

N°d'ordre :

Université de Saida– Dr. Moulay Tahar
Faculté des Sciences

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat 3ième Cycle

Spécialité: Commande des
Systèmes Electro-énergétiques

Filière : Electrotechnique

Par :
CHERIFI Khaled

Thème :
**Topologies d'onduleurs multi-niveaux et des stratégies
de contrôle pour l'application photovoltaïque.**

Thèse soutenue le 25/07/1019 devant le jury composé de :

N°	Nom et prénom	Grade	Etablissement	Qualité
01	HARTANI Kada	Prof.	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Président
02	MILOUD Yahia	Prof	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Rapporteur
03	MILOUDI Abdallah	Prof	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Co-rapporteur
04	BENOUZA Noureddine	Prof	Université Mohamed Boudiaf d'Oran	Examineur
05	BENDJABBAR Mokhtar	Prof	Université Mohamed Boudiaf d'Oran	Examineur
06	SEKOUR M'hamed	MCA	Université de Saida – Dr. Moulay Tahar	Examineur

Remerciements

Après avoir remercié Dieu, Je tiens en premier lieu à remercier profondément mon directeur de thèse le Pr MILOUD Yahia, qui tout au long de ce travail a su me guider par ces précieux conseils, m'apporter l'aide nécessaire, et me remonter le moral quand il le fallait. Ce travail n'aurait pas pu être terminé sans l'aide et le soutien du Professeur Miloud.

Je tiens également à remercier mon codirecteur Pr MILOUDI Abdallah qui m'a assisté et soutenu dans ce projet.

Je voudrais également remercier le Dr MOSTEFAI Mohamed qui m'a aidé et m'a soutenu dans ce projet, Ses encouragements et ses conseils m'ont été d'une grande importance.

Je présente mes remerciements les plus sincères pour les membres du jury, qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail.

Enfin, je témoigne de mon affection la plus profonde envers mes parents, et mon frère, qui m'ont soutenu pendant les années de ce travail, qui ont supporté, tant bien que mal, la distance qui nous séparait, ma mauvaise humeur et mon stress permanent.

Je ne citerai pas les prénoms de mes amis, ils se reconnaîtront, ils savent l'amitié et la considération que je porte à leur égard.



Dédicaces

Après de longues années d'études et de travail, sachant l'importance de l'aide des personnes qui m'aiment, je voudrai humblement leurs, dédier ce modeste travail tout en avant qu'ils méritent le meilleur qui soit.

Je dédie ce travail :

A mon cher père qu'Allah te garde.

A ma très chère mère, mon symbole de bonté et ma source de tendresse, t'es prières et ta bénédiction ont été avec moi, aucune dédicace ne saurait être suffisante pour toi, et pour exprimer ce que t'as pu faire pour moi, qu'Allah t'accorde le bonheur, la santé et une longue heureuse vie.

A mon frère Mohamed qui m'encourageait et qui a était toujours à mes cotés, qu'Allah te garde et vous donne un avenir plein de joie, de bonheur et de réussite, et soeurs avec qui j'ai partagé le pire et le meilleur, qu'Allah vous donne une vie pleine de bonheur.

Je ne saurais aussi oublier mes amis et mes collègues en loin et proche, ainsi tous ceux qui ont participé de loin ou de près et qui nous ont aidé l'élaboration de ce thèse.

Résumé

De nos jours, les systèmes d'alimentation photovoltaïque se répandent de plus en plus avec l'augmentation de la demande en énergie et le souci de la pollution de l'environnement dans le monde. Les onduleurs à plusieurs niveaux ont attiré beaucoup d'attention dans le domaine de la distribution et du contrôle de l'énergie en raison de ses avantages dans les applications à forte puissance avec de faibles harmoniques.

Le travail effectué et décrit dans cette thèse avait pour objectif une contribution à l'amélioration des performances de l'onduleur multi-niveaux à diode de bouclage. La commande de cette topologie engendre une complexité quand il dépasse trois niveaux, Afin de trouver une solution à ce problème, l'onduleur trois niveaux conventionnel à diode de bouclage sera modifié pour améliorer sa qualité de sortie en termes de tension et courant sans avoir à augmenter le niveau de l'onduleur à plus de trois. L'onduleur modifié qui va commander un MAS et qui a comme source d'entrée une tension continue obtenue par un hacheur boost à MPTT est présenté et simulé. La technique de suivi du point de la puissance maximale (MPPT) est à la base de la logique floue qui est utilisée pour garantir le fonctionnement du générateur photovoltaïque à la puissance maximale et pour régler la tension continue. La stratégie utilisée dans la commande des onduleurs multi-niveaux est la modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle disposition en phase. La simulation a été effectuée à l'aide de MATLAB Sim power system. Les résultats de la simulation montrent la faisabilité et la capacité de la topologie modifiée à améliorer les spectres harmoniques des grandeurs de sortie et donc la qualité de l'énergie.

Mots-clés — Générateur photovoltaïque, Convertisseurs élévateur, MPPT, Onduleurs multi-niveaux, Topologie modifiée, MAS, Topologie à diode de bouclage, MLI, THD.

Abstract

Nowadays, photovoltaic power systems are spreading more and more with increasing demand for energy and concern for environmental pollution around the world. Multilevel inverters have attracted a lot of attention in the field of power distribution and control because of its advantages in high power applications with low harmonics.

The work carried out and described in this thesis aimed to contribute to improving the performance of the multi-level diode clamped inverter, the control of this topology generates a complexity when it exceeds three levels, In order to find a solution to this problem, the three-level diode clamped inverter will be modified to improve its quality without having to increase the level of the inverter to more than three levels. The modified inverter is presented and powered by the photovoltaic system as a direct current source input to power an induction motor. A fuzzy logic maximum power point tracking (MPPT) technique is used to guarantee the PV generator's operation at maximum power and to set the DC voltage, the strategy used in the control of the multi-level inverters is Pulse width modulation sinus triangle. The simulation performed using MATLAB Sim power system. The results of the simulation show the feasibility and the capacity of the modified topology to improve the harmonic spectra of the output quantities and thus the quality of the energy.

Keywords - Photovoltaic generator, Boost converters, MPPT, Multi-level inverters, Modified topology, Induction motor, Diode clamped topology, PWM, THD.

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Abstract

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Introduction générale.....01

1. Chapitre 01 : État de l’art sur les convertisseurs multi-niveaux

1.1. Introduction.....	04
1.2. Convertisseurs statiques multi-niveaux.....	04
1.3. Historique	04
1.4. Avantages et inconvénients	05
1.5. Topologies de convertisseurs de puissance multi-niveaux	05
1.5.1. La topologie à diode de bouclage (NPC)	06
1.5.2. La topologie au condensateur flotteur (CF).....	08
1.5.3. La topologie en cascade (H).....	09
1.6. Comparaison des topologies multi niveaux.....	11
1.7. Application des onduleurs multi-niveaux dans le domaine industriels.....	13
1.7.1. Application dans le domaine de la traction ferroviaire et véhicule électrique.	13
1.7.2. Application dans l’alimentation des réseaux de bord et de propulsion des bâtiments maritimes.....	13
1.7.3. Application dans le domaine des réseaux électriques	13

1.7.4. Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques.....	14
1.8. Conclusion.....	14
 2. <u>Chapitre 02 : Le système photovoltaïque</u>	
2.1. Introduction.....	15
2.2. Définition de photovoltaïque	15
2.3. Historique de la photovoltaïque.....	15
2.4. Cellules photovoltaïques.....	17
2.4.1. Structure de la cellule photovoltaïque.....	17
2.4.2. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque	18
2.5. Les différentes générations des cellules solaires.....	18
2.5.1. Première génération: Silicium cristallin (mono et poly).....	19
2.5.1.1. Les cellules monocristallines.....	19
2.5.1.2. Les cellules poly cristallines... ..	19
2.5.2. Deuxième génération:(couches minces)	20
2.5.2.1. Les cellules au Telluride de Cadmium(CdTe)	20
2.5.2.2. Les cellules au silicium amorphe (a-Si)	20
2.5.3. Troisième génération :(Perovskites, multi-jonction, concentration).....	21
2.5.3.1. Les Cellules Pérovskites.....	21
2.5.3.2. Les Cellules multi-jonction	21
2.5.3.3. Les Cellules à concentration.....	21
2.6. Le rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques.....	22
2.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	23
2.8. Module photovoltaïque.....	24
2.9. Association des modules photovoltaïques.....	25

2.9.1. Association en série.....	25
2.9.2. Association en parallèle.....	26
2.9.3. Association série-parallèle.....	26
2.10. Les caractéristiques électriques de modules	27
2.11. Générateur photovoltaïque.....	28
2.12. Simulation d'un générateur photovoltaïque	29
2.12.1. Modèle de simulation.....	29
2.12.2. Effet de l'irradiation et de température	30
2.12.2.1. Influence de l'irradiation	30
2.12.2.2. Influence de la température.....	30
2.13. Avantages et inconvénients PV.....	31
2.14. Conclusion	32

3. Chapitre 03 : Les techniques de poursuite du MPPT

3.1. Introduction.....	33
3.2. Convertisseur DC-DC.....	33
3.2.1. Hacheur élévateur (Boost).....	34
3.2.1.1. Principe de Fonctionnement.....	34
3.2.1.2. Les paramètres d'élévateur	36
3.3. Le point de puissance maximum (MPPT).....	38
3.4. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	38
3.5. Les Techniques MPPT.....	39
3.5.1. La Technique perturbation et observation.....	39
3.5.2. La Technique incrémentation de la conductance.....	41
3.5.3. La Technique logique floue	42
3.5.3.1. Fuzzification.....	44

3.5.3.2. Méthode d'inférence	45
3.5.3.3. Défuzzification.....	45
3.6. Simulation et interprétation.....	46
3.7. Conclusion.....	52
4. <u>Chapitre 04 : Simulation des onduleurs multi-niveaux à diode de</u> <u>bouclage</u>	
4.1. Introduction.....	53
4.2. L'onduleur multi-niveau à diode de bouclage.....	53
4.2.1. L'onduleur trois niveaux à diode de bouclage	54
4.2.1.1. Principe de fonctionnement	55
4.2.2. L'onduleur à cinq niveaux à diode de bouclage	57
4.2.2.1. Principe de fonctionnement	58
4.2.3. L'onduleur à sept niveaux à diode de bouclage	62
4.2.3.1. Principe de fonctionnement.....	63
4.3. La modulation de largeur d'impulsion (MLI)	70
4.3.1. La modulation sinus-triangle.....	70
4.3.2. MLI sinus-triangle à plusieurs porteuses.....	73
4.3.2.1. La MLI disposition en phase.....	73
4.3.2.2. La MLI disposition d'opposition de phase.....	74
4.3.2.3. La MLI disposition alternative d'opposition de phase.....	74
4.4. Simulation onduleurs multi-niveaux-MAS	75
4.4.1. Choisir la stratégie de modulation à MLI sinus-triangle.....	76
4.4.2. Simulation de l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage	77
4.4.2.1. Résultats obtenus	79
4.4.2.2. Interprétations des résultats.....	80

4.4.3. Simulation de l'onduleur cinq niveaux à diode de bouclage	80
4.4.3.1. Résultats obtenus	82
4.4.3.2. Interprétations des résultats.....	84
4.4.4. Simulation de l'onduleur sept niveaux à diode de bouclage	84
4.4.4.1. Résultats obtenus	86
4.4.4.2. Interprétations des résultats.....	88
4.4.5. Comparaisons entre les onduleurs trois, cinq et sept niveaux	88
4.5. Conclusion	89

5. Chapitre 05 : Simulation l'onduleur à trois niveaux modifié

5.1. Introduction.....	90
5.2. L'onduleur à trois niveaux modifié.....	90
5.3. Principe de fonctionnement	91
5.4. Résultats de simulation.....	94
5.5. Interprétation des résultats.....	106
5.6. Résultats de l'onduleur modifié lors de la variation de la valeur du condensateur ajouté	107
5.7. Comparaison entre onduleur classique et onduleur modifié	111
5.8. Conclusion.....	111
Conclusion générale.....	112

Bibliographié

Liste des figures		page
	<u>Chapitre 01 : État de l’art sur les convertisseurs multi niveaux</u>	
Figure.1.1	Un bras de phase de l'onduleur à diode de bouclage trois niveaux	06
Figure.1.2	Un bras de phase de l'onduleur en condensateur flotteur trois niveaux.....	08
Figure.1.3	Un bras de phase de l'onduleur en cascade trois niveaux.....	10
	<u>Chapitre 02 : Le système photovoltaïque</u>	
Figure.2.1	Cellule photovoltaïque.....	17
Figure.2.2	La structure de la cellule photovoltaïque.....	18
Figure.2.3	Principe de fonctionnement de cellule.....	18
Figure.2.4	Cellule monocristalline.....	19
Figure.2.5	Cellule poly cristalline.....	19
Figure.2.6	Cellule au Telluride de Cadmium.....	20
Figure.2.7	Cellule au silicium amorphe.....	20
Figure.2.8	Cellule Pérovskites.....	21
Figure.2.9	Cellule multi-jonction.....	21
Figure.2.10	Cellule à concentration.....	22
Figure.2.11	Schéma équivalent d’une cellule photovoltaïque.....	23
Figure.2.12	Modules photovoltaïques.....	25

Figure.2.13	Association série deux modules solaires.....	25
Figure.2.14	Caractéristiques $I=f(V)$ des modules en série aux conditions standards.....	25
Figure.2.15	Association parallèle deux modules solaires.....	26
Figure.2.16	Caractéristiques $I=f(V)$ des modules en parallèle aux conditions standards.....	26
Figure.2.17	Association mixte des modules solaires.....	26
Figure.2.18	Caractéristiques $I=f(V)$ des modules en série-parallèle aux conditions standards.....	26
Figure.2.19	Caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque.....	27
Figure.2.20	Champ photovoltaïque.....	28
Figure.2.21	Modèle de simulation d'un générateur PV.....	29
Figure.2.22	Evolution de la caractéristique (I-V) et (P-V) du générateur en fonction de l'irradiation ($T = 25^{\circ}C$).....	30
Figure.2.23	Evolution de la caractéristique (I-V) (P-V) du générateur en fonction de la température.....	30
<u>Chapitre 03 : Les techniques de poursuite du MPPT</u>		
Figure.3.1	Circuit électrique de base du hacheur survolteur.....	34
Figure.3.2	Circuit équivalent du convertisseur Boost pour T_{on}	34
Figure.3.3	Circuit équivalent du convertisseur boost pour T_{off}	35
Figure.3.4	Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur élévateur.....	37
Figure.3.5	Schéma fonctionnel à MPPT.....	38

Figure.3.6	Principe de fonctionnement d'une commande MPPT.....	39
Figure.3.7	Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme perturbation et observation.....	40
Figure.3.8	Organigramme de l'algorithme perturbation et observation	40
Figure.3.9	Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme l'incrémentation de la conductance.....	41
Figure.3.10	Organigramme de l'algorithme l'incrémentation de la conductance	42
Figure.3.11	Structure de base d'un contrôleur à logique floue.....	43
Figure.3.12	Modèle MATLAB / SIMULINK de l'algorithme proposé à base logique floue.....	43
Figure.3.13	Fonctions d'appartenance d'entrée et de sortie de: E, dE et dD.....	44
Figure.3.14	Modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boos) contrôlé par MPPT.....	46
Figure.3.15	Les points de puissance maximale simulés par P & O, INC et FLC sous température constante et éclairement varié.....	46
Figure.3.16	Puissances du générateur photovoltaïque obtenues par les techniques : P & O, INC et FLC sous température constante et éclairement différent.....	47
Figure.3.17	Zoom des puissances du générateur photovoltaïque.....	48
Figure.3.18	La variation d'irradiation.....	49
Figure.3.19	L'évolution de puissance PV pour l'irradiation variable.....	49

Figure.3.20	Zoom d'évolution de puissance PV pour l'irradiation variable.....	50
Figure.3.21	La variation de température.....	50
Figure.3.22	L'évolution de puissance PV pour température variable.....	51
Figure.3.23	Zoom de l'évolution de la puissance PV.....	51
	<u>Chapitre 04 : Simulation des onduleurs multi-niveaux à diode de bouclage</u>	
Figure.4.1	Bras (a) de l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage	54
Figure.4.2	Première configuration du bras (a).....	55
Figure.4.3	Deuxième configuration du bras (a).....	56
Figure.4.4	Troisième configuration du bras (a).....	56
Figure.4.5	Bras (a) de l'onduleur cinq niveaux à diode de bouclage	57
Figure.4.6	Première configuration du bras (a).....	58
Figure.4.7	Deuxième configuration du bras (a).....	59
Figure.4.8	Troisième configuration du bras (a).....	59
Figure.4.9	Quatrième configuration du bras (a).....	60
Figure.4.10	Cinquième configuration du bras (a).....	61
Figure.4.11	Bras (a) de l'onduleur sept niveaux à diode de bouclage	62
Figure.4.12	Première configuration du bras (a).....	63
Figure.4.13	Deuxième configuration du bras (a).....	64
Figure.4.14	Troisième configuration du bras (a).....	65

