nombre d'états égal à un multiple de la valeur d'un niveau élémentaire, auquel s'ajoute un niveau égal à zéro.

La différence entre deux niveaux quant à elle est toujours égale à zéro. En choisissant une répartition des amplitudes des cellules élémentaires de façon asymétrique, il devient possible de générer des valeurs supplémentaires, notamment en utilisant des valeurs de différences non nulles.

IV.4. Alimentation des onduleurs multiniveaux asymétriques :

Tout comme pour les onduleurs multiniveaux symétriques, la principale difficulté des onduleurs multiniveaux asymétriques réside dans la réalisation d'une alimentation performante, les alimentations des cellules devant être isolées les unes des autres.

Le problème est même plus délicat, car il peut y avoir une circulation de puissance entre les cellules.

IV.5. Variantes d'onduleurs multiniveaux asymétriques :

Pour réduire le nombre d'alimentations nécessaires, dans le cadre d'applications de type alimentation de moteur, K.A. Corzine propose d'utiliser un moteur dont les bornes des phases sont accessibles [20, 21]. De cette manière, si les bobinages des phases ne sont pas reliés entre eux, par exemple par un couplage étoile, il est possible d'alimenter le moteur avec deux onduleurs triphasés connectés chacun d'un côté des enroulements, comme illustré à la Fig. IV.1.

Les deux convertisseurs fournissent chacun une part de la tension du moteur. Ce type de connexion permet de limiter le nombre d'alimentations isolées à deux, alors que la mise en série de cellules en sortie d'un convertisseur triphasé en nécessite 4. Cela ne change pas la puissance moyenne fournie à la charge, mais cela permet de limiter un peu la circulation de puissance entre les alimentations des différentes phases. De manière tout à fait similaire à ce qui est fait dans cette étude, X. Kou constate qu'il est possible d'utiliser un rapport 4 entre les tensions d'alimentation de ces deux onduleurs triphasés

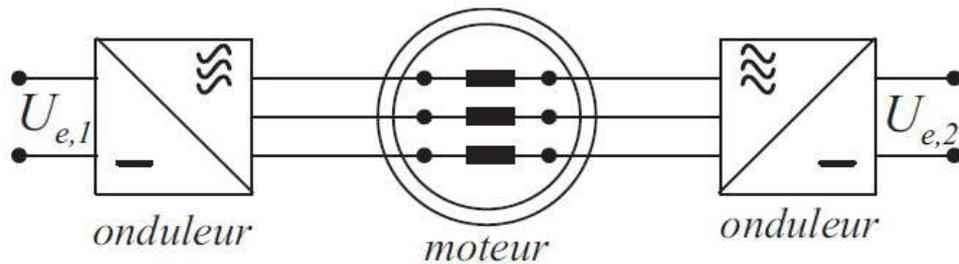


Figure (IV.1) : Schéma de la structure asymétrique proposée par K.A. Corzine. X. Kou propose d'utiliser $U_{e,2} = 4U_{e,1}$.

IV.6. Propriétés des principales structures :

IV.6.1. Classification des topologies selon leur alimentation :

Les topologies telles que les onduleurs NPC et les onduleurs à cellules imbriquées divisent leur tension d'alimentation : la tension de sortie est plus petite ou égale à la tension continue d'entrée. Elles sont capables de fonctionner à partir d'une alimentation continue unique. Au contraire, les structures telles que les onduleurs à cellules en série élèvent leur tension d'alimentation : la tension de sortie maximale est plus grande que chacune des tensions d'alimentation ; elle est plus petite ou égale à la somme des tensions d'alimentation. Contrairement aux autres topologies, les alimentations des cellules ne peuvent pas être obtenues à partir d'une alimentation continue unique sans mettre en place des convertisseurs additionnels. Dans la plupart des cas, il faut recourir à des transformateurs pour obtenir les alimentations nécessaires. Le couplage parallèle des transformateurs du « côté alimentation » et l'addition des tensions « côté charge » conduit à une élévation de la tension.

IV.6.2. Stratégies de commande des onduleurs multiniveaux :

Les stratégies de commande des convertisseurs multiniveaux sont adaptées de celles qui sont appliquées aux convertisseurs à deux niveaux. Dans cette section, nous présentons quelques une d'entre elles.

IV.6.2.1. Commande par paliers :

La méthode de commande par paliers consiste à quantifier la grandeur de référence (l'image du fondamental), en un nombre déterminé de paliers, comme l'illustre la figure (IV.2).

Cette méthode de commande offre deux degrés de liberté à l'utilisateur :

Le convertisseur peut être à pas uniforme, dans ce cas les tensions $E_1 = E_2 = E_3 = E$. Les angles de commutations α_i sur une période ($\alpha_i, i = 1 \dots \alpha/2$) peuvent donc être choisis de façon à atteindre certaines performances.

Le pas de la tension et les angles de commutation peuvent être choisis afin de pouvoir obtenir la minimisation du taux de distorsion harmonique, la suppression de certaines harmoniques à basses fréquences entre autres.

Cette commande est facile à implémenter et pour passer d'un niveau de tension à l'autre les angles de commutation peuvent être déterminés à l'avance.

Dans cette technique de commande, on constate que les différentes cellules n'ont pas une même durée de conduction. Il en résulte donc un déséquilibre dans la répartition des pertes par commutation et par conduction. Par une rotation adéquate des commutations, ces pertes peuvent être équilibrées entre les différentes cellules, sans modification de l'onde de tension générée à la sortie du convertisseur.

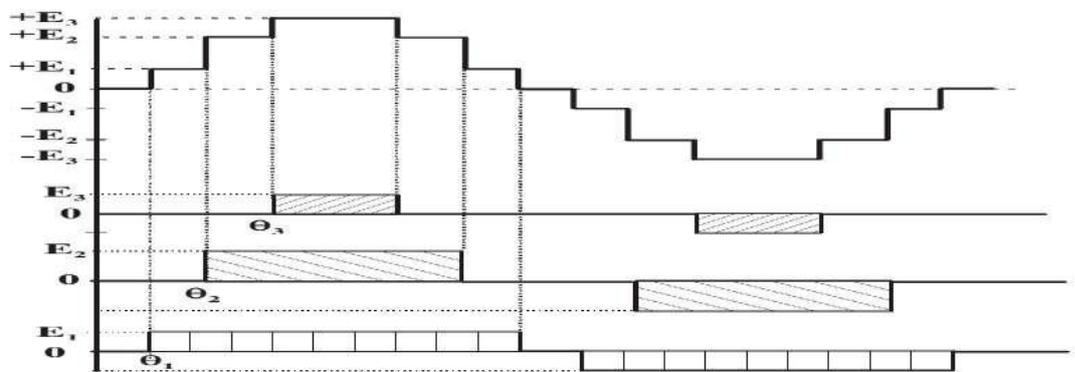


Figure.(IV.2). Forme d'onde multiniveau (7niveaux) générée par une commande par paliers et tensions aux bornes de trois cellules en série sur une phase.

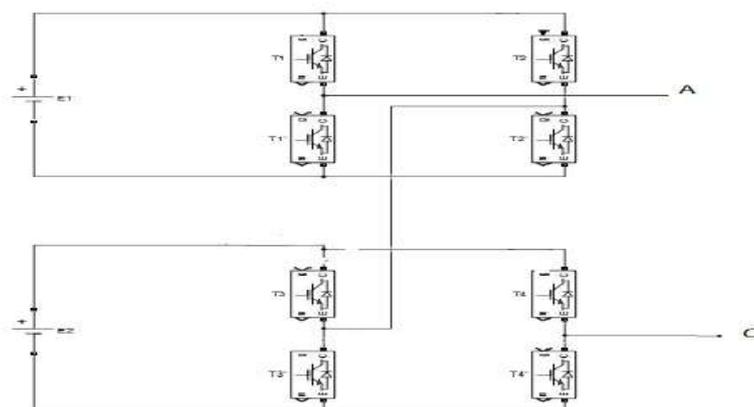


Figure (IV.3). Onduleur asymétrique en pont H complet en cascade

IV.7. Terminologie des convertisseurs multiniveaux :

L'approche terminologique que nous proposons dans cette section facilite et rend uniforme le design des convertisseurs multiniveaux

IV.7.1. Concept de dissymétrie totale :