Figure.4.15	Quatrième configuration du bras (a).....	66
Figure.4.16	Cinquième configuration du bras (a).....	67
Figure.4.17	Sixième configuration du bras (a).....	68
Figure.4.18	Septième configuration du bras (a).....	69
Figure.4.19	Signal combiné porteuse, référence et leurs résultats.....	71
Figure.4.20	Principe de la MLI sinus-triangle.....	71
Figure.4.21	La MLI sinus-triangle disposition en phase.....	73
Figure.4.22	La MLI sinus-triangle disposition d'opposition de phase.....	74
Figure.4.23	La MLI sinus-triangle disposition alternative d'opposition de phase.....	74
Figure.4.24	Circuit modèle de simulation.....	75
Figure.4.25	Circuit de simulation d'un onduleur trois niveaux à diode de bouclage.....	77
Figure.4.26	Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur trois niveaux.....	77
Figure.4.27	Forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur trois niveaux.....	78
Figure.4.28	Zoom de forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur trois niveaux.....	78
Figure.4.29	Les formes des ondes de l'onduleur trois niveaux alimentant un MAS... ..	80
Figure.4.30	Circuit de simulation d'un onduleur cinq niveaux à diode de bouclage	81

Figure.4.31	Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur cinq niveaux.....	81
Figure.4.32	Forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur cinq niveaux.....	82
Figure.4.33	Zoom de forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur cinq niveaux.....	82
Figure.4.34	Les formes d'ondes de l'onduleur cinq niveaux alimentant un MAS.....	83
Figure.4.35	Circuit de simulation d'un onduleur sept niveaux à diode de bouclage.....	85
Figure.4.36	Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur sept niveaux.....	85
Figure.4.37	Forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur sept niveaux.....	86
Figure.4.38	Zoom de forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur sept niveaux.....	86
Figure.4.39	Les formes des ondes de l'onduleur sept niveaux alimentant un MAS.....	87
	<u>Chapitre 05 : Simulation l'onduleur à trois niveaux modifié</u>	
Figure.5.1	Structure de l'onduleur trois niveaux modifié.....	91
Figure.5.2	Première configuration du bras (a).....	92
Figure.5.3	Deuxième configuration du bras (a).....	92
Figure.5.4	Troisième configuration du bras (a).....	93

Figure.5.5	Circuit complet de simulation	94
Figure.5.6	Circuit d'un onduleur modifié	95
Figure.5.7	Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) d'onduleur trois niveaux modifié.....	97
Figure.5.8	Forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) d'onduleur trois niveaux modifié pour $m=10$	97
Figure.5.9	Forme d'onde de la tension simple (V_{ao}) d'un onduleur trois niveaux modifié pour $m=10$	98
Figure.5.10	Les signaux de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) pour $m=10$	100
Figure.5.11	Les formes des ondes de topologie modifiée pour $r=0.95$ et $m=10$	101
Figure.5.12	Forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) d'onduleur trois niveaux modifié pour $m=200$	102
Figure.5.13	Zoom de forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) d'onduleur trois niveaux modifié pour $m=200$	102
Figure.5.14	Forme d'onde de la tension simple (V_{ao}) d'un onduleur trois niveaux modifié pour $m=200$	103
Figure.5.15	Les signaux de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) pour $m=200$	105
Figure.5.16	Les formes des ondes de topologie modifiée pour $r=0.95$ et $m=200$	106
Figure.5.17	Les formes des ondes de topologie modifiée pour $C = 3\mu F$	109
Figure.5.18	Les formes des ondes de topologie modifiée pour $C = 5\mu F$	111

Liste des tableaux		page
	<u>Chapitre 01 : État de l’art sur les convertisseurs multi niveaux</u>	
Tableau.1.1	Les états de commutation de bras de l'onduleur à diode de bouclage trois niveaux.....	07
Tableau.1.2	Les états possibles de bras de l’onduleur à condensateurs flotteur à trois niveaux.....	09
Tableau.1.3	Les états possibles de bras de l'onduleur en cascade trois niveaux.....	10
Tableau.1.4	Comparaison des convertisseurs CHB, NPC, et FC en terme de nombre de composant nécessaire pour chaque convertisseur.....	12
	<u>Chapitre 02 : Le système photovoltaïque</u>	
Tableau.2.1	Rendement des différentes technologies.....	22
Tableau.2.2	Caractéristique électrique du panneau dans les conditions standards <CST> T=25°C, G=1000W /m ²	29
	<u>Chapitre 03 : Les techniques de poursuite du MPPT</u>	
Tableau 3.1	Valeurs de calcul du convertisseur élévateur(Boost).....	37
Tableau 3.2	Inférence floue.....	45
Tableau 3.3	Les points de puissance maximale simulés par de P & O, INC et FLC sous température constante et éclairément différent.....	47
Tableau 3.4	Temps de réponse des trois techniques.....	48
	<u>Chapitre 04 : Simulation des onduleurs multi-niveaux à diode de bouclage</u>	
Tableau 4.1	Les états de commutation de bras de l'onduleur trois niveaux.....	57

Tableau 4.2	Les états de commutation de bras de l'onduleur cinq niveaux.....	61
Tableau 4.3	Les états de commutation de bras de l'onduleur sept niveaux.....	69
Tableau 4.4	Paramètres de l'onduleur multi-niveaux.....	75
Tableau 4.5	Paramètres du moteur à induction.....	76
Tableau 4.6	THD pour différents stratégie de modulation à MLI sinus-triangle.....	76
Tableau 4.7	La comparaison entre les trois, cinq et sept niveaux d'onduleur à diode bouclage.....	88
	<u>Chapitre 05 : Simulation de l'onduleur à trois niveaux modifié</u>	
Tableau 5.1	Les états de commutation de bras de l'onduleur modifié à trois niveaux.....	93
Tableau 5.2	Performance de l'onduleur trois niveaux modifié avec la commande MLI sinus triangle pour $m=200$ et r allant de 0.65 à 0.95.....	95
Tableau 5.3	Performance de l'onduleur trois niveaux modifié avec la commande MLI sinus triangle pour $r = 0.95$ et m allant de 10 à 200.....	96
Tableau 5.4	Résultat de l'onduleur modifié lors de la variation de la valeur du condensateur.....	108
Tableau 5.5	Comparaison entre onduleur classique et onduleur modifié	111

Liste des abréviations

	Nomenclatures
A	La surface génératrice en m^2
D	Le rapport cyclique
dD	Le changement du rapport cyclique
dE (k)	Le changement d'erreur
E (k)	L'erreur
f	Fréquence de commutation
f_p	La fréquence de la porteuse
f_r	La fréquence de la référence
G	L'ensoleillement en W/m^2
I	Courant de sortie photovoltaïque
I_{cc}	Courant de court-circuit
I_d	Le courant circulant dans la diode
I_m	Courant à la puissance maximale
I_{ph}	Courant généré par ensoleillement dans un module PV
I_{sh}	Le courant dérivé par la résistance parallèle.
I_o	Courant de saturation de la diode
k	Constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)
m	L'indice de modulation
n	Facteur d'idéalité température.
P(k)	La puissance actuelle
P (k-1)	puissance précédent
q	Charge d'électrons ($1.60217646 \times 10^{-19} \text{ C}$)
r	Le taux de modulation

Liste des abréviations

R_s	Résistance en série de la cellule PV
R_{sh}	Résistance shunt intrinsèque de la cellule PV
T	Température solaire
V	Tension de sortie photovoltaïque
V_e	Tension d'entrée d'élévateur
V_m	Tension à la puissance maximale
V_{oc}	Tension de circuit ouvert
V_s	Tension de sortie d'élévateur
V_T	Tension thermique
Symboles grecs	
η	Rendement de la cellule
μ_{icc}	Coefficient de température du courant de court-circuit, A / K
Les abréviations	
AC	Alternative Current
APOD	Alternative Phase Opposition Disposition
a-Si	Amorphous Silicium Cristallin
CdTe	Telluride de Cadmium
CHB	Cascaded Half-Bridge
INC	Incrémentation de la Conductance
DC	Direct Current
FFT	Fast Fourier Transform
FC	Flying Capacitor
GPV	Générateur Photovoltaïque
FLC	Fuzzy Logic Controller

Liste des abréviations

MAS	Machine Asynchrone
MLI	Modulation à Largeur d'Impulsion
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NPC	Neutral-Point Clamped Diode
PD	Phase Disposition
POD	Phase Opposition Disposition
PO	Perturbation et Observation
Si -C, mon	Silicium Cristallin monocristallin
Si-C, poly	Silicium Cristallin polycristallin
STC	Standard Test Conditions
THD	Total Harmonic Distorsion

Introduction

générale

Introduction générale

Au cours de ces dernières années, le monde s'est tourné vers des énergies renouvelables telles que l'énergie photovoltaïque (PV) qui a été largement utilisée. La source principale de cette énergie est le soleil qui est répartie presque à travers la terre. De plus, elle est propre et ne présente aucun inconvénient pour l'environnement [1].

L'extraction de l'énergie du module photovoltaïque dépend des conditions climatiques. Ce système a un point de fonctionnement optimal appelé Maximum Power Point (MPPT) qui dépend en grande partie de l'intensité de l'éclairage. L'adaptation des panneaux PV à la charge est nécessaire pour extraire la puissance maximale du module PV. Ceci est fait à travers un convertisseur boost qui contrôle la puissance maximale en utilisant des techniques à savoir : la logique floue, la perturbation et observation (P&O) et la technique de conductance incrémentale etc. [2, 3,4].

Les onduleurs multi-niveaux ont attiré beaucoup d'attention dans le domaine de la distribution et du contrôle de l'énergie en raison de leurs avantages dans les applications à forte puissance et avec de faibles harmoniques. L'énergie photovoltaïque conviendra parfaitement pour ce type d'onduleurs

Les onduleurs multi-niveaux présentent ainsi de nombreux avantages par rapport aux onduleurs conventionnels à deux niveaux [5]. La principale caractéristique d'un onduleur multi-niveau est sa capacité à fonctionner à plusieurs niveaux de tension pour effectuer une conversion de puissance et réduire le contenu harmonique de la tension de sortie. En utilisant des onduleurs multi niveaux, les filtres deviennent plus petits et moins chers [6, 7, 8]. Afin d'obtenir une bonne performance de l'onduleur pour une faible distorsion harmonique totale (THD), il existe plusieurs topologies d'onduleurs suggérées ces dernières années. Les trois principales topologies multi-niveaux utilisées sont [9]:

- La topologie à diode de bouclage (Neutral Point Clamped) qui permet de clamber les interrupteurs ouverts par l'intermédiaire des diodes. Elle permet aussi de réduire le taux de distorsion harmonique, limitant ainsi la taille des éléments de filtrage.
- La topologie à condensateur flotteur (Flying Capacitor) permet de répartir les tensions aux bornes des semi-conducteurs mis en série par l'intermédiaire des condensateurs flottants.

- La topologie en cascade basée sur la mise en série d'onduleurs monophasés sur chaque phase, présente l'énorme avantage d'être modulaire, cela veut dire qu'elle est facilement extensible à un nombre élevé de niveaux, ce qui réduit le taux de distorsion des harmoniques.

L'onduleur multi-niveau à diode de bouclage est la topologie la plus utilisée dans l'industrie pour les applications à haute tension. Les avantages les plus importants de ces onduleurs sont ceux qui ont des niveaux suffisamment élevés, le besoin de filtrage est diminué puisque le contenu harmonique sera faible. Cependant, sa commande à un nombre supérieur à trois niveaux de l'onduleur est difficile car il rend le contrôle très complexe et le grand nombre de composant nécessaire.

Afin de trouver une solution à ce problème, l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage sera modifié pour améliorer sa qualité sans avoir à augmenter le niveau de l'onduleur à plus de trois niveaux. L'onduleur proposé est plus efficace avec un faible contenu d'harmonique, de sorte que la forme d'onde de sortie se rapproche de l'onde sinusoïdale avec un taux d'harmonique acceptable. L'avantage de la topologie modifiée réside dans leur capacité à améliorer les formes d'onde et les spectres harmoniques des grandeurs de sortie par rapport la topologie à diode de bouclage conventionnel. La stratégie utilisée dans la commande de l'onduleur proposé est la modulation de largeur d'impulsion sinus-triangle disposition en phase. La simulation de la faisabilité de cette topologie modifiée est vérifiée.

Cette thèse se compose de cinq chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la présentation d'une brève synthèse des principales topologies des convertisseurs multi-niveaux, leurs avantages et inconvénients, comparaison de ces trois structures et on termine le chapitre par leurs applications aux domaines industriels.

Le deuxième chapitre met en évidence, l'historique du photovoltaïque, le principe de fonctionnement de la cellule PV et sa modélisation. Enfin, on présente les caractéristiques du générateur photovoltaïque dans des conditions atmosphériques différentes.

Le troisième chapitre présente une étude et une simulation des différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) ainsi que les détails du principe de fonctionnement du convertisseur (boost). Les résultats et discussions des simulations effectuées du système photovoltaïque seront abordés.

Le quatrième chapitre est consacré à étudier et simuler différents niveaux d'onduleurs à diode de bouclage avec une charge moteur à induction et leurs stratégies de commande à MLI sinus-triangle. On termine ce chapitre par des simulations du système complet.

Dans le dernier chapitre, nous allons présenter la structure et le principe de fonctionnement de l'onduleur modifié alimentant le moteur à induction. Les résultats et les discussions de simulation seront effectués.

Enfin, on termine cette thèse par une conclusion générale et quelques perspectives pour la continuité de ce travail.

Chapitre 1

État de l'art sur les convertisseurs multi- niveaux

1.1. Introduction

Durant ces dernières années, on vit la naissance de nouveaux onduleurs multi-niveaux qui sont utilisés dans le domaine des entraînements de grande puissance trouvent une intégration rapide dans le domaine d'énergie renouvelables pour la conversion d'énergie

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu alternatif. Il est dit « multi-niveaux » lorsqu'il génère une tension découpée de sortie composée d'au moins trois niveaux [10].

Ce chapitre est consacré à la présentation d'une brève synthèse des principales topologies des convertisseurs multi-niveaux, leurs avantages et inconvénients, comparaison de trois différentes structures et on termine le chapitre par donner quelques application industriels.

1.2. Convertisseurs statiques multi-niveaux

Les convertisseurs à niveaux multiples sont des convertisseurs ayant en sortie une tension de phase contenant au moins trois niveaux. Ils peuvent être mis en oeuvre de différentes manières, telles que la connexion parallèle ou série des semi-conducteurs de puissance. C'est ainsi que sont définies différentes structures d'onduleur multi-niveaux [10].

Les convertisseurs multi niveaux assurent une alimentation haute tension des machines électriques de moyenne et forte puissance. De plus, ces convertisseurs ont l'avantage de garantir un spectre de courant et de tension d'une meilleure qualité.

1.3. Historique

L'histoire de la conversion multi-niveaux commence au début des années 70. La première structure décrite est une mise en série de pont en H pour synthétiser une tension de sortie alternative sous forme d'escalier. Puis au début des années 80 est apparu le convertisseur clampé par le neutre (NPC). Cette structure est considérée comme le premier convertisseur multi-niveaux pour des applications de moyennes puissances. Puisque l'onduleur NPC double effectivement le niveau de tension sans exiger une tension assorti précise, la topologie NPC a régné dans les années 80. Depuis, de nombreuses études ont été proposées pour étudier ses propriétés et les évolutions possibles de cette structure. Dans les années 90, les recherches vers de nouvelles structures se sont portées vers les convertisseurs multicellulaires série, aussi connu dans la littérature sous le nom de «flying capacitor». C'est à la fin des années 90 qu'est né le convertisseur multicellulaire superposé, cette structure est une suite de la réflexion sur les convertisseurs multicellulaires série [10,11].

1.4. Avantages et inconvénients

Les avantages et les inconvénients de l'onduleur à multi-niveaux par rapport à la topologie conventionnelle à deux niveaux sont les suivants :

Les avantages [12,13] :

- La tension aux bornes des commutateurs ne représente qu'une moitié de la tension de la source continue.
- La fréquence de commutation peut être réduite pour les mêmes pertes de commutation.
- Les harmoniques de courant de sortie plus élevées sont réduites par la même fréquence de commutation.
- La tension de sortie délivrée par les convertisseurs multi-niveaux présente d'intéressantes qualités spectrales.

Les inconvénients [14]:

- Un inconvénient particulier est le plus grand nombre de commutateurs à semi-conducteurs de puissance nécessaires. Bien que des commutateurs de tension inférieure puissent être utilisés dans un convertisseur multi-niveau, chaque commutateur nécessite un circuit de commande de grille associé. Cela peut rendre le système global plus coûteux et plus complexe.