Nous entendons par "coefficient de dissymétrie totale". λ_j , le rapport entre la tension contenue U_{dj} aux bornes d'un onduleur partiel de rang j ($j=1\dots k$) sur une phase, et la tension totale U_e que peut délivrer le convertisseur.

$$\lambda_j = U_{dj} / U_e, \quad \forall j = 1 \dots k$$

$$U_e = 2 \cdot \sum U_{dj}$$

IV.7.2. Concept de dissymétrie partielle :

Le concept de dissymétrie partielle caractérise le rapport entre les tensions qui alimentent deux onduleurs partiel de rang consécutifs. Nous notons δ_{jh} le "coefficient de dissymétrie partielle" entre les convertisseurs de rang $j=h-1$ et $j=h$.

$$\delta_{jh} = U_{dh} / U_{d(h-1)}, \quad \forall h = 2 \dots k$$

IV.7.2. Concept de dissymétrie partielle:

Jusqu'à présent, la plupart des investigations publiées sur la topologie de convertisseurs multiniveaux de type cascade considèrent des coefficients identiques, tels que :

$$\lambda_1 = \lambda_2 = \dots = \lambda_k = n - 1 \quad (\text{IV.4})$$

$$\delta_2 = \delta_3 = \dots = \delta_k = 1 \quad (\text{IV.5})$$

Les équations (3-4) et (3-5) caractérisent un convertisseur multiniveaux symétriques

IV.7.4. Onduleurs multiniveaux asymétrique :

Des lors que l'un au moins des coefficients λ_j est différent des autres, alors le convertisseur est considéré comme étant asymétrique. Dans ce cas, un au moins des coefficients δ_h est différent de 1, ainsi la topologie hybride proposée par M.D.Manjrekar et T.A Lipo, correspond à un convertisseur multiniveaux asymétrique.

IV.7.5. Onduleurs multiniveaux à pas uniforme :

A la figure (IV.4)), nous avons représenté la forme de la tension généralement obtenue à la sortie d'un convertisseur multiniveaux quelconque si correspond à la différence de potentiel entre la phase i ($i = 1\dots 3$) et le point neutre du convertisseur.

Les valeurs $(U_{si})_1, (U_{si})_2, \dots, (U_{si})_n$. correspondent aux niveaux possibles de U_{si} . Le convertisseur est dit à pas uniforme ou régulier si la différence entre deux niveaux consécutifs est constante. Autrement dit :

$$(U_{si})_1 - (U_{si})_2 = \dots = (U_{si})_{n-1} - (U_{si})_n \quad (\text{IV-6})$$

Dans ce cas, les coefficients de dissymétrie totale peuvent se mettre sous la forme de fractions irréductibles, comme le montre la relation (3.7) :

$$\lambda_j = N_j / \omega, \text{ avec } N_j \in \mathbb{N}^* \quad (IV.7)$$

Si on suppose que les onduleurs partiels sont arrangés de façon que $U_{dh} \geq (h-1)U_1$, alors les coefficients de dissymétrie partielle sont des entiers naturels non nul.

$$\delta_h \in \mathbb{N}^*, \forall h = 2..k \quad (IV.8)$$

Dans le cas contraire, le convertisseur est dit à pas irrégulier ou à pas non uniforme,

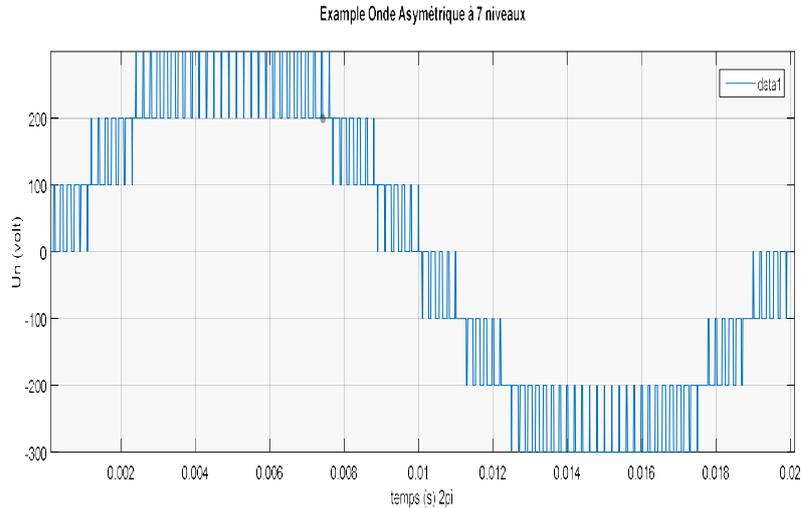


Figure (IV.4) : Exemple Sortie Bras onduleur asymétriques à 7 niveaux

IV.7.6. Les onduleurs multiniveaux hybrides :

L'onduleur multiniveau triphasé hybride est spécialement dédié grâce à la mise en série ou en parallèle d'onduleurs de base. Les modèles hybrides peuvent être générés. A l'entraînement des moteurs synchrones et asynchrones de grande puissance à tension moyenne. La combinaison réelle de différentes topologies est basée sur les méthodes de la théorie des graphes. Les topologies hybrides permettent d'améliorer la qualité de puissance et l'augmentation de nombre de niveau de la tension en utilisant moins de sources de tension continue à l'entrée et moins de commutations.

Trois types d'hybridation sont développés dans l'industrie :

- Hybridation en pont, généralement entre onduleurs de même nature (Figure (IV..4)) ;
- Hybridation en cascade, les topologies fournissent un effet multiplicateur du nombre de niveaux selon le modèle de structuration (Figure (IV..5)) (objet de notre simulation)
- Hybridation côte-à-côte pour alimenter deux charges (Figure (IV.-6)),

IV.7.6.1. Stratégie de modulation :

Dans cette section, nous rappelons brièvement le principe de deux stratégies de modulations : la modulation par gradins ou par paliers, et la modulation hybride, qui combine la précédente

et celle basée sur la modulation à largeur d'impulsions. Le but est d'analyser pour chacune d'entre-elles, les commutations sur chaque cellule partielle du convertisseur.

Cette analyse aboutit à l'expression analytique des tensions à la sortie de chaque cellule partielle. Ce qui permettra une analyse précise de l'échange énergétique entre cellules. Ces expressions seront également exploitées pour la détermination du courant dans les bus continus, ainsi qu'une modélisation de l'effet de la tension du mode commun sur le transformateur triphasé multi-enroulement.

IV.7.6.2. Modulation par gradin :

Cette méthode de modulation consiste simplement à générer à la sortie du convertisseur multi-niveau, une tension par palier non modulée. Cette tension correspond à la valeur quantifiée de la référence sinusoïdale (image désirée du fondamental). Si le convertisseur est à pas uniforme, alors on a $E1 = E2 = \dots = EK = Ud1$, [23].

IV.7.6.3. Modulation hybride :

La modulation hybride, proposée dans, [33] combine la modulation par gradins et la modulation sinusoïdale par largeur d'impulsions. La cellule ayant la plus grande tension u_k interviendra si le signal de référence est supérieur à la somme des autres tensions continues.

Tant que cette condition n'est pas vérifiée, la tension U_{pk} restera nulle. Et l'onduleur suivant n'interviendra à son tour que si le signal de référence est supérieur à la somme des autres tensions continues, et ainsi de suite. La dernière référence quant à elle est comparée à un triangle.

Cette façon de procéder revient simplement à utiliser des comparateurs avec un seuil de commutation en amplitude fixe en fonction de l'amplitude souhaitée pour chaque cellule partielle. Le générateur de connexion convertit le signal désiré à la sortie du convertisseur en impulsions de commande des interrupteurs de puissance.

Les tensions d'alimentation sont normalisées par rapport à l'amplitude maximale de la tension d'une phase du convertisseur.