1.5. Topologies de convertisseurs de puissance multi-niveaux

Trois grandes structures de convertisseurs multi-niveaux différentes ont été rapportées dans la littérature:

1. La topologie à diode de bouclage (NPC)
2. La topologie au condensateur flotteur (CF)
3. La topologie en cascade (H).

La deuxième catégorie des onduleurs multi-niveaux comporte les assemblages hybrides des onduleurs de la première catégorie. On peut citer : NPC en cascade, NPC et H-bridge en cascade [12].

1.5.1. La topologie à diode de bouclage (NPC)

Le concept de la topologie à diode a été présenté la première fois par Nabae et Akagi (1981). Il avait pour but d'ajouter un niveau de tension intermédiaire à la tension de sortie d'un onduleur afin de réduire les harmoniques. Cette topologie a trouvé une large acceptation pour sa capacité de haute tension et son fonctionnement à haut rendement [15,16].

L'amélioration de la qualité de la tension de sortie est évidente en augmentant le nombre de niveaux de tension lorsque la forme d'onde de tension devient plus proche de la forme d'onde sinusoïdale [11].

Un onduleur à diode, dans lequel la diode est utilisée comme dispositif de serrage pour serrer la tension du bus continu de manière à réaliser des pas dans la tension de sortie. Ainsi, le concept principal de cet onduleur est d'utiliser des diodes pour limiter les contraintes de tension des dispositifs de puissance. La tension sur chaque condensateur et chaque commutateur est V_{dc} . Un onduleur de niveau n nécessite $(n-1)$ des sources de tension, $2(n-1)$ dispositifs de commutation et $(n-1)(n-2)$ diodes [12,17].

Le principe de cette topologie est la création de $(n-2)$ points milieux capacitifs, en connectant en série $(n-1)$ condensateurs. En reliant chacun de ces points à la sortie, nous obtenons n niveaux de tension: $V_{dc}/(n-1)$, $2V_{dc}/(n-1)$, ... jusqu'à $V_{dc}(n-2)/(n-1)$ [18].

La figure (1.1) montre une branche de phase d'un onduleur à trois niveaux.

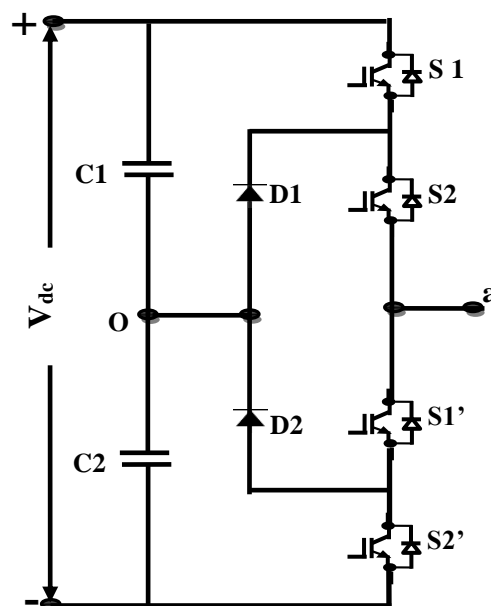


Fig. 1.1. Un bras de phase de l'onduleur à diode de bouclage trois niveaux [19].

Pour expliquer le principe de fonctionnement structure d'onduleur présentées ci-dessus, on établit un tableau des états des interrupteurs pour un bras d'onduleur à diode de bouclage trois niveaux.

Tableau.1.1. Les états de commutation de bras de l'onduleur à diode de bouclage trois niveaux [20].

Tension V_{ao}	État de commutation			
	$S1$	$S2$	$S1'$	$S2'$
$+V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

Les avantages et les inconvénients d'un convertisseur de source de tension multi-niveau à diode de bouclage sont les suivants.

Les avantages [13 ,21]:

- Lorsque le nombre de niveaux est suffisamment élevé, le contenu harmonique sera suffisamment faible pour ne pas avoir besoin de filtres.
- L'efficacité est élevée car tous les appareils sont commutés à la fréquence fondamentale.
- Le flux de puissance réactive peut être contrôlé.

Les inconvénients [21]:

- Déséquilibre de la tension des condensateurs. Dans certaines conditions de fonctionnement, la tension du point milieu capacitif peut avoir des variations très importantes. Afin d'assurer le bon fonctionnement, il faut prévoir une stratégie de commande pour assurer la stabilité de cette tension. Ce problème devient plus complexe lorsque le nombre de niveaux est plus important.
- L'exigence des diodes a fréquence de commutation élevée et qui doivent supporter le courant maximale circulant dans le circuit.
- L'inégalité des tensions inverses supportées par les diodes.

1.5.2. La topologie au condensateur flotteur (FC)

La topologie à condensateur flotteur a été introduite par Meynard et Foch (1992). Dans cette topologie les deux diodes de calage du convertisseur NPC ont été remplacées par une capacité, d'où le nom de convertisseur à condensateur flotteur [15].

Cette configuration est une alternative au convertisseur à diode, cependant, la tension à travers un commutateur ouvert est contrainte par des condensateurs de serrage au lieu de la diode de serrage dans une topologie à diode. Par conséquent, il peut éviter l'utilisation de plusieurs diodes aux niveaux de tension plus élevés. Bien que ce type de convertisseur partage les avantages de tous les onduleurs multi-niveaux, il fait face à quelques problèmes [17]

L'un des principaux problèmes est l'exigence d'une stratégie de commande compliquée en raison de la régulation des tensions des condensateurs flottants.

En augmentant le nombre de niveaux, il faut plus de condensateurs [16].

Pour un convertisseur à condensateur flotteur de n niveaux, chaque bras doit contenir $2(n-1)$ interrupteurs de commutation et $(n-2)$ condensateurs flottants, $(n-1)$ diviseur de tension (capacité). Cette topologie élimine quelques inconvénients de la NPC comme l'équilibre des tensions supportées par les interrupteurs. La figure (1.2) montre la structure d'un bras d'onduleur à condensateur flotteur trois niveaux.

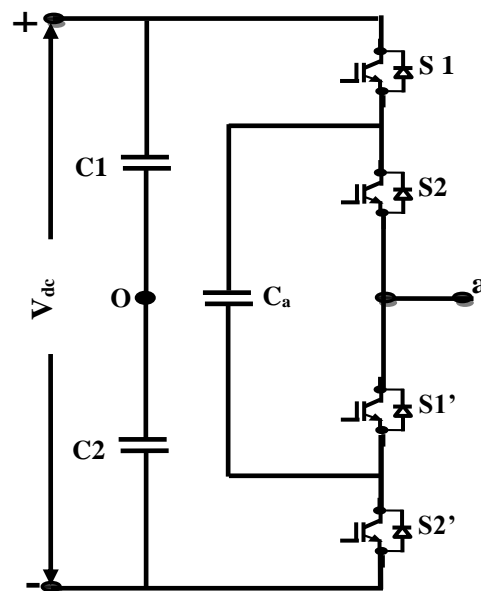


Fig. 1.2. Un bras de phase de l'onduleur en condensateur flotteur trois niveaux [19].

Le tableau (1.2) montre la tension de sortie (V_{ao}) et les états de commutations possibles d'onduleur à condensateurs flotteur à trois niveaux.

**Tableau .1.2 . Les états possibles de bras de l'onduleur à condensateurs flotteur
à trois niveaux [20].**

Tension V_{ao}	État de commutation			
	$S1$	$S2$	$S1'$	$S2'$
$+V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	0	1	0	1
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

En résumé, les avantages et les inconvénients d'un convertisseur de source de tension multi-niveaux à condensateur flotteur sont les suivants :

Les avantages [13,21]:

Une grande quantité de condensateurs de stockage offre une capacité de conduite supplémentaire pendant les pannes de courant.

- Elle élimine le problème des diodes de blocage dans la topologie NPC.
- Lorsque le nombre de niveaux est suffisamment élevé, le contenu harmonique sera suffisamment faible pour ne pas avoir besoin de filtres.
- Le flux de puissance réel et réactif peut être contrôlé, ce qui rend possible un potentiel convertisseur de source de tension pour une transmission haute tension continue.

Les inconvénients [21]:

- Un nombre excessif de condensateurs de stockage est requis lorsque le nombre de niveaux de convertisseur est élevé. Les systèmes de haut niveau sont plus difficiles à emballer et plus coûteux avec les condensateurs volumineux requis.
- La commande de l'onduleur sera très compliquée et la fréquence de commutation et les pertes de commutation seront élevées pour une transmission de puissance réelle.

1.5.3. La topologie en cascade (H)

Cette topologie (Peng et al; 1996) consiste à mettre en cascade plusieurs onduleurs en pont H monophasés de trois niveaux. Chaque pont est alimenté par une source de tension continue

distincte. Ce qui fait que pour n onduleurs en cascade, la tension de sortie peut être constituée de $(2n+1)$ niveaux. En comparaison avec les deux topologies précédentes, nous remarquons que nous pouvons obtenir le même nombre de niveaux avec le même nombre d'interrupteurs et sans diodes de calage ni de capacités flottantes. Néanmoins, pour chaque paire de niveaux additionnelle il faut une source de tension supplémentaire, ce qui représente un inconvénient majeur pour cette topologie [15, 16,19]

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la structure en cascade (H) à trois niveaux de tension, nous allons en présenter la structure de base trois niveaux dans figure (1.3).

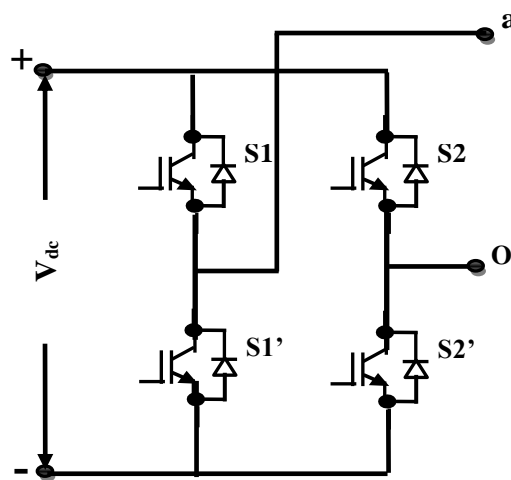


Fig. 1.3.Un bras de phase de l'onduleur en cascade trois niveaux [19].

Le tableau (1.3) montre la tension de sortie (V_{ao}) et les états de commutations possibles d'onduleur en cascade à trois niveaux.

Tableau.1.3. Les états possibles de bras de l'onduleur en cascade trois niveaux [20].

Tension V_{ao}	État de commutation			
	$S1$	$S2$	$S1'$	$S2'$
V_{dc}	1	0	0	1
0	1	1	0	0
$-V_{dc}$	0	1	1	0

Les avantages et les inconvénients du convertisseur de source de tension multi niveau basé sur un onduleur en cascade peuvent être énumérés ci-dessous.

Les avantages [13,21] :

- Nécessite le moins de composants parmi tous les convertisseurs multi niveaux pour atteindre le même nombre de niveaux de tension.
- La disposition et l'emballage des circuits modulaires sont possibles car chaque niveau a la même structure et il n'y a pas de diodes de serrage supplémentaires ou de condensateurs d'équilibrage de tension.
- Elle ne présente pas de problèmes liés à l'équilibrage des points de raccordement des tensions d'alimentation.
- La commutation douce peut être utilisée dans cette structure pour éviter les amortisseurs de résistance-condensateur-diode volumineux et avec perte.

Les inconvénients [21]:

- a besoin de sources DC séparées pour les conversions de puissance réelle, et donc ses applications sont quelque peu limitées.
- Les sources continues présentes dans le circuit de cette topologie sont obtenues par l'utilisation d'un transformateur à plusieurs secondaires comme première solution, ou bien plusieurs transformateurs distincts. Mais dans tous les cas on se trouve obligé de prévoir un système de correction du facteur de puissance pour remédier aux effets de pollution du réseau électrique causée par les redresseurs.

1.6. Comparaison des topologies multi-niveaux

Bien que le choix de la topologie multi-niveau soit directement lié au l'application et la liste des spécifications, afin de minimiser les pertes, le volume et les coûts, généralement le nombre de composants joue le plus rôle important. Par conséquent, afin de fournir des lignes directrices pour la sélection la topologie à plusieurs niveaux appropriés, le tableau (1.4) résume le nombre de semi-conducteurs et composants passifs requis par les plus prometteuses topologies [22].

Tableau.1.4.Comparaison des convertisseurs H, NPC, et FC en termes de nombre de composant nécessaire pour chaque convertisseur [23,24].

Topologies	Nombre de niveaux	Nombre de commutateur	Nombre Diode de Clampé	Nombre de Capacité Flottante	Nombre de Capacité du bus continu	Nombre de source continue
NPC	3	12	6	0	2	1
	5	24	36	0	4	1
	7	36	90	0	6	1
	N	6(N-1)	3(N-1) (N-2)	0	N-1	1
FC	3	12	0	3	2	1
	5	24	0	18	4	1
	7	36	0	45	6	1
	N	6(N-1)	0	$\frac{3}{2}(N-1)$ (N-2)	N-1	1
H	3	12	0	0	3	3
	5	24	0	0	6	6
	7	36	0	0	9	9
	N	6(N-1)	0	0	$\frac{3}{2}(N-1)$	$\frac{3}{2}(N-1)$

Avec :

- NPC : Topologie clampé par le neutre (Neutral Point Clamped).
- FC : Topologie à condensateur flotteur (Flying Capacitor).
- H : Topologie pont H montée en cascade (Cascaded H-Bridge).

Pour une approche à trois niveaux, l'analyse prouve que les onduleurs clampés par le neutre (NPC), à condensateur flotteur (FC) et pont H montés en cascade exigent le même nombre de commutateurs (12), toutefois ils diffèrent sur les éléments et le nombre de sources de continue requises. Pour des applications où seulement une source continue est disponible, les topologies de types NPC et FC sont avantageuse par rapport à celle de pont H monté en cascade [23].

Bien que la majorité des topologies multi-niveaux présentées jusqu'ici diffère dans la structure de leurs circuits, elles exigent toutes un contrôle approprié des tensions de condensateur de bus continu ou dans certains cas des condensateurs flottants. L'application dans le domaine industriel de ces topologies diffère, d'un domaine à un autre et d'une topologie à une autre. Chaque structure est avantageuse dans un domaine et elle présente des inconvénients dans un autre, il n'y a pas une topologie polyvalente chaque structure à son domaine d'application.

1.7. Application des onduleurs multi-niveaux dans le domaine industriels

Les convertisseurs multi niveaux trouvent une attention importante dans l'industrie. Actuellement, ils sont utilisés dans actionnent une large gamme d'applications, tel que les compresseurs, les extrudeuses, les pompes, les ventilateurs, les fraises, les laminoirs, les convoyeurs, les broyeurs, les souffleries de fourneau, les démarreur de turbine à gaz, les mélangeurs, les élévateurs, la compensation d'énergie réactive, la propulsion marine, boîte de vitesses à courant continu (HVDC) à haute tension, le stockage hydro pompé, l'énergie éolienne, et la traction ferroviaire [25, 26].

1.7.1. Application dans le domaine de la traction ferroviaire et véhicule électrique :

Dans les véhicules électriques, l'utilisation des convertisseurs multi-niveaux est également possible. L'exploitation de la topologie basée sur la mise en série d'onduleurs partiels, devient relativement aisée, puisque chaque onduleur est alimenté par une batterie de 48V, assurant ainsi l'isolation galvanique requise entre toutes les sources. On trouve aussi le convertisseur multi-niveaux back-to-back à structure NPC pour l'usage dans des grands entraînements des véhicule hybride-électrique pour les camions lourds et les véhicules militaires [27].

1.7.2. Application dans l'alimentation des réseaux de bord et de propulsion des bâtiments maritimes:

Dans les bâtiments maritimes, la limitation de la place disponible pose d'énormes problèmes pour la réalisation d'une alimentation en énergie électrique ayant un encombrement et un poids réduits. Il est possible d'exploiter les techniques de conversion multi-niveaux pour assurer l'alimentation des navires (tant pour l'alimentation des réseaux de bord que pour celle des réseaux de propulsion) [28].

1.7.3. Application dans le domaine des réseaux électriques :

Parce qu'ils peuvent fournir une moyenne ou une haute tension, les convertisseurs multi-niveaux sont aussi adaptés pour l'amélioration de la qualité de la tension des réseaux électriques. L'immigration de l'énergie photovoltaïque dans le domaine industriel. Production et injection de l'énergie au réseau électrique, a permet aux onduleurs multi-niveaux d'être utilisé comme interface entre modules photovoltaïques et réseau électrique. Les topologies multi-niveaux les plus adaptés à ce type d'installations sont les structures NPC et surtout la structure aux ponts H mis en cascade [25].

1.7.4. Application dans le domaine de l'alimentation des machines électriques:

Dans les applications industrielles, les machines électriques de moyennes et fortes puissances.