IV.7.7. Onduleur multiniveaux asymétrique monophasé :

La structure monophasée de l'onduleur multi-niveaux asymétrique est représentée sur la figure (IV-5). Pour cet onduleur, deux cellules à pont complet monophasé et deux alimentations indépendantes sont utilisées ($k=2$),

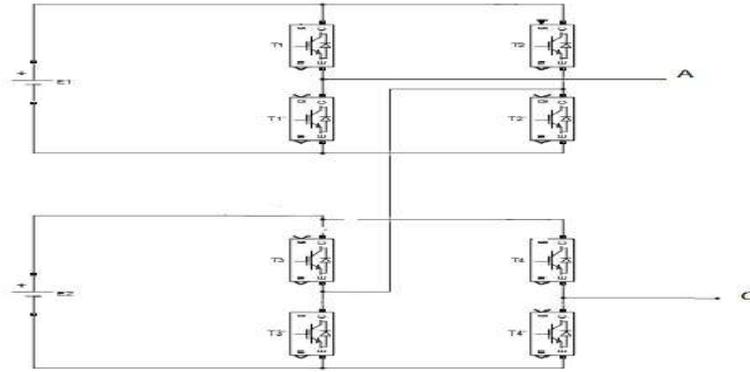


Figure (IV-5) : Structure monophasée d'un onduleur cascade à deux cellules

IV.7.7.1. Principe de fonctionnement :

Les **Tableaux 1, 2 et 3** proposent, à titre d'exemple, trois possibilités. La première d'entre elles utilise des alimentations égales, la deuxième utilise un facteur 2 entre les deux alimentations, alors que la troisième un facteur 3. L'analyse fonctionnelle montre clairement l'existence de plusieurs possibilités dans le choix des combinaisons pour obtenir la majorité des niveaux de la tension simple de sortie [1].

$U1=E/2, U2=U1=E/2$		
V_{d1}	V_{d2}	V_{AO}
$E/2$	$E/2$	E
$E/2$	0	$E/2$
0	$E/2$	
$E/2$	$-E/2$	0
0	0	
$-E/2$	$E/2$	$-E/2$
$-E/2$	0	
0	$-E/2$	$-E$
$-E/2$	$-E/2$	

Tableau (IV.1): Première possibilité d'alimentation des deux cellules à ponts complets (5 niveaux)

Pour ces trois possibilités, avec le choix, le convertisseur est susceptible de générer un nombre de niveaux tel que [3, 4]:

$$n = (2^{K+1} - 1)_{K=2} = 7$$

Ou

$$n = 2 * (1 + 2) + 1 = 7$$

Ce qui est largement supérieur à un convertisseur multi-niveaux symétrique, ayant le même nombre d'onduleurs en série par phase.

Le nombre correspondant de niveaux pour $\delta=3$ est donné par :

$$n = (3^K)_{K=2} = 9$$

ou

$$n = 2 * (1 + 3) + 1$$

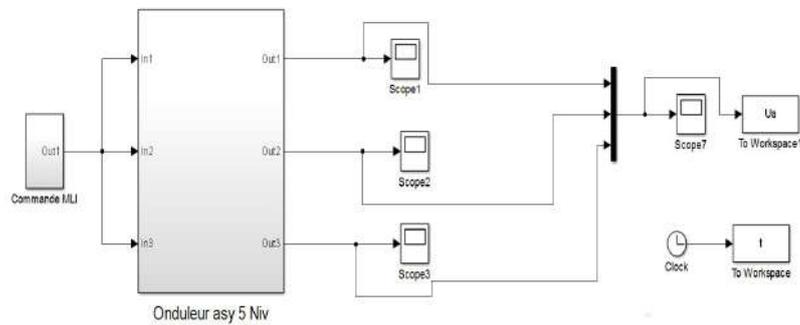
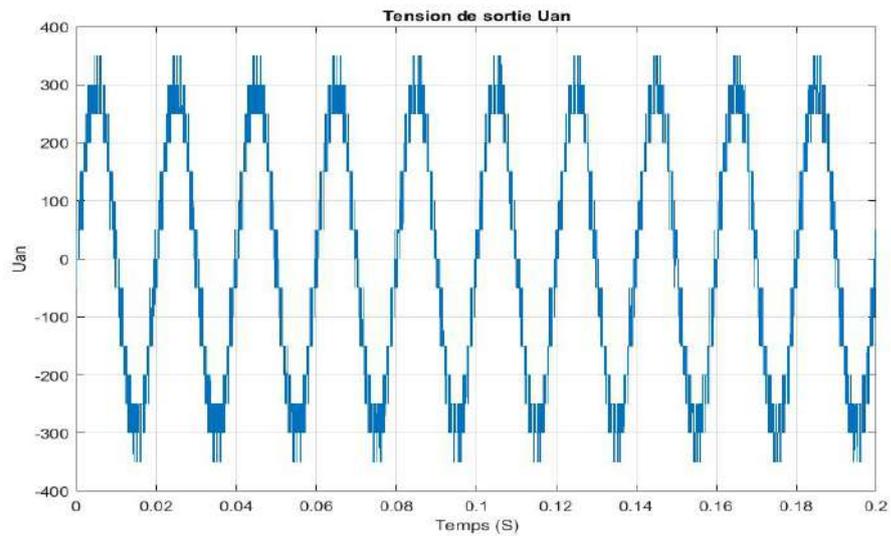


Figure 6 : Schéma Bloc de l'onduleur Asymétrique à 5 niveaux



Figure(IV.7) :Sortie onduleur asymétrique à 5 niveaux

Le nombre de niveaux de la tension simple U_{an} atteint 15 avec un pas uniforme entre les niveaux.

U1=E/3, U2=2U1=2E/3		
V_{d1}	V_{d2}	V_{AO}
E/3	2E/3	E
0	2E/3	2E/3
-E/3	2E/3	E/3
E/3	0	
0	0	0
E/3	-2E/3	-E/3
-E/3	0	
0	-2E/3	-2E/3
-E/3	-2E/3	-E

U1=E/4, U2=3U1=3E/4		
V_{d1}	V_{d2}	V_{AO}
E/4	3E/4	E
0	3E/4	3E/4
-E/4	3E/4	E/2
E/4	0	E/4
0	0	0
-E/4	0	-E/4
-E/4	-3E/4	-E/2
0	-3E/4	-3E/4
-E/4	-3E/4	-E

Tableau(IV.2): Deuxième possibilité d'alimentation des deux cellules à ponts

Tableau(IV.3): Troisième possibilité d'alimentation des deux cellules à ponts

Cette valeur correspond au nombre de niveaux maximum que l'on peut obtenir pour cette topologie de convertisseurs multi-niveaux. La figure (IV.5) représente un onduleur multi-niveaux asymétrique de type cascade à cinq, à sept ou à neuf niveaux, selon les rapports entre les tensions d'alimentation.

IV.8. Conduite de la machine MASDE par un onduleurs ont en H à 5 niveaux

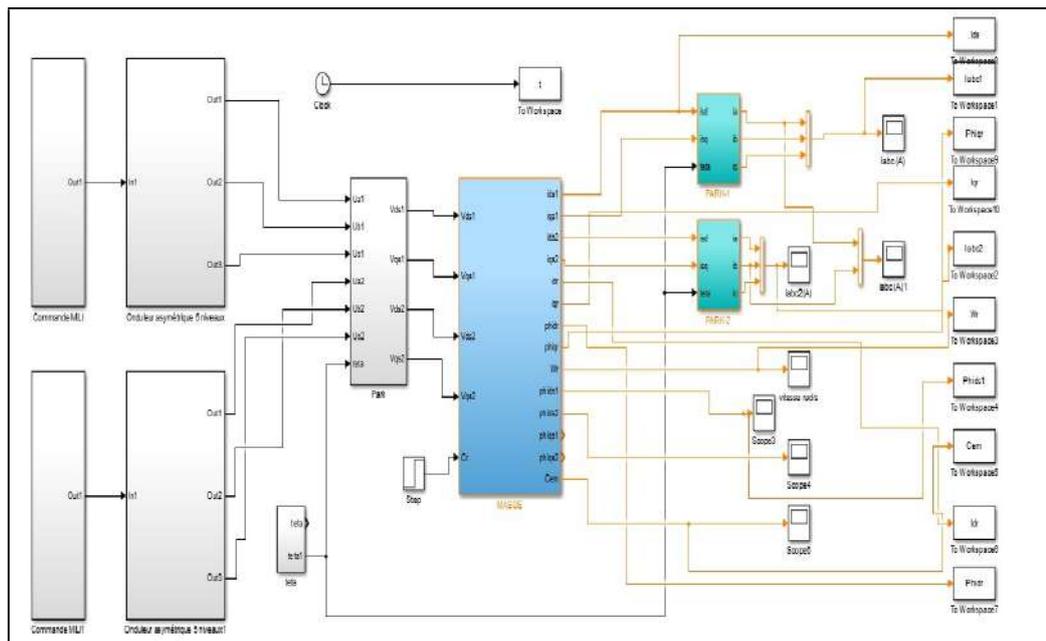


Figure (IV.7-1) : Bloc de simulation Onduleur asymétrique 5 niveaux associé à la MASDE
Résultats de la simulation :

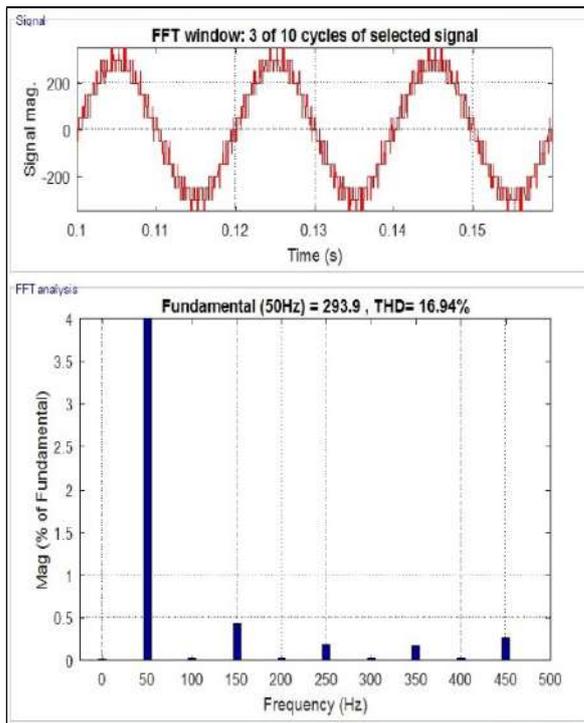
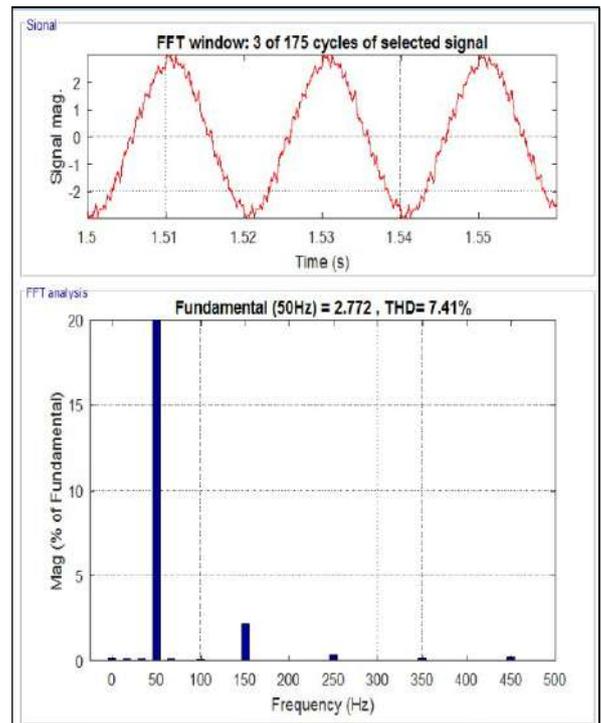
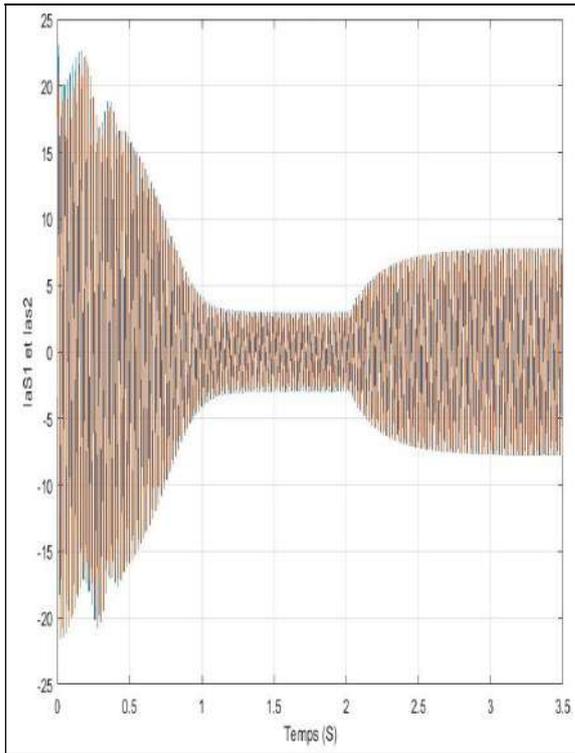


Figure (IV.8) : spectre harmonique de tension

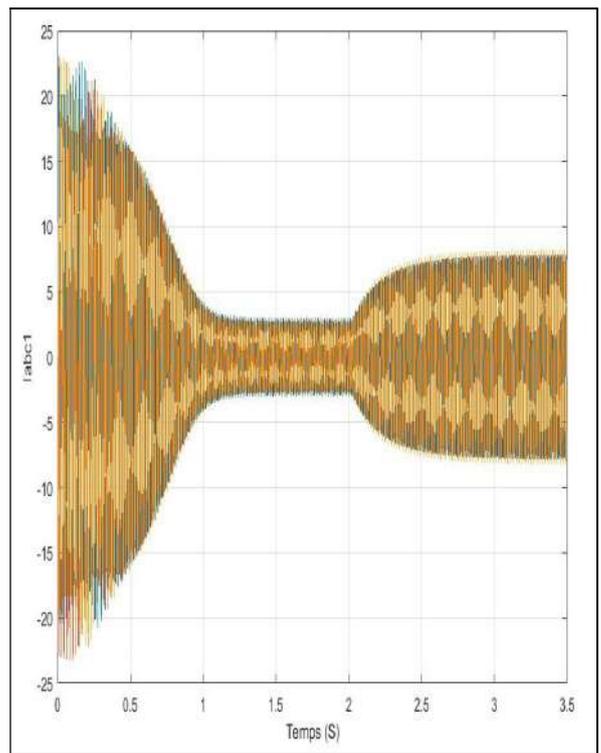


Figure(IV.9) : THD du courant

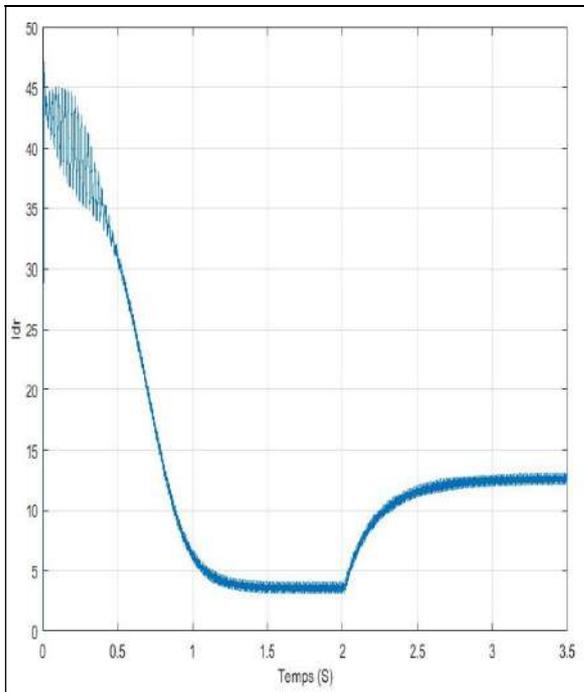
Le THD de la tension composée est de 16,94%. Comme pour la tension simple, les harmoniques de la tension composée sont quasi nuls où commence à apparaître des harmoniques d'amplitude d'environ 15V.