On trouve la topologie NPC à trois niveaux est largement utilisée dans des applications de moyenne tension. Ces applications couvrent une large gamme de charge de haute puissance comprenant des ventilateurs, des pompes, des souffleries, des compresseurs, et des convoyeurs. [25].

1.8. Conclusion

La majorité des topologies multi-niveaux présentées jusqu'ici diffère dans la structure de leurs circuits. L'application dans le domaine industriel de ces topologies diffère, d'un domaine à un autre et d'une topologie à une autre. Chaque structure est avantageuse dans un domaine et elle présente des inconvénients dans un autre, il n'y a pas une topologie polyvalente chaque structure à son domaine d'application.

On a exposé dans ce chapitre les différentes topologies de convertisseurs multi-niveaux en énumérant les avantages et les inconvénients de chacune d'elle. Aussi une comparaison des topologies multi-niveaux en termes de nombre des composants et des sources de tension continue, et en finales applications des onduleurs multi-niveaux dans le domaine industriel.

Chapitre 2

Le système photovoltaïque

2.1. Introduction

La nouvelle technologie énergétique est l'un des cinq domaines du développement économique mondial qui a la force la plus décisive du 21ème siècle. L'énergie solaire est une nouvelle énergie propre, efficace et durable. Dans la nouvelle réalité, les gouvernements utiliseront les ressources en énergie solaire en tant que stratégie nationale de développement durable. La génération d'énergie photovoltaïque est sûre et fiable, sans bruit, sans pollution, moins contrainte, avec un taux de défaillance faible, un entretien facile, etc.

L'électricité peut être obtenue à partir de l'énergie photovoltaïque sans recourir à des combustibles fossiles (charbon, pétrole ou gaz naturel) ou à des réactions de fission nucléaire, et éviter la plupart des menaces associées aux techniques actuelles de production d'électricité [29].

On rappelle dans ce chapitre l'histoire de photovoltaïque, le principe de fonctionnement de la cellule PV et également ses trois générations d'évolutions technologiques. Ensuite, on décrit la modélisation de la cellule. Enfin, on présente les caractéristiques du générateur photovoltaïque en différentes conditions atmosphériques.

2.2. Définition de photovoltaïque

Le mot «photovoltaïque» se compose de deux mots: photo, un mot grec pour lumière, et voltaïque, qui définit la valeur de mesure par laquelle l'activité du champ électrique est exprimée, c'est-à-dire la différence de potentiel. Donc, la définition de la conversion photovoltaïque est la transformation directe de la lumière en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. La principale source lumineuse inépuisable étant le soleil [30,31].

2.3. Historique de la photovoltaïque

L'effet photovoltaïque (PV), a été découvert en 1839 par un physicien français, Alexandre Edmond Becquerel (en irradiant une électrode en argent dans un électrolyte, il obtint une tension électrique [32]).

En 1875, le physicien Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

La première cellule solaire fonctionnelle fut construite en 1883 par Charles Fritts. Mais le rendement de sa cellule, étant très faible, empêcha à l'époque son utilisation [33].

Seulement, le phénomène est encore considéré comme anecdotique jusqu'à la seconde guerre mondiale. Les premières vraies cellules sont apparues en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium.

Les recherches d'après guerre ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille et ce n'est qu'en 1954 que trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince mettent au point une cellule photovoltaïque au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell téléphone. On entrevoit alors la possibilité de fournir de l'électricité grâce à ces cellules. Au même moment, l'industrie spatiale naissante, cherche de nouvelles solutions (autre que le procédé nucléaire) pour alimenter ses satellites [30].

C'est en 1958, que les premiers satellites avec panneaux solaires sont envoyés dans l'espace et au même moment une cellule avec un rendement de 9% est mise au point [34].

Mais il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industries investissent dans la technologie photovoltaïque. En effet, des efforts ont été faits pour réduire les coûts de sorte que l'énergie photovoltaïque soit également utilisable pour des applications terrestres. Et en 1973, la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware [29].

Ainsi, au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts. La croissance de l'industrie fut spectaculaire, et notamment à travers de nombreux produits de faible puissance fonctionnant grâce à l'énergie solaire, tel que : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires. En 1983 la première voiture, alimentée par énergie photovoltaïque, parcourt une distance de 4 000 km en Australie [29].

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

In 2002, le total des installations photovoltaïques installées dans le monde atteint 2 000 MW. Il a fallu 25 ans pour atteindre les 1 000 premiers MW et seulement 3 ans pour le doubler; la production de cellules de silicium cristallin dépasse 100 MW par an chez Sharp Corp. (Japon). BP Solar cesse la R et D et la production de modules à couches minces a-Si et CdTe aux États-Unis, mettant ainsi fin à plus de 20 ans d'efforts [29].

En 2012, la capacité mondiale en énergie solaire a dépassé la barrière magique de 100 GWp. Entre 1999 et 2012, la capacité photovoltaïque installée a donc augmenté. En d'autres termes, au cours des 13 dernières années, la croissance annuelle moyenne de la capacité photovoltaïque installée a été d'environ 40%. [29].

2.4. Cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs [35]. La cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [36,37].



Fig. 2.1. Cellule photovoltaïque [36].

2.4.1 Structure de la cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches. On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négatives (N) en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libres positives (P). De part et d'autre du cœur de la cellule, on a une couche conductrice (K) autrement dit une grille métallique, puisqu'il faut que cette couche soit conductrice et ne subisse pas des phénomènes de corrosion. On a donc une couche qui sert de cathode (pôle -) recouvrant la couche semi-conductrice dopée N et une couche qui joue le rôle de l'anode (pôle +) en dessous la couche semi-conductrice P. Aussi le silicium est très réflecteur, on place donc un revêtement anti-réflexion sur le dessus de la cellule. Enfin on trouve une couche de verre qui protège la cellule. Ces couvertures de protections sont indispensables car la cellule est très fragile. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Pour finir, on relie les cellules entre elles, constituant alors le

panneau solaire, afin d'obtenir une puissance suffisante [36,38], comme le montre la figure (2.2).

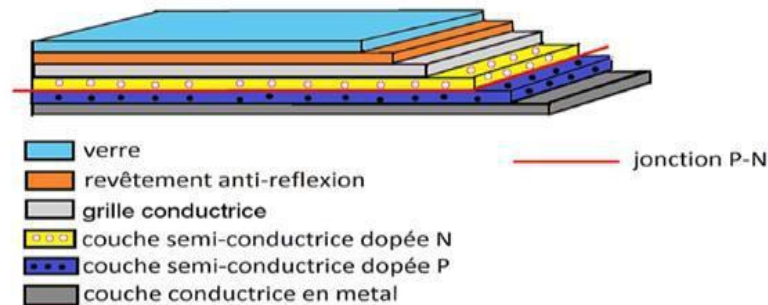


Fig. 2.2. La structure de la cellule photovoltaïque [38].

2.4.2. Principe de fonctionnement de cellule photovoltaïque

Dans une cellule photovoltaïque, lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes, chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque [35,38], comme le montre la figure (2.3).

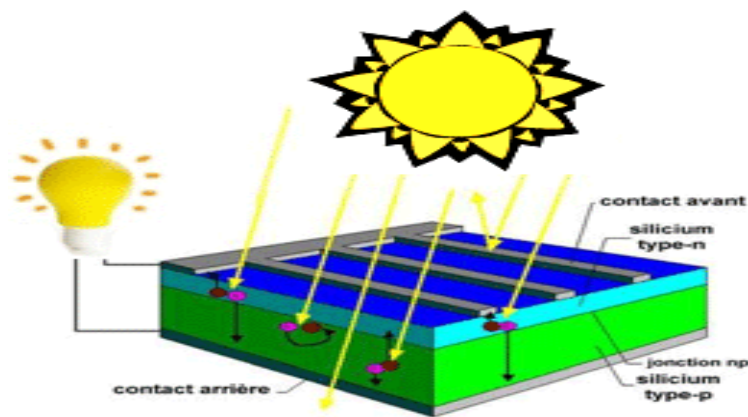


Fig. 2.3. Principe de fonctionnement de cellule [39].

2.5. Les différentes générations des cellules solaires

Les cellules solaires sont généralement classées en première, deuxième et troisième génération. Les cellules solaires à silicium cristallin (c-Si et mc-Si) sont acceptées en première génération, tandis que les cellules à couches minces (a-Si et CdTe) sont considérées en

deuxième génération. Les cellules solaires de troisième génération sont basées sur les nanotechnologies: cellules solaires tandem, super tandem, à bande intermédiaire, etc. [40].

2.5.1. Première génération: (Silicium cristallin mono et poly)

Les cellules solaires de première génération (silicium cristallin) sont divisées en deux types: monocristallin (c-Si, mon) et poly cristallin (mc-Si, poly-Si). L'efficacité des cellules solaires monocristallines est de 15 à 18%. Le coût de ce type de cellules est de 4,5 \$ / W[40].

2.5.1.1. Les cellules monocristallines : Elles sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 16 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse [40, 41].



Fig. 2.4. Cellule monocristalline [40].

2.5.1.2. Les cellules poly cristallines : Elles sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples et leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Durée de vie estimée 30 ans. L'efficacité des cellules solaires poly cristallines est de 12 à 15% [40,41].

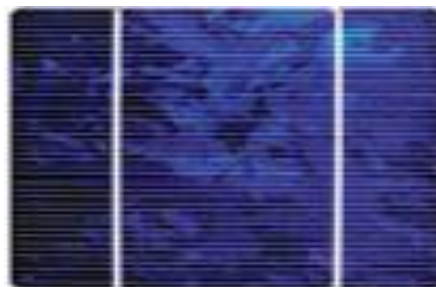


Fig. 2.5. Cellule poly cristalline [40].

2.5.2. Deuxième génération:(couches minces "thin films")

Les cellules solaires de deuxième génération (couches minces) sont regroupées en deux espèces: Amorphe (a-Si) et Tellure de cadmium (CdTe). Ces types de cellules représentent 7% du marché des cellules solaires en raison de leur faible rendement. Ces cellules structurées assez minces, dont l'épaisseur varie de 1 à 4 μm seulement, ont une efficacité de 7 à 14%. Le prix de fabrication est aussi bas que 1 \$ / W [40].

2.5.2.1. Les cellules au Telluride de Cadmium (CdTe) : L'efficacité des cellules solaires à base de tellure de cadmium est d'environ 17%. Le prix de fabrication est nettement inférieur à celui des autres types de cellules solaires. L'Université de Californie à Riverside a utilisé deux panneaux photovoltaïques en CdTe pour produire de l'hydrogène par électrolyse en 1992. Ce système est considéré comme le premier du genre [40, 41].



Fig. 2.6. Cellule au Telluride de Cadmium [40].

2.5.2.2. Les cellules au silicium amorphe (a-Si) : Ses atomes sont donc agencés sans réelle organisation, ce qui leur permet de mieux capter la lumière (par rapport au silicium cristallin). Problème : les charges générées ont plus de difficulté pour se déplacer à cause de la désorganisation de la matière, ce qui se traduit par un mauvais coefficient de conversion. Par conséquent, leur rendement est faible. L'efficacité des cellules solaires amorphes (a-Si) est de 8 à 10% seulement [40, 41].

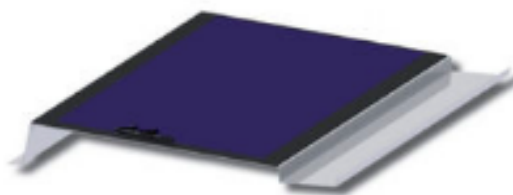


Fig. 2.7. Cellule au silicium amorphe [40].

2.5.3. Troisième génération : (Perovskites, multi-jonction, concentration)

Les cellules solaires de troisième génération sont des cellules solaires basées sur la nanotechnologie (pérovskites, multi-jonction, concentration, etc.) et sont en phase de recherche et développement. Étant donné que ces types de cellules ont le potentiel d'efficacité supérieure, cela les rend très attractives et une avancée majeure est considérée si elles peuvent être fabriquées de manière rentable. Le coût prévu est de 0,4 \$ / kW [40].

2.5.3.1. Les Cellules Pérovskites : sont des cellules composées d'un élément hybride organique-inorganique ayant une structure de pérovskite. En 2016, le rendement est passé à 22,1 % ce qui en fait une alternative prometteuse ! Leur coût de production est faible. L'inconvénient de ces cellules réside dans leur instabilité et faible résistance aux agents extérieurs (eau, températures...) [42].

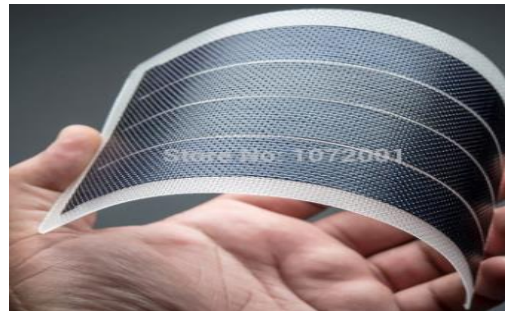


Fig. 2.8. Cellule Pérovskites [42].

2.5.3.2. Les Cellules multi-jonction : Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces avec une base en silicium affichant un rendement de conversion de 32 % à 39 % [39, 42].

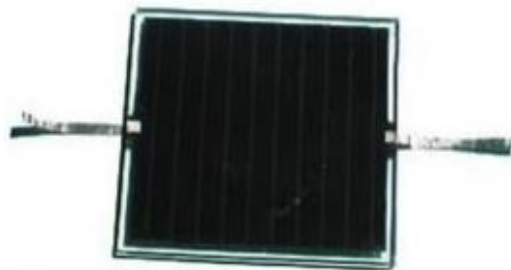


Fig. 2.9. Cellule multi-jonction [42].

2.5.3.3. Les Cellules à concentration : Le photovoltaïque à concentration est basé sur un principe simple : la lumière du soleil est concentrée plusieurs centaines de fois par un dispositif optique (miroir parabolique ou lentille de Fresnel) avant d'atteindre la cellule photovoltaïque. et ainsi d'avoisiner des rendements cellules de l'ordre de 40%. Leur

sensibilité à la température est largement inférieure aux cellules en silicium, les rendant particulièrement efficaces en zones à fort ensoleillement [42].



Fig. 2.10. Cellule à concentration [42].

2.6. Le rendement des différentes technologies des cellules photovoltaïques

Le rendement photovoltaïque est un facteur très important pour les composants photovoltaïques, il se définit comme étant le taux de conversion d'énergie des cellules PV. Le rendement est aussi le pourcentage de l'énergie solaire qui est convertie en électricité par l'intermédiaire d'une cellule solaire [39].

Le tableau suivant compare le rendement des différentes technologies des cellules PV.

Tableau.2.1. Rendement des différentes technologies [39, 40, 42].

Génération	Type des cellules	Rendement des cellules
Première	Silicium monocristallines	17 à 20 %
	Silicium poly cristallines	16 à 18%
Deuxième	CdTe(Telluride de Cadmium)	15 %
	silicium amorphe	13,4 %
Troisième	Pérovskites	22,1 %
	Cellules à concentration	40%
	Cellules multi-jonction	32 % à 39%

2.7. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent de la cellule PV est illustré à la figure 1. Dans le diagramme ci-dessus, la cellule PV est représentée par une source de courant en parallèle avec une diode. R_s et R_p représentent respectivement les résistances série et parallèle. Le courant et la tension de sortie de la cellule PV sont représentés par I et V [43].

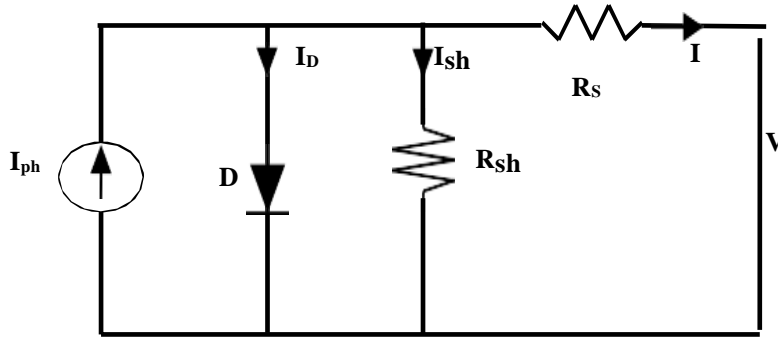


Fig. 2.11. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [43].

Dans notre travail, nous avons utilisé le modèle mathématique du module solaire à exponentiel simple.

Le courant de sortie d'une cellule photovoltaïque (I) se met sous la forme mathématique suivante [43, 44]:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (2.1)$$

Où :

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).

I_d : Le courant circulant dans la diode.

I_{sh} : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

L'expression qui donne le courant de la diode ; il est représenté sous la forme suivante [43, 44] :

$$I_d = I_o \cdot [\exp(\frac{V + R_s I}{n V_T}) - 1] \quad (2.2)$$

Où :

I_o : courant de saturation de diode.