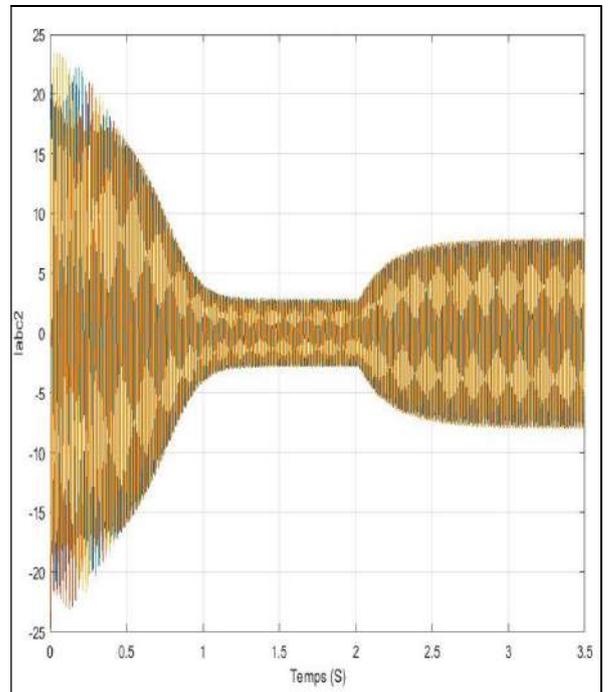
Figure(IV.10) : spectre courant statorique Ias1



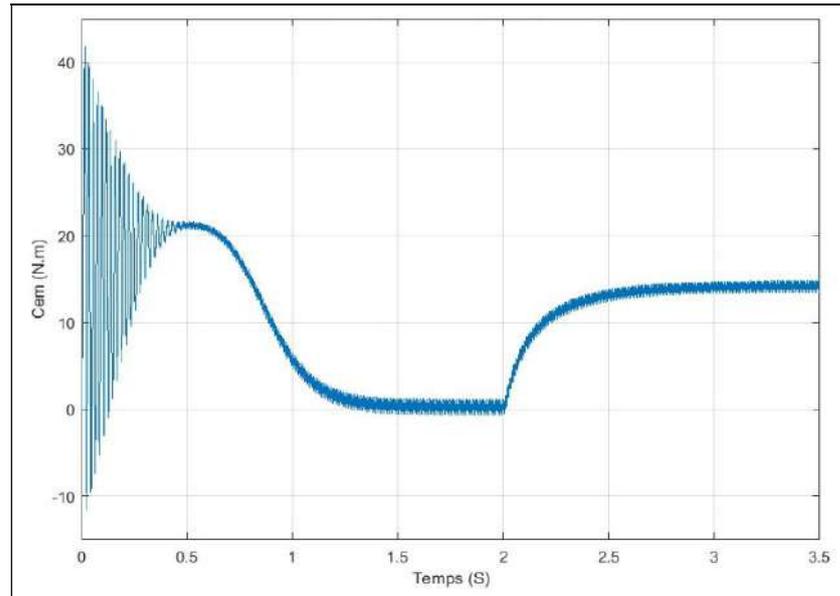
Figure(IV.11):Courant Statorique Iabc1



Figure(IV.12) : Courant rotorique Idr



Figure(IV.13) : courant statorique Iabc2



Figure(IV.14) :Couple électromagnétique

La largeur d'ondulation du couple est diminuée par rapport à celle de l'onduleur en pont en H à 5 niveaux.

IV.9. Conduite de la machine MASDE par un onduleur ont en H à 7 niveaux : Résultats simulation

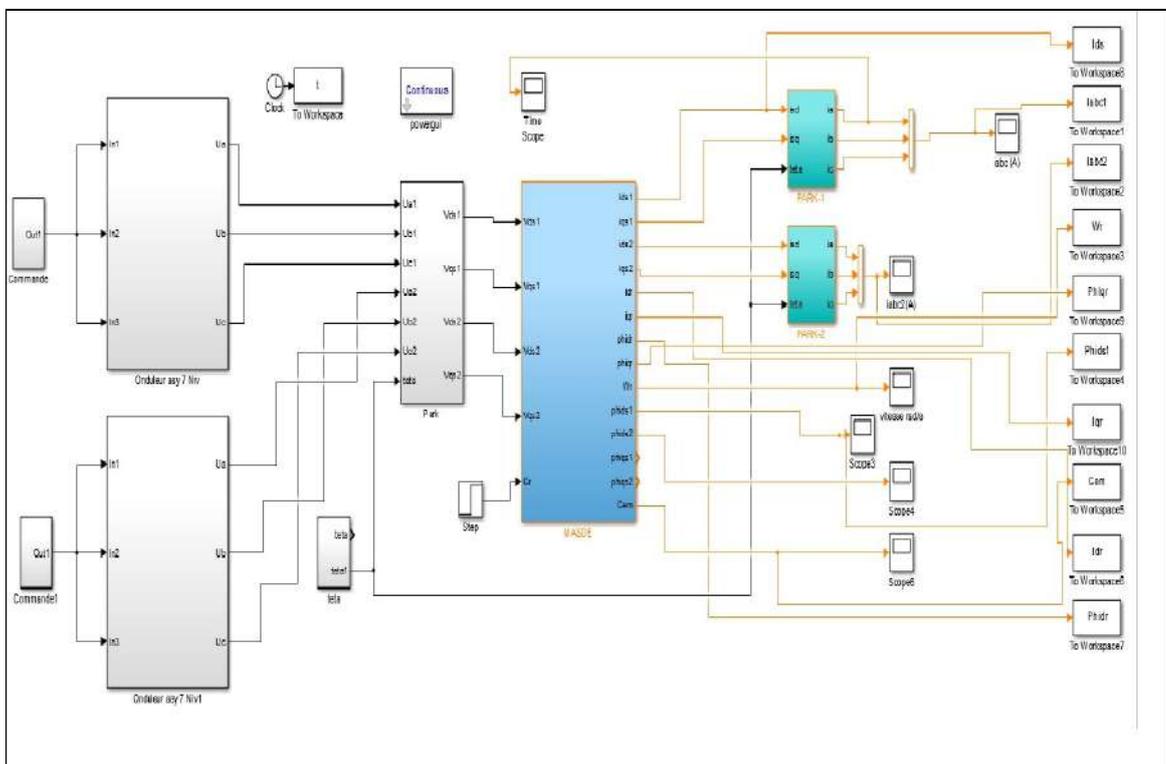
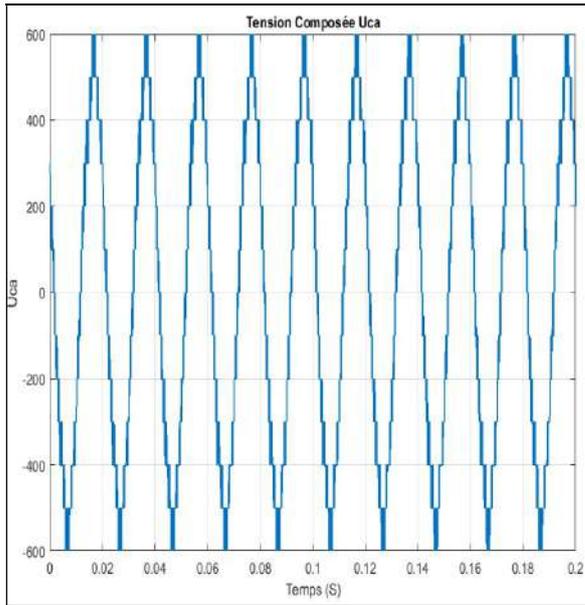
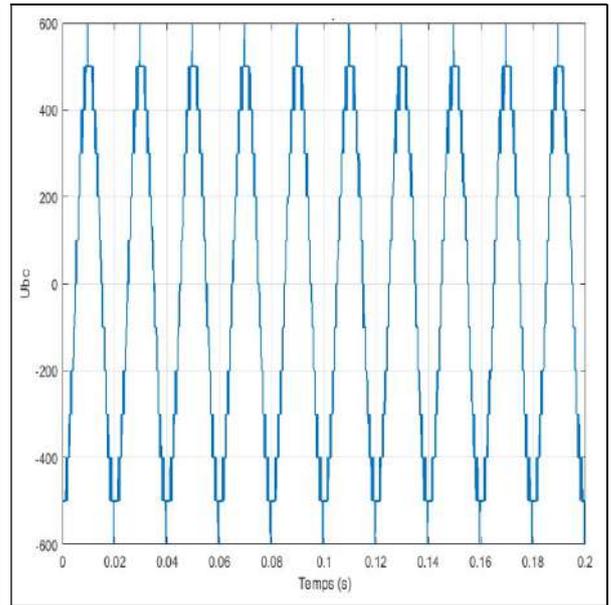


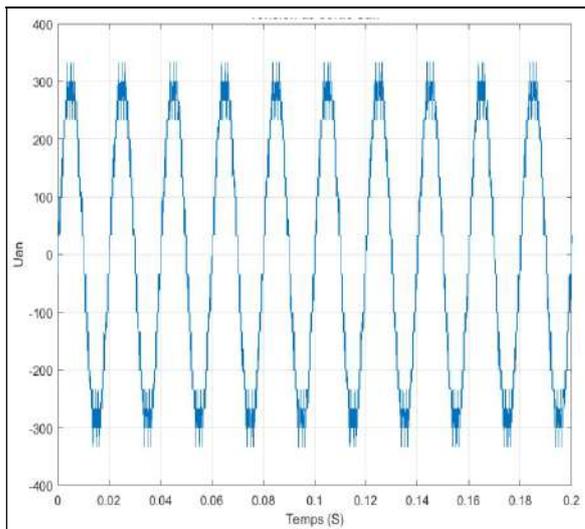
Figure (IV.15) :Bloc de simulation Onduleur asymétrique 7 niveaux associé à la MASDE



figure(IV.16) :tension composé Uca



figure(IV.17) :tension composé Ubc



Figure(IV.18) : tension simple Uan

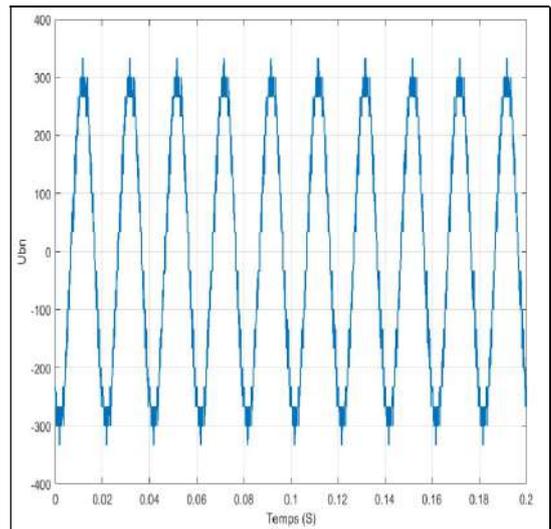


Figure (IV.19) : tension simple Ubn

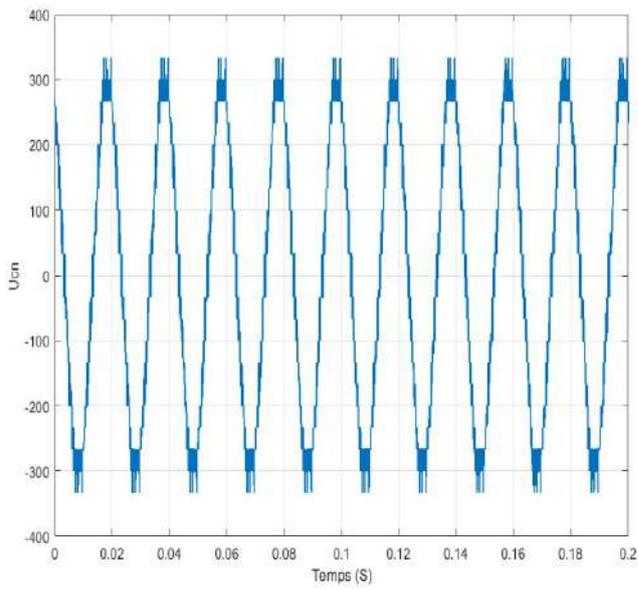
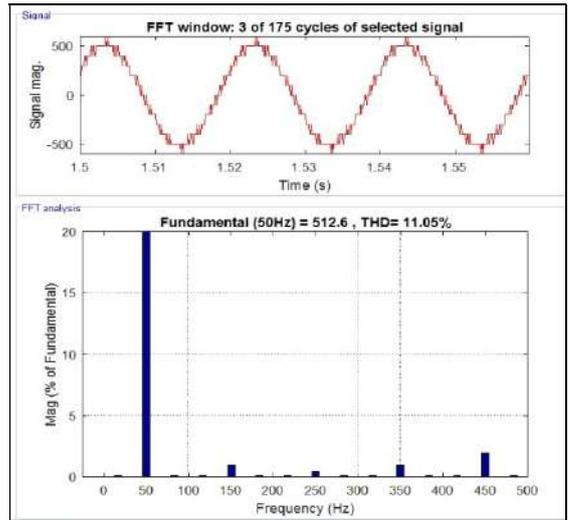
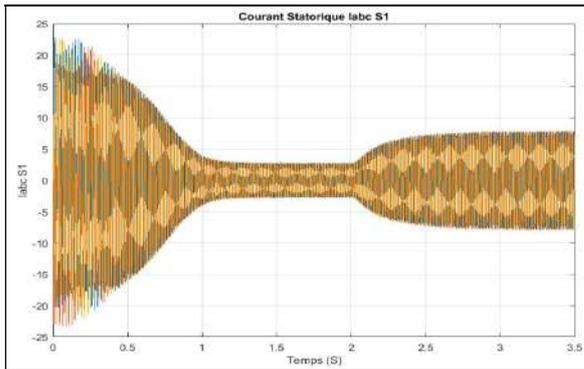


Figure (IV.20) : tensions Ucn



Figure(IV.21): spectre harmonique tension



Figure(IV.22) : courant Iabc s1

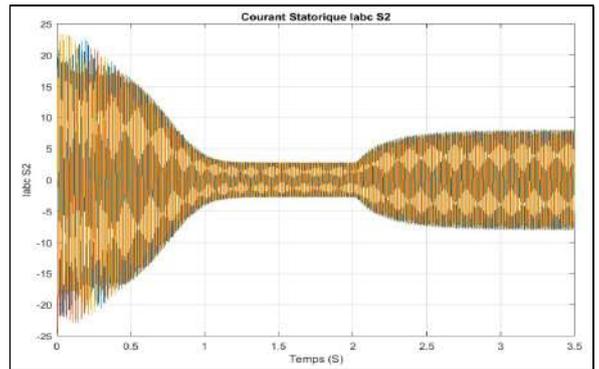


Figure (IV.23) :courant Iabc s2

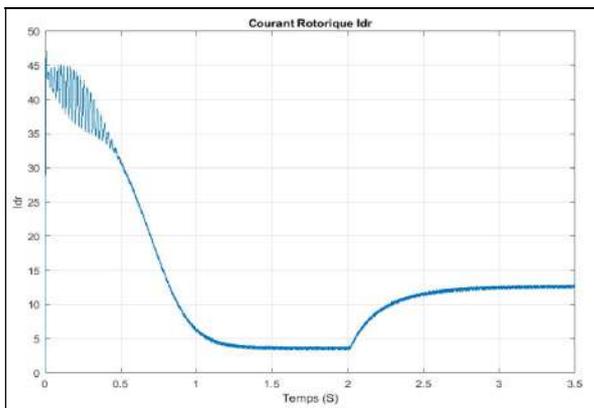


Figure (IV.24) :courant rotorique Idr

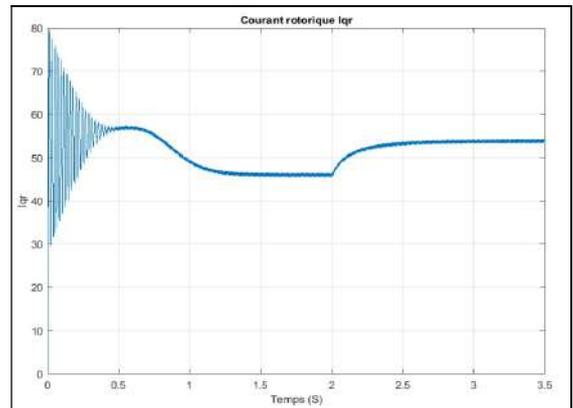
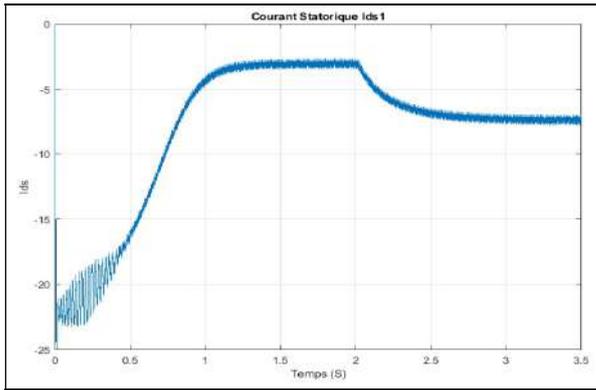
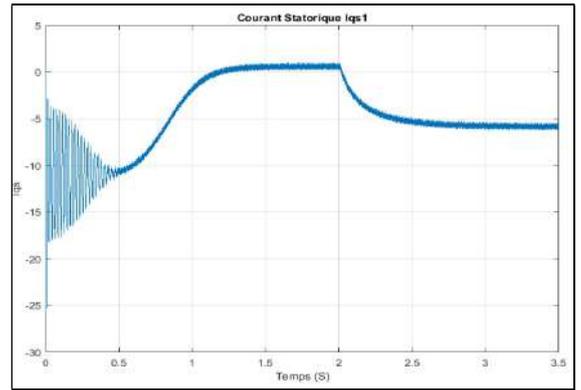