V : tension aux bornes.

R_s : résistance en série d'un module PV.

R_{sh} : résistance shunt intrinsèque de la cellule.

V_T : tension thermique; n : facteur d'idéalité température.

n : facteur d'idéalité.

Le courant dérivé par la résistance parallèle est sera donc [38, 45]:

$$I_{sh} = \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

En substituant les équations (2.2; 2.3) dans l'équation (2.1), le courant I devient [38, 45]:

$$I = I_{ph} - I_o \cdot \left[\exp\left(\frac{V + R_s \cdot I}{n V_T}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (2.4)$$

Où :

$$V_T = \frac{K \cdot T}{q} \quad (2.5)$$

q : charge d'électrons ($1.60217646 \times 10^{-19} \text{C}$).

K : constante de Boltzmann ($1.3806503 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$).

T : condition de température de travail.

2.8. Module photovoltaïque

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmentera [46, 47].



Fig. 2.12. Modules photovoltaïques [46].

2.9. Association des modules photovoltaïques

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité du courant d'utilisation. Toutefois, il est nécessaire de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'exclusion d'une ou plusieurs cellules (dus à de l'ombrage, de la poussière, etc...) peuvent endommager les cellules de façon permanente [35].

2.9.1. Association en série

L'association en série des modules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'un seul module [46, 48].

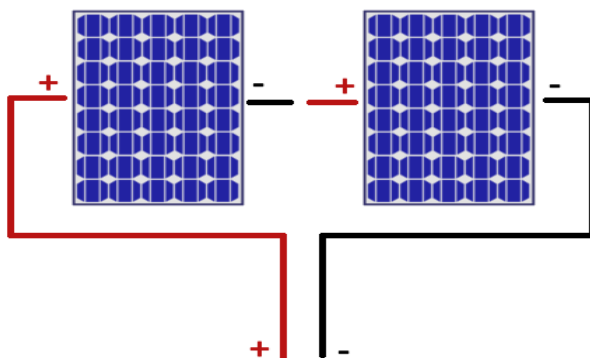


Fig. 2.13. Association série deux modules solaires.

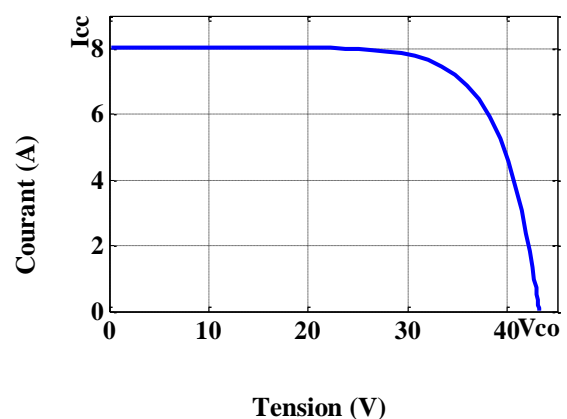


Fig.2.14. Caractéristiques $I = f(V)$ des modules en série aux conditions standards.

2.9.2 Association en parallèle

En additionnant des modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche [46, 48].

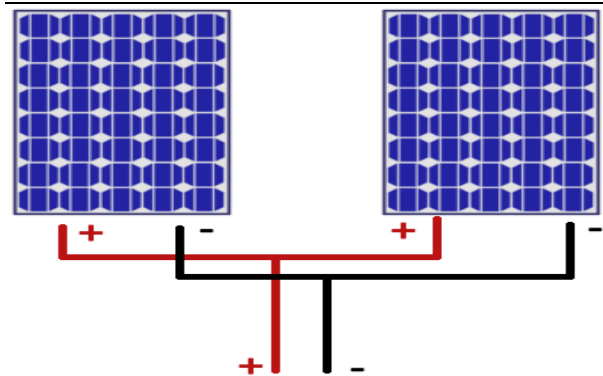


Fig. 2.15. Association parallèle deux modules solaires.

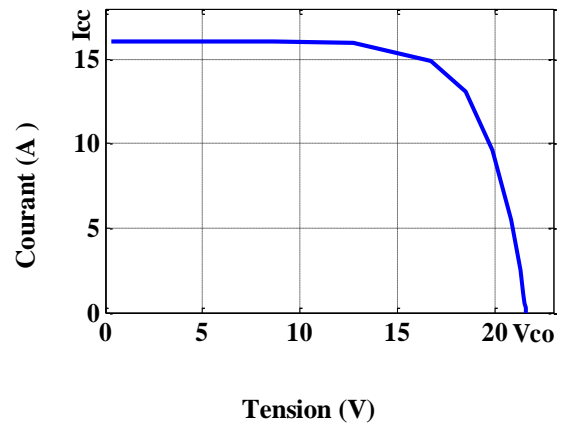


Fig.2.16. Caractéristiques $I=f(V)$ des modules en parallèle aux conditions standards.

2.9.3 Association série-parallèle

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est à dire série-parallèle [46, 48].

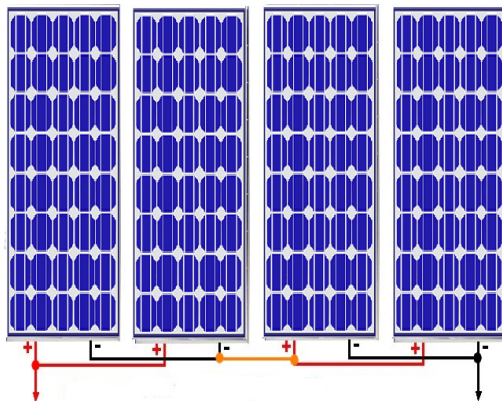


Fig. 2.17. Association mixte des modules solaires.

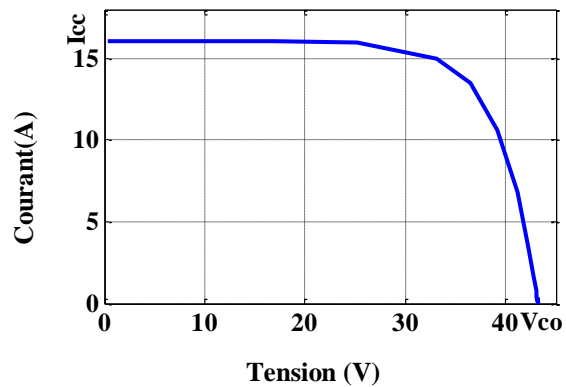


Fig.2.18. Caractéristiques $I=f(V)$ des modules en série-parallèle aux conditions standards.

2.10. Les caractéristiques électriques de module

Sous un éclairage donné, tout module photovoltaïque est caractérisé par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre le module. Trois grandeurs physiques définissent cette courbe [46] :

Tension de circuit ouvert, (V_{co})

La tension de circuit ouvert est obtenue quand le courant de module est nul. Il est lié à la résistance de shunt et à la barrière d'énergie. Sa valeur diminue avec la température et change peu avec l'insolation [47].

Courant de court-circuit, (I_{cc})

Le courant de court-circuit est le courant obtenu quand les bornes du module sont court-circuitées ($V=0$). Il augmente linéairement avec l'intensité d'illumination du module et est relié sur la surface éclairée, le spectre du rayonnement solaire et la température [47].

Point de puissance maximale, (P_m)

Son point en anglais : maximal power point (MPP), obtenu pour une tension et un courant maximal [19] :

$$P_m = I_m \cdot V_m \quad (2.6)$$

La figure (2.19) représente la courbe $I=f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

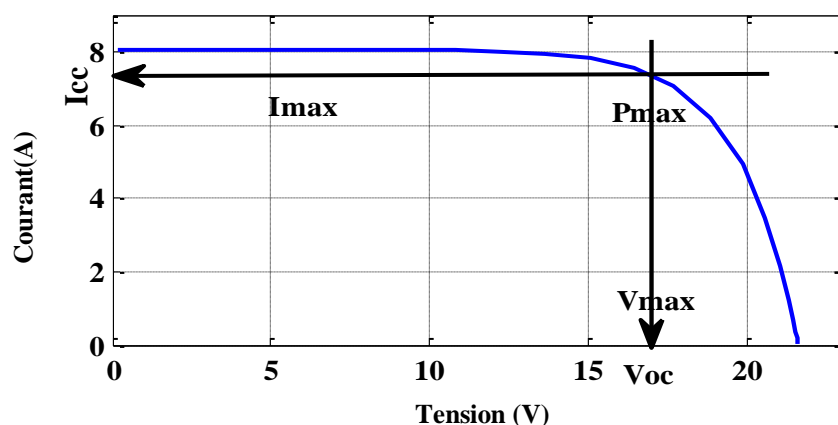


Fig. 2.19. Caractéristique courant-tension (I-V) d'un module photovoltaïque.

Autres paramètres du module solaire :**Factor de suffisance, (FF)**

Le facteur de suffisance d'un module solaire est défini comme le rapport d'une puissance maximale à la puissance calculée en multipliant la tension de circuit-ouvert par le courant de court-circuit. Cela reflète combien de résistances en série et peu de résistances shunt dans la cellule solaire. Pendant que le module solaire se dégrade avec l'âge, sa résistance en série tend à augmenter ce qui conduit à un facteur inférieur de suffisance [49].

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{cc}} \quad (2.7)$$

Rendement de la cellule, (η)

Le rendement d'un module solaire est défini comme le rapport de la puissance maximale fournie par le module à la puissance lumineuse d'incident [49].

$$\eta = \frac{P_m}{GA} \quad (2.8)$$

A est la surface génératrice en m² et G ensoleillement en W/m²

2.11. Générateur photovoltaïque

Un générateur photovoltaïque se compose d'un certain nombre de modules formés par un certain nombre de cellules photovoltaïques, connectées ensemble en série et en parallèle pour fournir le courant et la tension nécessaires [49].



Fig. 2.20. Champ photovoltaïque [49].

2.12. Simulation d'un générateur photovoltaïque

Le type de modèle PV poly-cristallin (HA-125-12) a été choisi. Il est constitué de 36 cellules d'une puissance de 125 W. Le Tableau (2.1) résume les caractéristiques de ce module PV.

Les caractéristiques électriques du panneau sont données dans le tableau suivant :

Tableau .2.2. Caractéristique électrique du panneau dans les conditions standards
<CST> $T=25^{\circ}\text{C}$, $G=1000\text{W}/\text{m}^2$.

Puissance optimale	125W
Tension de circuit ouvert (V_{co})	21.6 V
Courant de court-circuit (I_{cc})	8.05A
Tension à la puissance maximale (V_m)	17.25 V
Courant à la puissance maximale (I_m)	7.25 A

2.12.1. Modèle de simulation

Nous avons procédé à la mise en œuvre d'un modèle du générateur photovoltaïque sous Matlab / Simulink. Le modèle comporte deux paramètres d'entrée (la température et l'ensoleillement) et deux paramètres de sortie (la tension et le courant). La figure (2.21) illustre le modèle du générateur photovoltaïque.

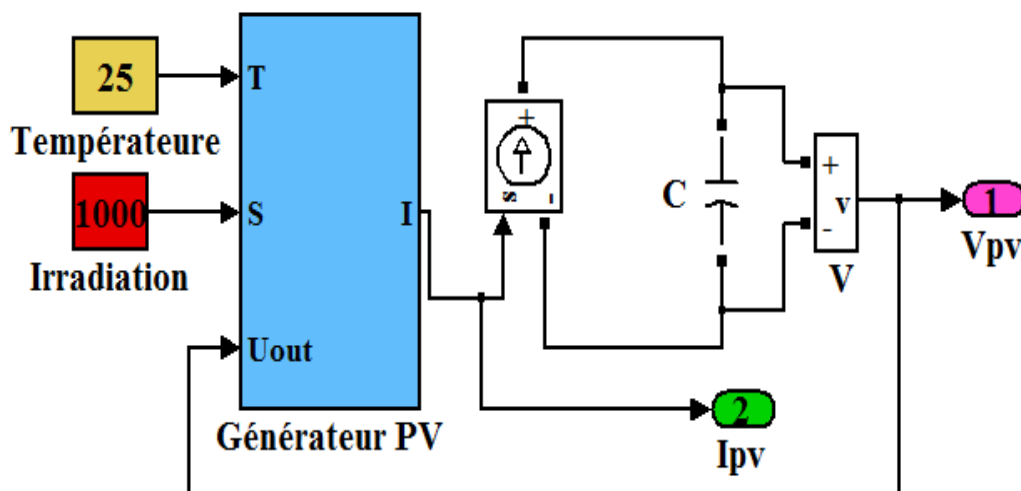


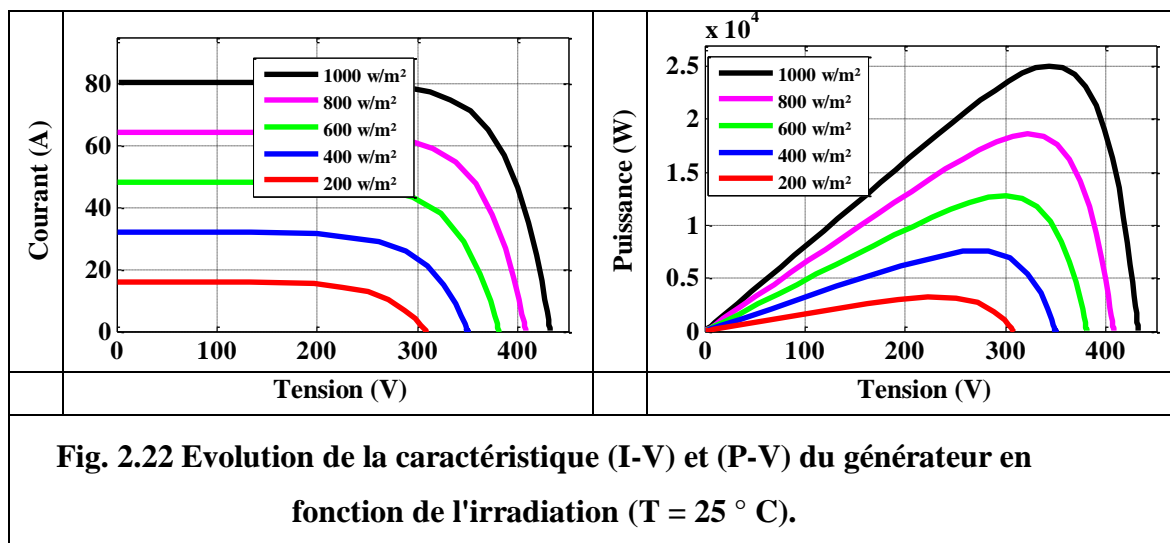
Fig. 2.21. Modèle de simulation d'un générateur PV.

2.12.2. Effets de l'irradiation et de la température

Nous allons étudier la simulation du générateur photovoltaïque qui est composé de 20 modules en série et de 10 modules en parallèle pour former un générateur PV de puissance de 25Kw dans les conditions standard ($E=1000\text{W/m}^2$, $T=25^\circ\text{C}$),

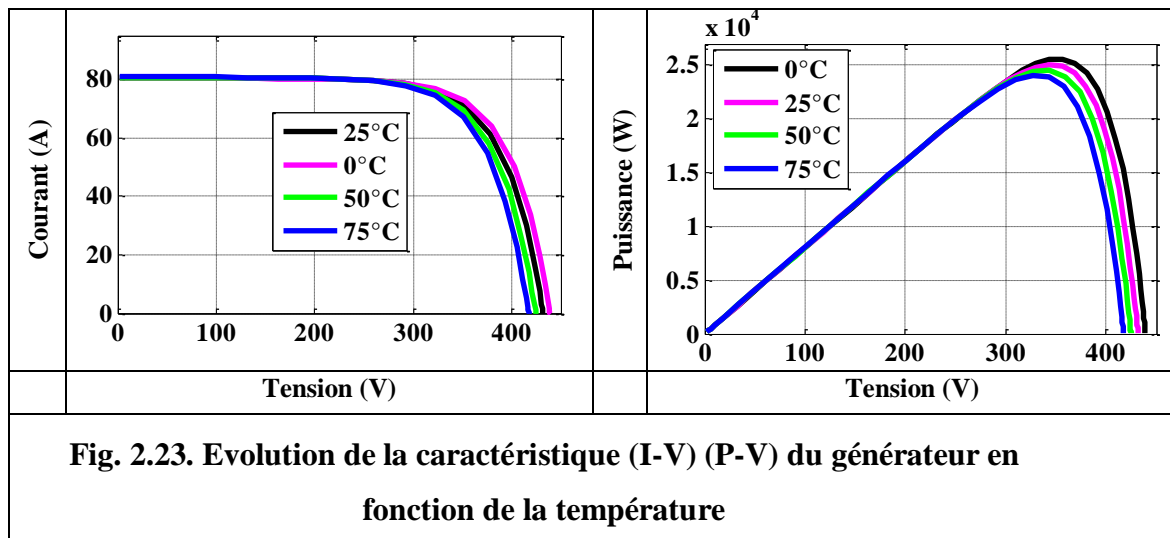
L'effet des conditions météorologiques est simulé à l'aide de Matlab / Simulink. Les caractéristiques I-V et P-V pour différentes conditions d'irradiation solaire et de température sont représentées respectivement :

2.12.2.1. Influence de l'irradiation



Le courant varie directement avec le rayonnement lumineux or la tension restant relativement constante. On remarque dans la figure (2.22) que le courant optimal est très sensible à l'éclairement. Par contre la tension optimale varie très peu avec l'éclairement.