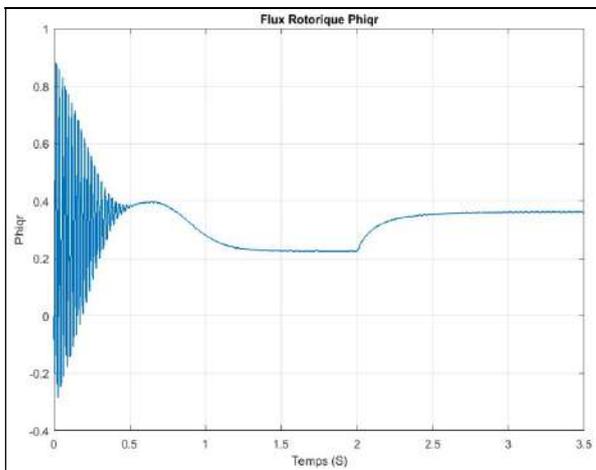
Figure (IV.25) :courant rotorique Iqr



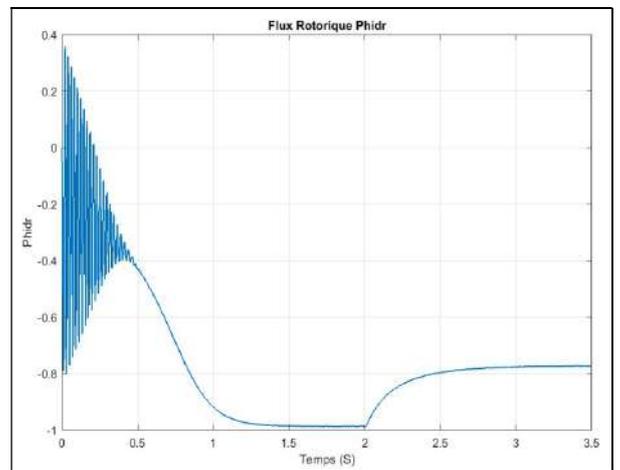
Figure(IV.26) : courant statorique Ids1



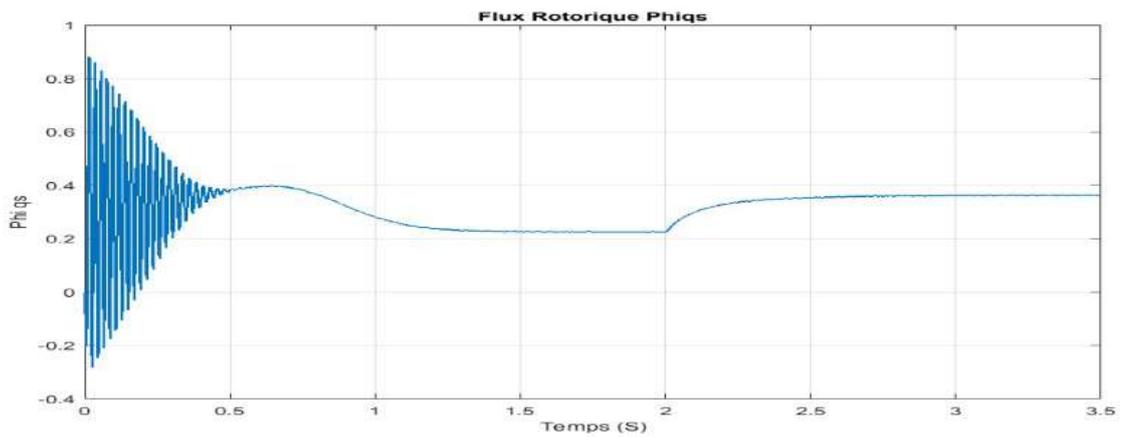
Figure(IV.27) : courant statorique Iqs1



Figure(IV.28) : flux rotorique phiqr



Figure(IV.29) : flux rotorique Iqr



Figure(IV.30) : flux rotorique Iqs

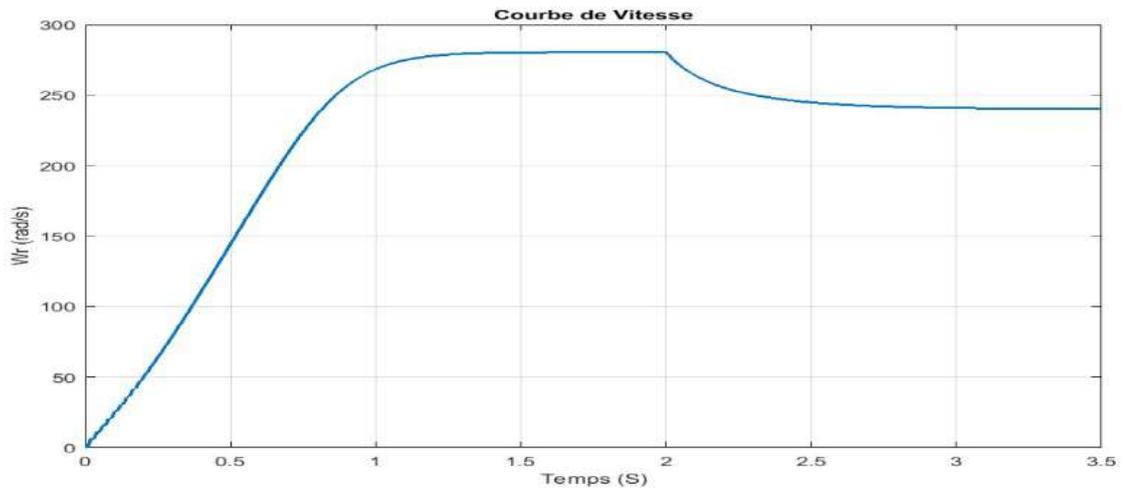


Figure (IV.31) : courbe de vitesse

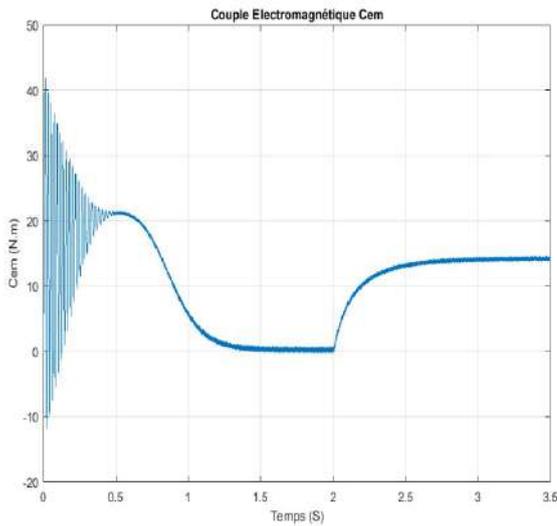
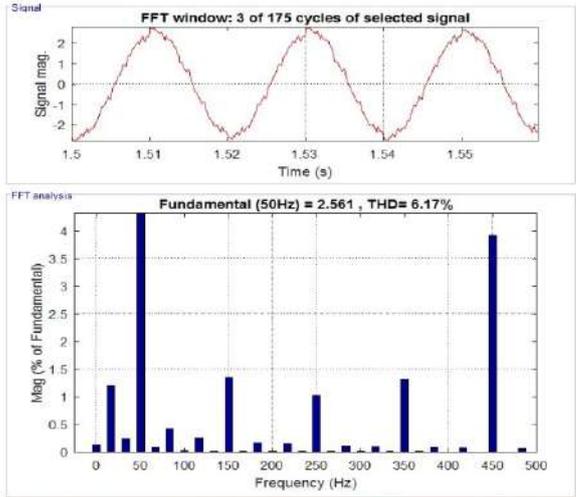


Figure (IV.32) : courbe de couple électromagnétique



figure(IV.33) : THD courant

Le THD de courant est égale à 1,3% et les harmoniques sont quasi nuls par rapport au fondamental.