2.12.2.2. Influence de la température



Quand la température diminue, la tension à vide augmente, mais le courant de court-circuit diminue dans des proportions moindres. On remarque dans la figure (2.23) la diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température.

Aussi, on considère en première approximation que le fonctionnement optimal du générateur PV correspond sensiblement à un fonctionnement à tension optimale constante.

2.13. Avantages et inconvénients PV

Les Avantages [35, 47] :

- L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

Les inconvénients [35,50]:

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru.

2.14. Conclusion

Le monde de la conversion photovoltaïque connaît depuis quelques années une évolution profonde associé à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu général sur les systèmes photovoltaïques. Dans la première partie un petit rappel sur le concept et l'histoire de l'énergie photovoltaïque ainsi le principe de la conversion photovoltaïque et les différents types des cellules photovoltaïques. La seconde partie du chapitre est consacrée à la modélisation d'une cellule photovoltaïque et avantages et inconvénients du système photovoltaïque.

Chapitre 3

Les techniques de poursuite du MPPT

3.1. Introduction

La demande sur l'énergie électrique ne cesse d'augmenter ces dernières années ainsi que les contraintes liées à sa production, tels que l'effet de pollution et de réchauffement climatique global, conduisent les recherches vers le développement des sources d'énergie renouvelables [51].

Dans ce contexte, les systèmes photovoltaïques (PV) offrent une solution très concurrentielle. Pour surmonter le problème de rendement des panneaux solaires et obtenir un rendement maximum, il est nécessaire d'optimiser la conception de toutes les parties du système PV. En outre, il est nécessaire d'optimiser les convertisseurs (continu/continu) DC/DC employés comme interface entre le générateur PV et la charge afin d'extraire le maximum de puissance et ainsi faire fonctionner le générateur GPV à son point de puissance maximum (MPP) à l'aide d'un contrôleur MPPT (Maximum Power Point Tracking), par conséquence, obtenir un courant électrique maximum sous la variation de la charge et des conditions atmosphériques (luminosité et température) [52,53].

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant [1], aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPPT du générateur photovoltaïque, Les méthodes évaluées sont: perturbation et observation (P&O), Technique de conductance incrémentielle (INC) et logique floue (FLC).

Dans ce chapitre, nous allons étudier et simuler différentes méthodes de poursuite du point de puissance maximale, et le principe convertisseur (boost), Ensuite, les résultats et discussions des simulations des trois techniques de poursuite seront discutés.

3.2. Convertisseur DC-DC

Le convertisseur continu - continu est un dispositif de l'électronique de puissance mettant en œuvre un ou plusieurs interrupteurs commandés et qui permet de modifier la valeur de la tension d'une source de tension continue. Si la tension délivrée en sortie est inférieure à la tension appliquée en entrée, le hacheur est dit abaisseur (Buck) dans le cas contraire, il est dit élévateur (Boost). Le convertisseur dévolteur survolteur combine les propriétés des configurations d'élévateur et d'abaisseur (Buck-Boost) [53]. En ce qui concerne notre travail, on considère le convertisseur élévateur "hacheur boost".

3.2.1. Hacheur élévateur (Boost)

Un hacheur élévateur (Boost) est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. On utilise un convertisseur élévateur lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Le schéma de la figure (3.3), représente le circuit électrique de l'élévateur [35].

Comme le montre la figure (3.1), le convertisseur élévateur est composé de la résistance R , le transistor S et de la diode D . Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultante du découpage sur la tension et le courant de sortie. [54].

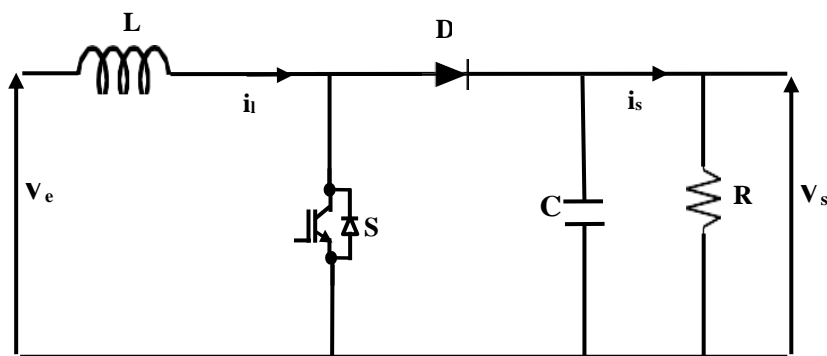


Fig. 3.1. Circuit électrique de base du hacheur survolteur [55].

3.2.1.1 .Principe de Fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur survolteur peut être divisé en deux phases :

Phase 1 : Pour $t \in [0 \text{ à } \alpha.T]$:

Le transistor est passant et la diode D est bloquée, cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance, donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique et la charge est alors déconnectée de l'alimentation [55].

Schéma équivalent :

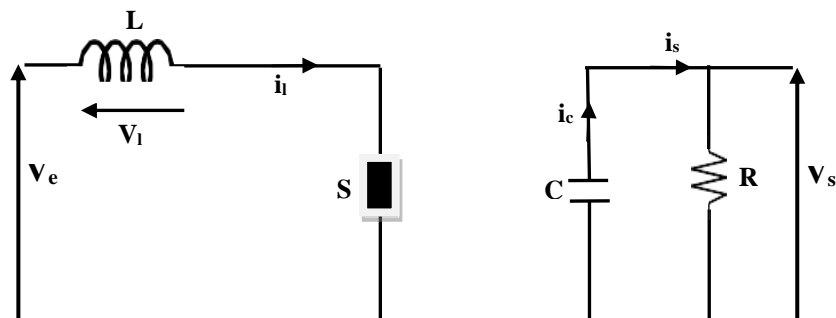


Fig. 3.2. Circuit équivalent du convertisseur boost pour T_{on} [55].

La tension d'entrée [56, 57] :

$$V_l = V_e \quad (3.1)$$

Avec

$$V_l = L \frac{di_l}{dt} \quad (3.2)$$

Le courant dans la bobine :

$$i_l(t) = \frac{V_e}{L} t + I_{\min} \quad (3.3)$$

Le courant dans la diode :

$$i_d(t) = 0 \quad (3.4)$$

Le courant dans le transistor :

$$i_t(t) = i_l(t) \quad (3.5)$$

Phase 2 : Pour $t \in [\alpha.T \text{ à } T]$:

Le transistor est bloqué et la bobine L restitue l'énergie emmagasinée, la diode est passante donc V_s est supérieur à V_e [55].

Schéma équivalent :

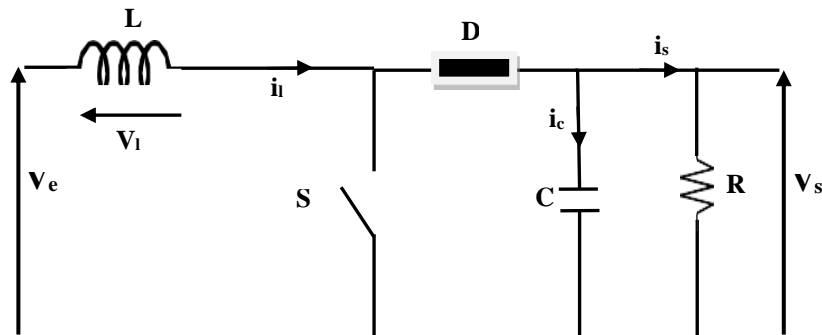


Fig. 3.3. Circuit équivalent du convertisseur boost pour Toff [55].

La tension de sortie [56, 57] :

$$V_s = V_e - V_l \quad (3.6)$$

$$V_l < 0 \quad (3.7)$$

En conséquence

$$V_s > V_e \quad (3.8)$$

Le courant dans la bobine :

$$i_l(t) = -\frac{V_s - V_e}{L}t + I_{\max} \quad (3.9)$$

Le courant dans la diode :

$$i_d(t) = i_l(t) \quad (3.10)$$

Le courant dans le transistor :

$$i_t(t) = 0 \quad (3.11)$$

3.2.1.2 .Les paramètres d'élévateur

La tension de sortie (V_s) et le rapport cyclique (D) sont donnés par les équations suivantes [58]:

$$V_s = \frac{V_e}{1-D} \quad (3.12)$$

Alors,

$$D = 1 - \frac{V_e}{V_s} \quad (3.13)$$

En supposant un circuit sans perte,

$$V_e \cdot I_e = V_s \cdot I_s = \frac{I_s \cdot V_e}{1-D} \quad (3.14)$$

Le courant de sortie moyen est alors:

$$I_s = I_e(1-D) \quad (3.15)$$

Les relations des filtres d'entrée et de sortie (L) et (C) sont respectivement données par les équations suivantes [59]:

$$L = \frac{D(1-D)^2 \cdot R}{2 \cdot f} \quad (3.16)$$

$$C = \frac{D}{2 \cdot f \cdot R} \quad (3.17)$$

Par conséquent, les valeurs de conception du convertisseur élévateur sont présentées dans le tableau (3.1).

Tableau.3.1. Valeurs de calcul du convertisseur élévateur (Boost).

Les parameters	Les valeurs
Tension d'entrée (V_e)	345V
Tension de sortie (V_s)	600 V
Fréquence de commutation (f)	4 KHz
Rapport de cyclique (D)	0.425
Inducteur (L)	0.281mH
Condensateur (C)	3.32 μF

La Figure (3.4), illustre les tensions d'entrée(V_e) et de sortie(V_s) du convertisseur élévateur. La tension de sortie correspondante est obtenue à partir de la tension d'entrée à un rapport cyclique choisi.

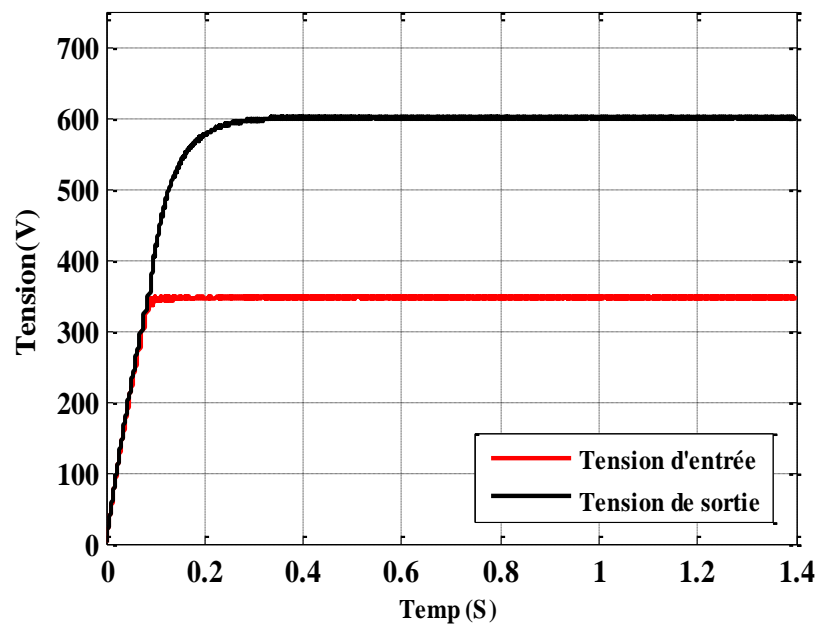


Fig. 3.4. Tensions d'entrée et de sortie du convertisseur élévateur.

3.3. Le point de puissance maximum (MPPT)

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est un algorithme inclus dans les contrôleurs de charge utilisés pour extraire la puissance maximale disponible du système photovoltaïque quelque soient les conditions météorologiques. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique (D) en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le générateur PV [60].

Il est généralement conçu avec un convertisseur qui régule la puissance tirée du générateur photovoltaïque,[61] . Le schéma fonctionnel du système est présenté à la Figure (3.5) :

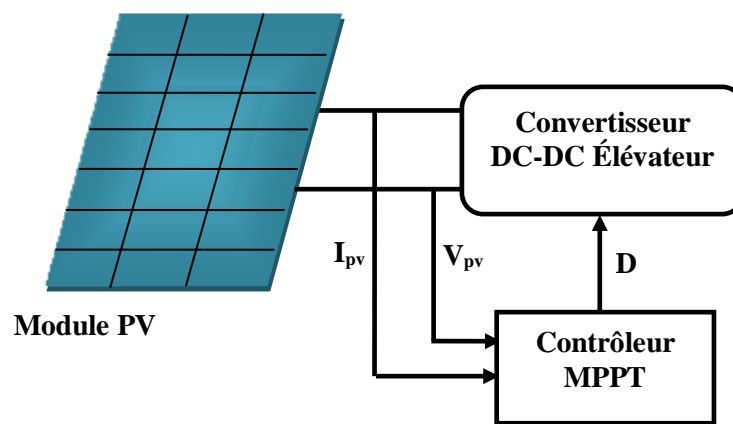


Fig. 3.5. Schéma fonctionnel à MPPT.

3.4. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT

Nous devons chercher le point de puissance maximale, pour cela nous comparons un point de puissance actuel $P(k)$ avec un point de puissance précédent $P(k-1)$.

Si $P(k-1) = P(k)$, la dérivée est nulle, cela veut dire le point de fonctionnement est situé maximum.

Si $P(k-1) < P(k)$, la dérivée est positive, cela signifie que nous nous rapprochons du point de puissance maximale MPPT. Si la dérivée est négative, cela veut dire que nous avons dépassé le point de puissance maximale. Ainsi, au démarrage du système, la recherche de MPPT se fait progressivement, en cherchant le premier point maximum [62].

Le concept de base de MPPT sur une courbe PV d'un générateur photovoltaïque est illustré à la figure (3.6).

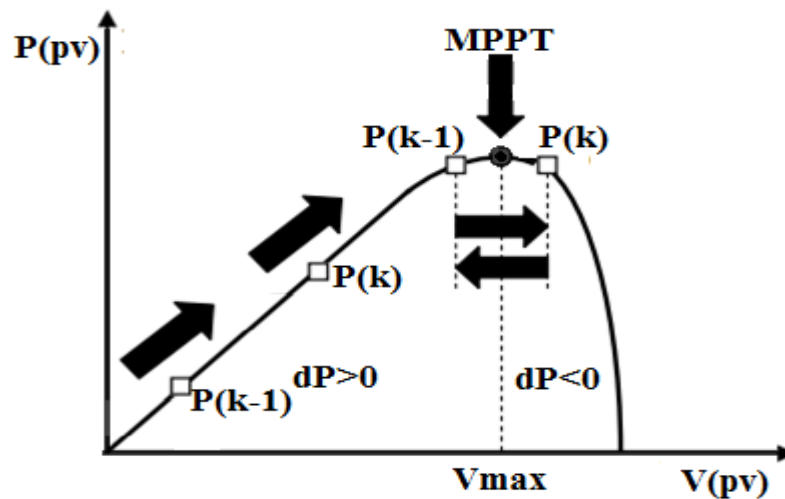


Fig. 3.6. Principe de fonctionnement d'une commande MPPT [62].

3.5. Les Techniques MPPT

Au cours des dernières décennies, de nombreuses méthodes pour trouver le MPPT ont été développées. Les techniques diffèrent dans de nombreux aspects tels que les capteurs requis, la complexité, le coût, la portée d'efficacité, vitesse de convergence, suivi correct en cas d'irradiation ou changement de température, le matériel nécessaire à la mise en œuvre ou la popularité, entre autres. Certaines des techniques MPPT les plus populaires sont [63, 64]:

- Perturbation et observation.
- Incrémentation de la Conductance.
- Courant de court-circuit.
- Tension de circuit ouvert.
- Logique floue.
- Réseaux de neurones.

3.5.1. La Technique perturbation et observation

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT. Elle est basée sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} où en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC. L'avantage de cette dernière technique est qu'elle est simple à mettre en œuvre. Par contre, elle possède l'inconvénient du aux oscillations autour du MPPT en régime établi et une perte occasionnelle de la recherche du MPPT lors de changement rapide des conditions climatiques. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du MPPT, il faut

donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser [63, 65].

D'abord la tension $V(k)$ et le courant $I(k)$ sont mesurés pour calculer la puissance $P(k)$. Cette valeur $P(k)$ est comparée à la valeur de la puissance obtenue durant la dernière mesure $P(k-1)$. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du générateur PV est supérieure à la valeur précédente $P(k-1)$ alors on garde la même direction de perturbation du cycle précédente si non on inverse la perturbation du cycle précédent. De même manière répété jusqu'à ce que le point maximal soit suivi [65, 66]. Le modèle MATLAB / SIMULINK de la méthode perturbation et observation (P & O) est présenté à la figure (3.7).