IV.10. Comparaison des résultats de simulation des onduleurs étudiés :

Le tableau montre bien et donne une idée générale sur la qualité de forme d'onde réelle avec sa composante fondamentale. Le facteur de distorsion [THD (%)] montre bien l'avantage du niveau. On remarque aussi que l'augmentation du niveau de l'onduleur permet d'améliorer le signal de sortie de l'onduleur,

Niveau de l'onduleur	5 niveaux		7 niveaux	
THD en %	Tension de Sortie	Courant de Sortie	Tension de Sortie	Courant de Sortie
	16.94	7.41	11.05	6.17

IV.11. CONCLUSION :

Nous avons proposé une approche générale sur les onduleurs multi-niveaux asymétrique pour des applications de basse tension (deux cellules seulement). Ces onduleurs sont susceptibles de générer un nombre impair de niveaux, jusqu'à $n = (3^K)_{K=2} = 9$.

Les règles qui permettent d'obtenir un pas uniforme avec des onduleurs à cellules en série ont été décrites.

Ces onduleurs sont alimentés par des sources continues différentes, et délivrent des tensions de sortie de qualité améliorée sans augmentation du nombre de cellules ou du nombre d'interrupteurs (sans complexité supplémentaire de la structure d'onduleurs à pont complets). Ce type d'onduleur présente beaucoup d'avantages, parmi les plus importants, donc on mentionne :

- Il peut générer des tensions très proches de la sinusoïde avec une fréquence de commutation égale à celle de la fondamentale ;
- Il réduit les tensions du mode homopolaire ;
- Il est bien adapté aux moteurs de moyennes et de grandes puissances.

Ce chapitre a été essentiellement consacré aux onduleurs multi-niveaux asymétrique dont la structure est basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés, d'un point de vue de la charge.

V. Conclusion générale et perspectives

Le travail exposé dans ce mémoire consiste en étude et la simulation d'un onduleur multiniveaux asymétrique application à la conduite de la machine asynchrone double étoile. L'état de l'art des principales topologies d'onduleurs multiniveaux et une comparaison entre ces dernières ont été étudiées dans la première partie. Cette comparaison nous permet de bien faire un choix convenable de la structure puisqu'elle montre les avantages et les inconvénients de chacune d'elles, ce choix dépend du domaine d'utilisation de ces onduleurs. Tous ces onduleurs permettent une augmentation du nombre de niveaux de la tension, l'onduleur hybride présente le meilleur choix pour les applications nécessitant une tension élevée pour les alimenter. Les onduleurs multiniveaux asymétriques se distinguent par les paramètres technologiques des interrupteurs des composants. L'hybridation de cellules composées d'interrupteurs en tension différents permet de réaliser un convertisseur qui présente moins de pertes par conduction qu'un autre onduleur multiniveaux, tout en présentant de plus faibles pertes par commutation. L'hybridation d'interrupteurs de calibres en tension différents conduit aux applications moyennes tensions à fréquences moyennes et hautes. Les performances des convertisseurs multiniveaux asymétriques qui sont caractérisées par les pas, et les nombres de niveaux des cellules les composants permettent l'augmentation du nombre de niveaux.

Par la suite nous avons simulé avec le logiciel MATLAB/ SIMULINK un onduleur hybride à cinq et sept niveaux, où nous avons relevé un ensemble de courbes qui caractérisent les paramètres de sortie de l'onduleur qui alimente une machine asynchrone double étoile.

Nous avons commandé les onduleurs par une commande en MLI, dans cette partie, l'analyse de ces courbes nous confirme que l'onduleur hybride assure une augmentation du nombre de niveaux de tension, par contre l'analyse ne démontre pas l'amélioration de la qualité du signal.

Enfin, nous avons bien démontré qu'avec l'onduleur multiniveaux asymétrique on peut obtenir des niveaux de tension de sortie élevés par rapport à l'onduleur classique, la qualité du spectre n'est pas améliorée.

Pour les futurs travaux, nous souhaitons étendre l'étude de cette structure avec des pas de tensions d'alimentation des onduleurs partiels mieux calculés et utiliser une meilleure commande pour ces derniers, afin d'améliorer les différents spectres.

BIBLIOGRAPHIE :

- [1] : Principe de l'Electrotechnique. Cours et exercices corrigés MAX MARTY. DUNOD Paris 2005 ISBN : 2 10 048 550 4
- [2] : ELECTROTECHNIQUE. THEODORE WIDI. 4EME EDITION.
- [3] : BERRABAH FOUAD THESE DOCTORAT COMMANDE SANS CAPTEUR DE LA MACHINE ASYNCHRONE. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA
- [5] DOUMI Ramdhan : Mémoire de Master Commande PI Flou d'une machine asynchrone double étoile NIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [6] : DOUMI Ramdhan : Mémoire de Master Commande PI Flou d'une machine asynchrone double étoile NIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA :
- [7] : DOUMI Ramdhan : Mémoire de Master Commande PI Flou d'une machine asynchrone double étoile NIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA
- [8] : HADJOUTI Yassine, HAMBLI Ali : Modélisation de la machine asynchrone double étoile en vue du diagnostic du défaut de court-circuit entre spires statoriques UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA.
- [9] : HADJOUTI Yassine, HAMBLI Ali : Modélisation de la machine asynchrone double étoile en vue du diagnostic du défaut de court-circuit entre spires statoriques UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA.
- [11] G.K. Singh Multi-phase induction machine drive research—a survey * Department of Electrical Engineering, Indian Institute of Technology, Roorkee, Uttaranchal 247667, India
- [12] Zouhir Tir : Etude d'une Machine Asynchrone Double Etoile : (Modélisation, Alimentation et Commande) Université d'el oued
- [13] HADJOUTI Yassine, HAMBLI Ali : Modélisation de la machine asynchrone double étoile en vue du diagnostic du défaut de court-circuit entre spires statoriques UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA.
- [14] : BERRABAH FOUAD Université Badji Mokhtar Annaba A. BENZAIIOUA « Contribution à la commande directe de couple d'une machine asynchrone triphasée » Thèse de Doctorat en Sciences, Université du Québec à Chicoutimi. 2014
- [15] R. SADOUNI, « Commande par mode glissant flou d'une machine synchrone à double étoile », mémoire de magister, Univ Djilali liabes de sidi bel Abbes, 2010.

- [16] : R. ABDESSEMED, M. KADJOU DJ, **Modélisation des machines électriques**, Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- [17] : L. BENALIA, **Commande en tension des moteurs à inductions double alimentés**, thèse de doctorat, Université de Batna 2010.
- [18] G. K. SINGH, —**Multi-phase induction machine drive Research—a Survey**, *Electric Power System Research.*, pp. 139—47, vol. 61, 2002
- [19] R. ABDESSEMED, M. KADJOU DJ, **Modélisation des machines électriques**, Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- [20] M. BOUZIANE « **Application des techniques intelligentes à la commande d'une machine asynchrone double étoile associée à un convertisseur matriciel** » Thèse de Doctorat en Sciences, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes.2014.
- [21] B. FATIMA « **Contribution à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone : "Application au diagnostic des défauts statoriques"** » Thèse de Doctorat en Sciences, Université Constantine 1. 2014.
- [22] SAIFI IMANE, MASTER ACADEMIQUE **Alimentation d'onduleurs multiniveaux : analyse des possibilités de réalisation et méthodes de répartition de la puissance.**
FZ ZERHOUNI M.ZEGRAR, **Implémentation d'une stratégie de commande pour onduleur Multiniveaux**, Université de BECHAR,
- [23] M. Marchesoni, M. Mazzucchelli, and S. Tenconi. **A non conventional power converter for plasma stabilization.**
- [24] Rachid Taleb, Abdelkader Meroufel et Patrice Wira, **Commande par la stratégie d'élimination d'harmoniques d'un onduleur multiniveau asymétrique à structure cascade**, Article de volume 49, Néréro 4. Mediamira Science Publisher. Edition 2008