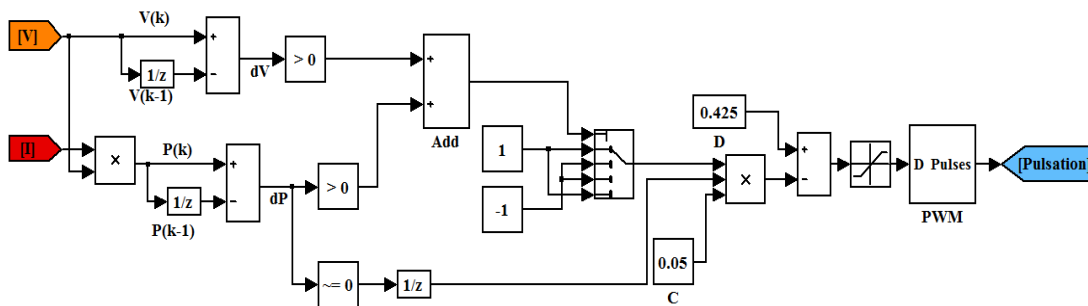


Fig. 3.7. Modèle MATLAB / SIMULINK de la méthode perturbation et observation.

La figure (3.8) montre l'organigramme de l'algorithme de la méthode 'P&O'

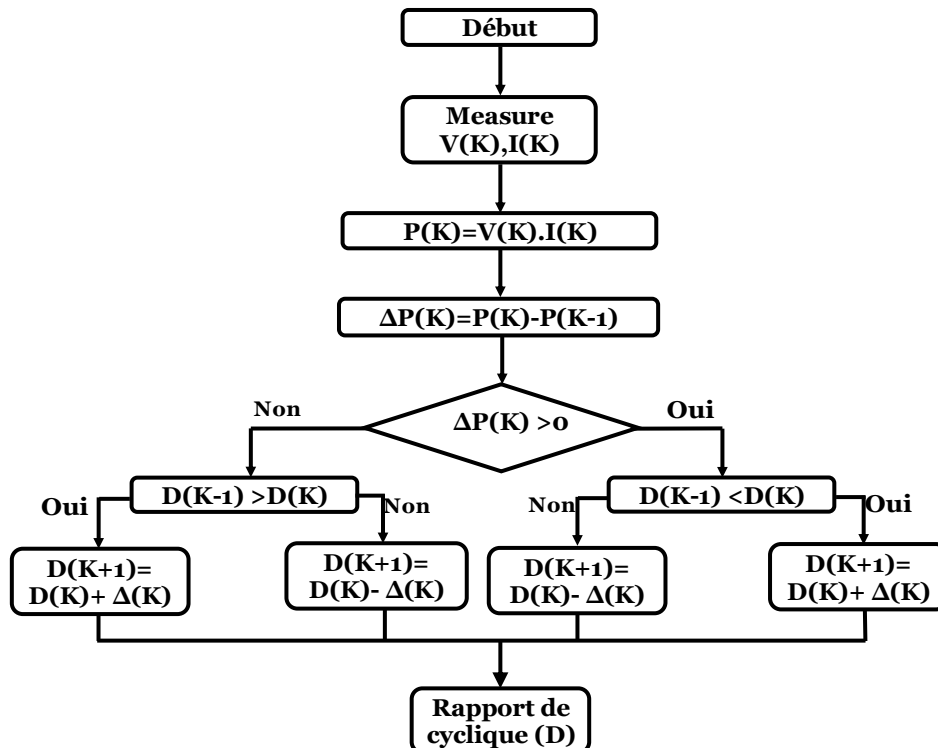


Fig. 3.8. Organigramme de l'algorithme perturbation et observation [67].

3.5.2 La technique d'incrément de la conductance

L'algorithme de l'incrément de la conductance est le plus couramment utilisé dans les applications de systèmes PV en raison de sa facilité de mise en œuvre et simplicité [67].

L'avantage principal de cet algorithme au-dessus de la méthode de P&O est la stabilité de son processus de cheminement de puissance. Cependant, il a comme inconvénient la réponse lente. En outre, le procédé de différentiation sous les niveaux bas de l'insolation devient difficile et les résultats sont insuffisants [68].

L'algorithme de l'incrément de la conductance est effectué en comparant à chaque instant, la valeur de la conductance (I/V) avec (dI/dV) :

Si $dI/dV = -I/V$, le point de fonctionnement est situé à MPPT.

Si $dI/dV > -I/V$, le point de fonctionnement est situé à gauche du MPPT.

Si $dI/dV < -I/V$, le point de fonctionnement est situé à droite du MPPT.

Où I est le courant du générateur photovoltaïque et V est la tension du générateur photovoltaïque, ΔD est l'incrémental du rapport cyclique [69, 70].

Le modèle MATLAB / SIMULINK de la méthode de l'incrément de la conductance (INC) est présenté à la Fig. (3.9).

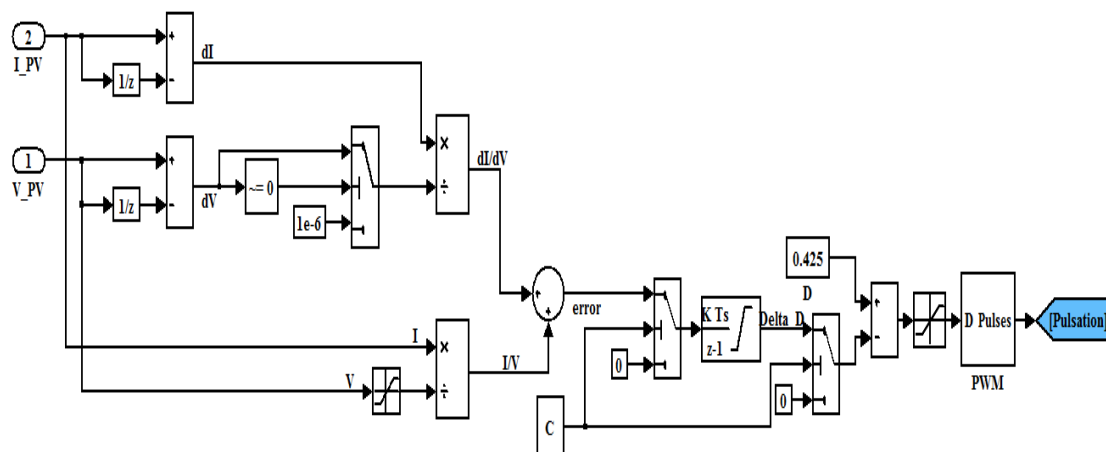


Fig. 3.9. Modèle MATLAB / SIMULINK de la méthode de l'incrément de la conductance.

L'organigramme de la conductance incrémentale (MPPT) est illustré dans la Figure (3.10).

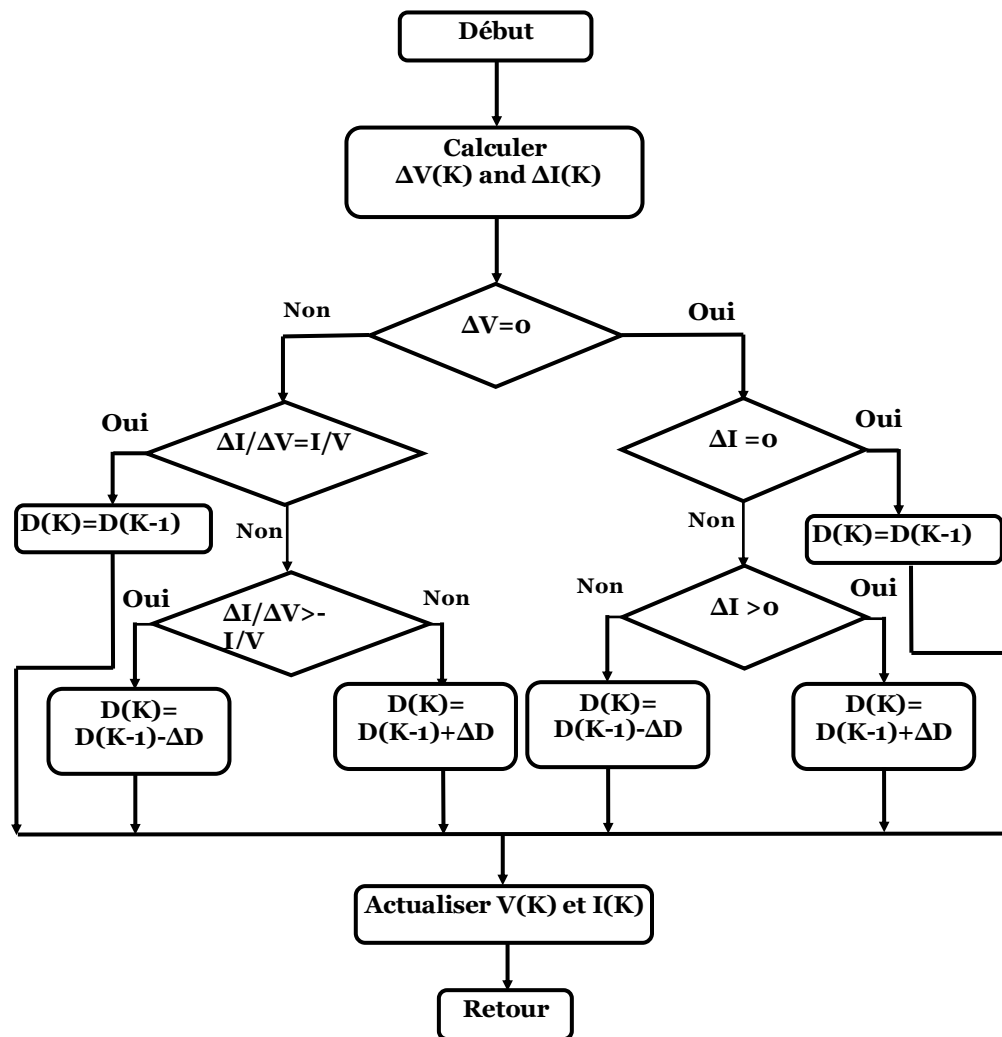


Fig. 3.10. Organigramme de l'algorithme l'incrémental de la conductance [69].

3.5.3. La technique de la logique floue

Cette méthode utilise la logique floue pour avoir un contrôleur plus rapide en termes de réponse et à augmenter la stabilité du système une fois le MPPT est atteint, [67]. La logique floue fonctionne avec des entrées imprécises, il n'a pas besoin d'un modèle mathématique précis et peut gérer bien la non-linéarité. Il s'appuie sur les connaissances et l'expérience de l'utilisateur plutôt que sur la compréhension technique du système. En outre, ils se sont avérés performants dans les changements d'étape de l'irradiation. Cependant, aucune preuve n'a été trouvée qu'ils fonctionnent bien sous les rampes d'irradiation [71]. Un autre inconvénient est que leur efficacité dépend beaucoup des compétences du concepteur; non seulement pour choisir le bon calcul d'erreur, mais aussi pour proposer une base de règles appropriée [70].

Le contrôleur flou se compose de trois blocs: la fuzzification des variables d'entrée qui est effectué dans le premier bloc, il permet le passage du domaine réel au domaine flou. Le deuxième bloc est consacré aux règles d'inférence, tandis que le dernier bloc est la defuzzification pour revenir au domaine réel. Cette dernière opération utilise le centre de gravité pour déterminer la valeur du résultat. La figure (3.11) montre la structure de base de l'utilisation d'un contrôleur à logique floue. E et dE sont les entrées, et D désigne la sortie du flou processus [67].

Le modèle MATLAB / SIMULINK du contrôleur de logique floue est présenté à la figure (3.12).

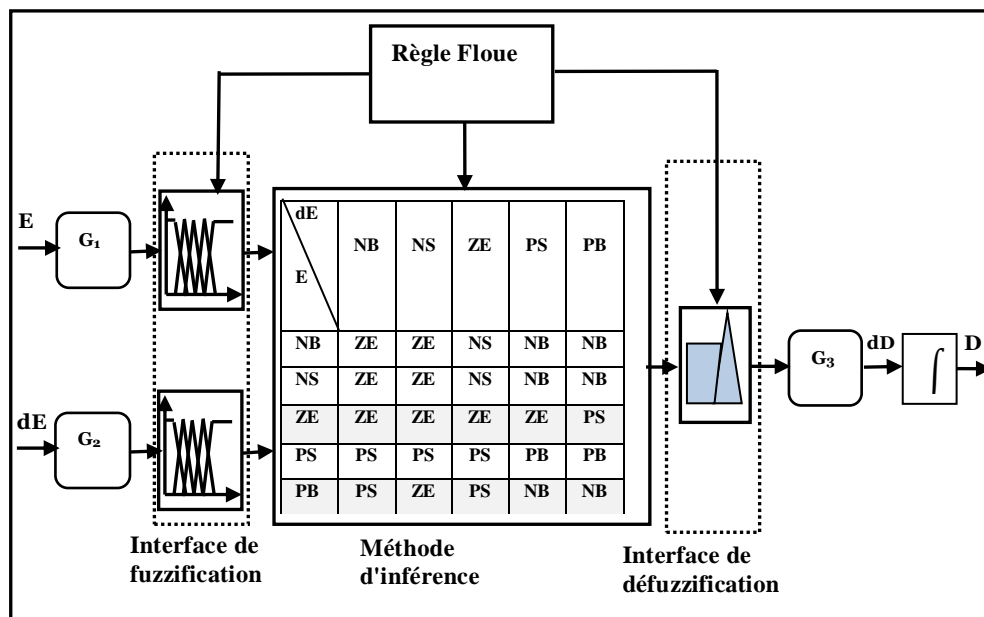


Fig. 3.11. Structure de base d'un contrôleur à logique floue.

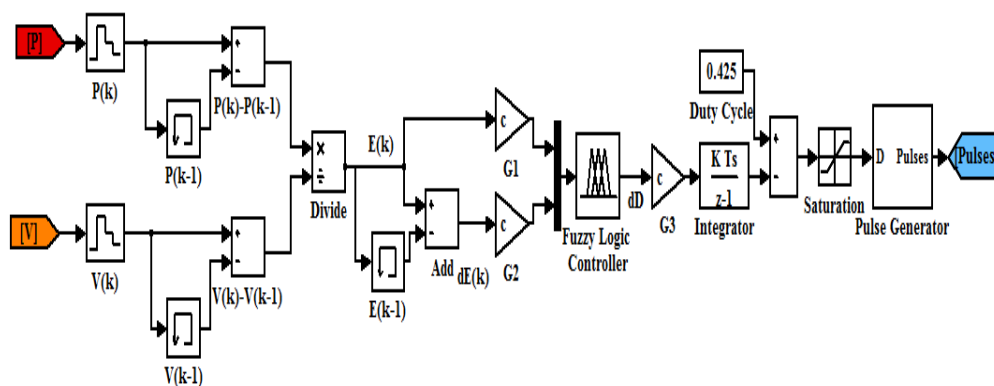


Fig. 3.12. Modèle MATLAB / SIMULINK la méthode proposée à base de logique floue.

3.5.3.1. Fuzzification:

La fuzzification permet la conversion de l'entrée physique en ensembles flous. Dans notre cas, nous avons deux entrées l'erreur E et le changement d'erreur dE qui exprime le déplacement direction du MPPT [72]. Ces entrées sont définies comme suit [73]:

$$E(K) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (3.18)$$

$$dE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (3.19)$$

Où $P_{pv}(k)$ et $V_{pv}(k)$ sont respectivement, la puissance et la tension du panneau PV à des instants d'échantillonnage (kTs).

G_1 et G_2 sont les gains pour l'erreur et le changement d'erreur respectivement, et G_3 est le gain pour la variation du rapport cyclique.

A partir de l'entrée $E(k)$ on peut savoir si le point de fonctionnement de la charge est situé à gauche ou à droite du point de puissance maximale de la courbe puissance-tension.

A partir de l'entrée $dE(k)$ on peut déterminer la valeur de la variation de l'erreur de l'entrée du contrôleur flou qui représente la direction du point de fonctionnement.

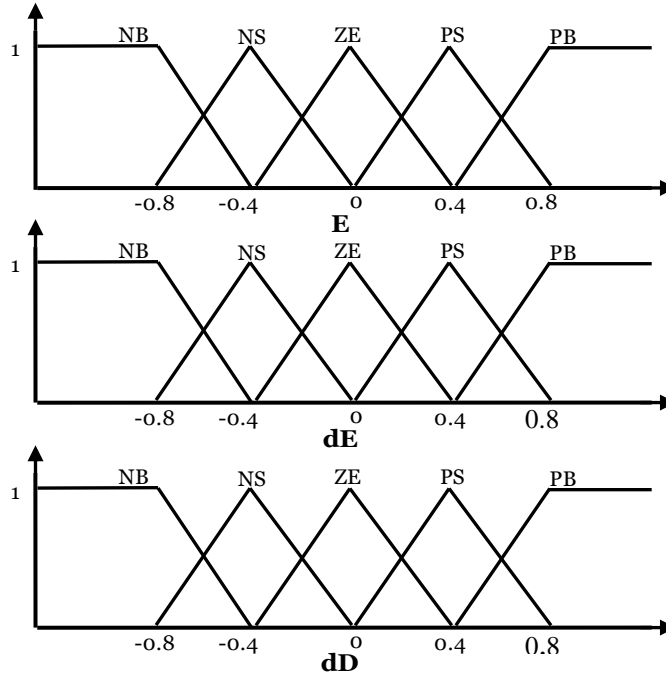


Fig. 3.13. Fonctions d'appartenance d'entrée et de sortie de: E , dE et dD .

Chaque univers de discours de l'erreur $E(k)$, changement d'erreur $dE(k)$ et la variable de sortie $dD(k)$ est divisé en cinq ensembles flous, y compris : négatif grand (NB), négatif petit (NS), zéro (ZE), positif petit (PS) et grand positif (PB). Toutes les fonctions d'appartenance sont montrées dans la figure(3.13).

3.5.3.2. Méthode d'inférence:

À l'étape de l'inférence, des décisions sont prises. En effet, il intègre des relations logiques entre les entrées et les sorties tout en définissant des règles d'appartenance. La méthode d'implication floue est utilisée pour identifier l'ensemble flou de sortie. Nous utilisons ici la méthode d'implication floue MIN-MAX [73].

Le tableau (3.4) montre la table de règles du contrôleur flou où les entrées de la matrice sont les ensembles flous de l'erreur (E) et le changement de l'erreur (dE). La sortie de cette table de règles est le changement du rapport cyclique (dD).

Tableau.3.2. Inférence floue.

$E \backslash dE$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	NS	NB	NB
NS	ZE	ZE	NS	NB	NB
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	PS
PS	PS	PS	PS	PB	PB
PB	PS	ZE	PS	NB	NB

3.5.3.3. Défuzzification:

Pour ce système, la sortie de logique floue est le facteur de forme (cycle), pour le calculer, nous avons utilisé le centre de gravité, la méthode du centre de gravité est à la fois très rapide et très méthode simple [73].

$$D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)(D_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (3.20)$$

Le rapport cycle est la sortie de la logique floue utilisée pour contrôler PWM qui génère une impulsion pour contrôler l'interrupteur dans le convertisseur DC-DC.

3.6. Simulation et interprétation

La figure (3.14), montre le schéma fonctionnel du modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé et simulé à l'aide du logiciel MATLAB / Simulink, afin de démontrer la supériorité de la logique floue basée sur les algorithmes MPPT par rapport à la méthode conductance incrémentielle et à la méthode perturbation et observation. Tout d'abord, nous suivrons le point de puissance maximum sous irradiation solaire variable et la température constante (25 ° C) en appliquant trois méthodes de MPPT. Les résultats de la simulation sont illustrés à la figure (3.15).

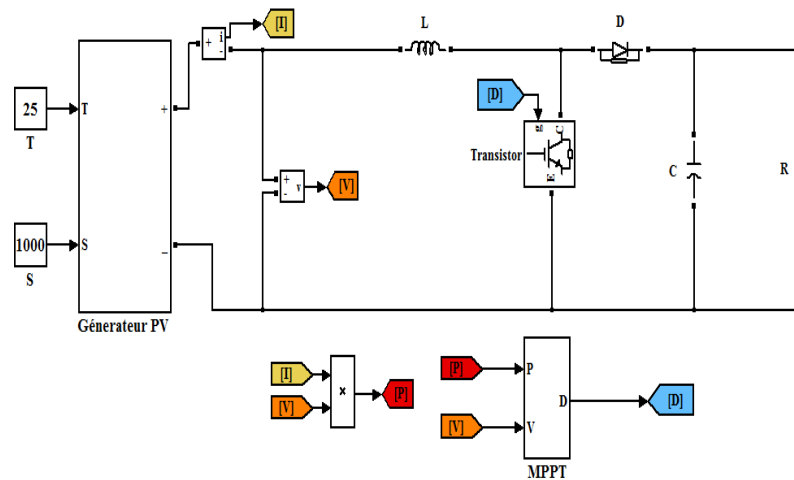


Fig. 3.14. Modèle photovoltaïque avec un convertisseur élévateur (boost) contrôlé par MPPT.

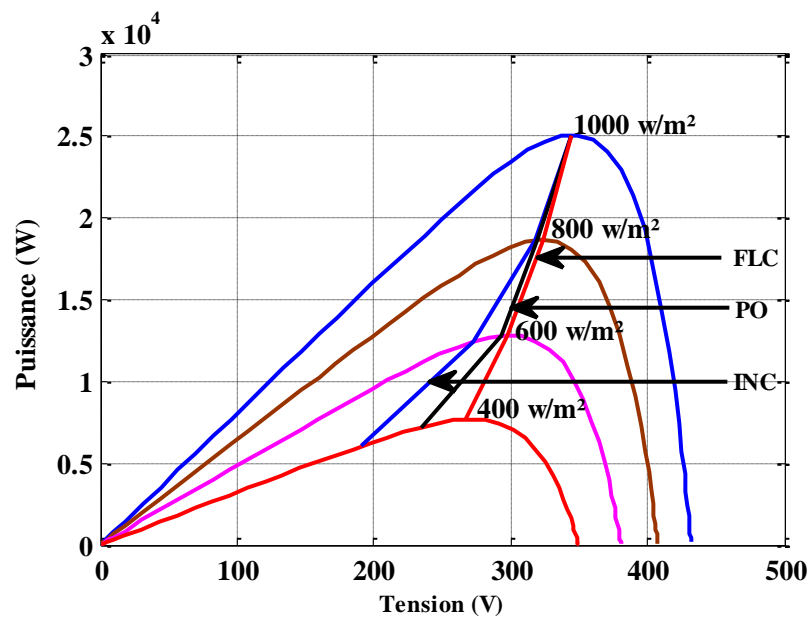


Fig. 3.15. Les points de puissance maximale simulés par P &O, INC et FLC sous température constante et éclairement varié.

Tableau.3.3. Les points de puissance maximale simulés par P & O, INC et FLC sous température constante et éclairement différent.

Irradiation solaire (W/m ²)	Puissance PV (W)		
	Logique Floue	Perturbation et Observation	Conductance Incrémentale
1000	2.509e ⁴	2.509e ⁴	2.509e ⁴
800	1.865e ⁴	1.860e ⁴	1.859e ⁴
600	1.283e ⁴	1.281e ⁴	1.245e ⁴
400	7660	7208	6070

Sur la base du tableau (3.3) et de la figure (3.11), nous observons que le point de puissance maximale obtenu en appliquant les trois techniques différentes est atteint lorsque l'éclairement énergétique est de 1 000 watts.

Cependant, avec un éclairement énergétique réduit, le point de poursuite optimal a été réduit par les méthodes Perturbation et Observation et à conductance incrémentielle par rapport au contrôle flou qui permet un suivi correct du point de puissance maximale.

La figure (3.16) et la figure (3.17) ci-dessous présentent la variation de la puissance et du zoom de cette évolution respectivement du générateur photovoltaïque avec les trois techniques dans sous conditions atmosphériques standard (1000W / m², 25 ° C) pour tester le temps de réponse des différentes techniques des MPPT.

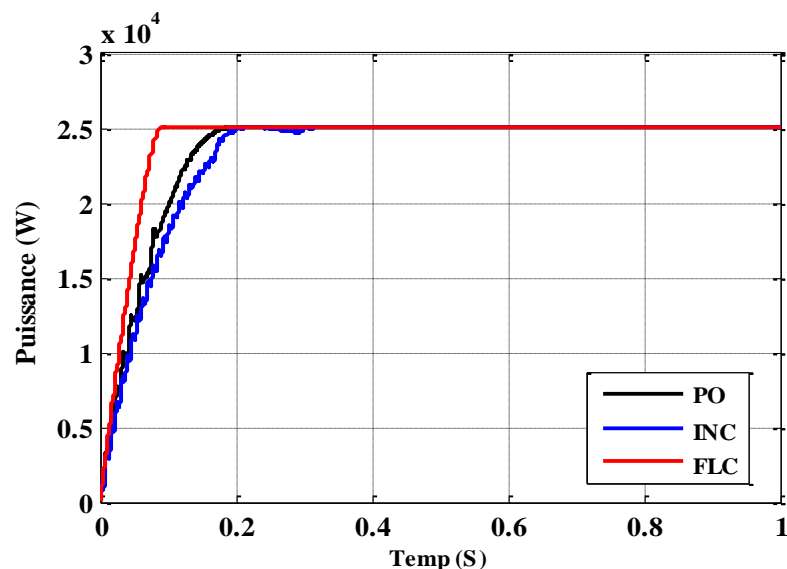


Fig. 3.16. Puissances du générateur photovoltaïque obtenues par les techniques : P&O, INC et FLC sous température constante et éclairement différent.

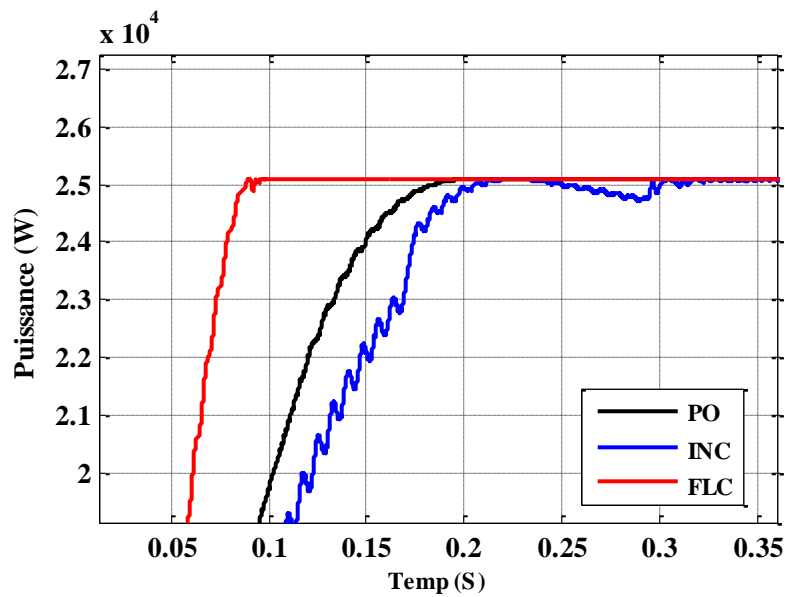


Fig. 3.17. Zoom des puissances du générateur photovoltaïque.

Tableau. 3.4. Temps de réponse des trois techniques.

Les méthodes MPPT	Temps de réponse (S)
Logique Floue	0.08
Perturbation et Observation	0.18
Incrément de la Conductance	0.2

Dans le tableau (3.4) basé sur la figure (3.16) et la figure (3.17), on peut remarquer que le temps nécessaire pour que la courbe de puissance PV atteigne un état stable pour les deux algorithmes est différent, il est d'environ 0,08 s pour l'algorithme à logique floue et de 0,15 s pour l'algorithme perturbation et observation, tandis que l'incrément de la conductance est de 0.2s.

En régime permanent, la puissance maximale fournie par le système PV commandé par la logique floue est plus stable et plus proche du MPPT par rapport aux autres types de commande MPPT. La commande P&O oscille autour du point de puissance maximale engendrant par conséquent des pertes de puissance.

Nous allons maintenant tester les performances des commandes MPPT précédemment développées en effectuant séparément des variations sur la température et l'ensoleillement.

Dans la figure (3.18), nous apportons des variations sur l'irradiation solaire et nous supposons que la température est constante et égale à 25°C. L'irradiation est de 0 à 0,7 seconde correspond au rayonnement (1000 W / m²), puis de 0,7 à 1 seconde réduite à 800 W / m² et après 1 seconde le retour de cette irradiation au point de départ.

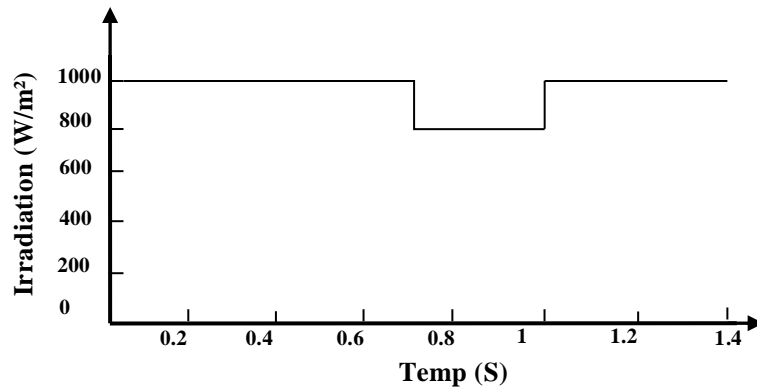


Fig. 3.18. La variation d'irradiation.

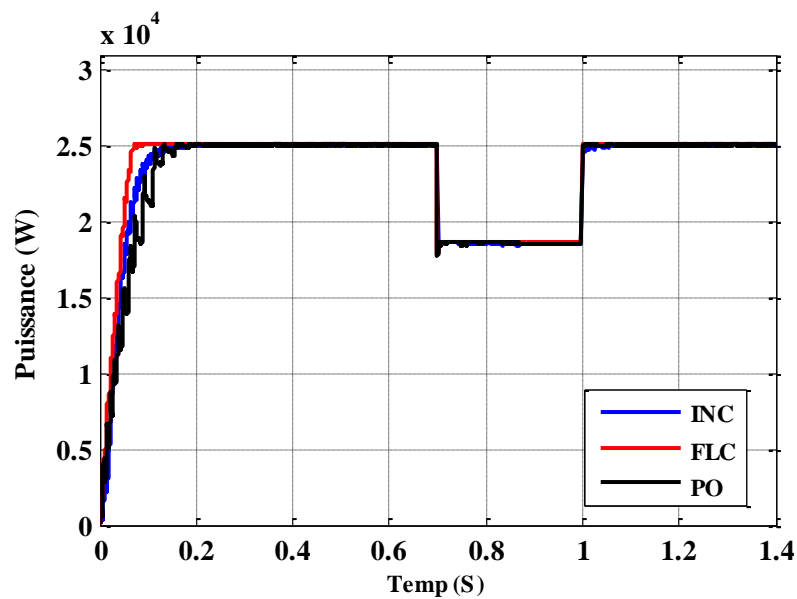


Fig. 3.19. L'évolution de puissance PV pour l'irradiation variable.

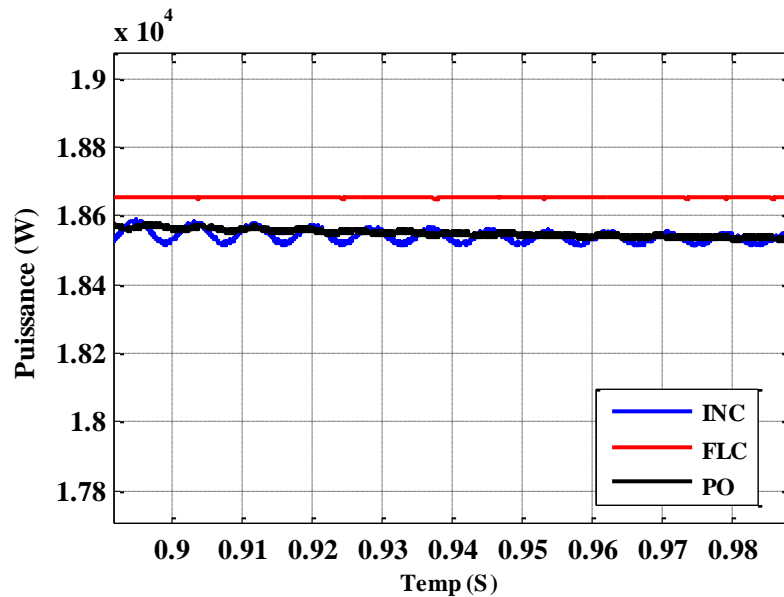


Fig. 3.20. Zoom de l'évolution de la puissance PV pour l'irradiation variable.

La figure (3.19) montre l'évolution de la puissance correspondante à la variation de l'éclairement et la figure (3.20) le zoom de cette évolution de puissance.

Nous remarquons que les commandes P&O et Con-Inc sont moins rapides et n'arrivent au MPPT qu'après un certain temps par rapport au contrôleur à logique floue qui représente des meilleures performances dues à la convergence rapide vers le MPPT.

La figure (3.21) montre la variation de la température entre 0.7s 1s tout en maintenant l'irradiation constante (1000 W /m²). Ces simulations nous permettent de tester les performances des commandes pour différents niveaux de température.

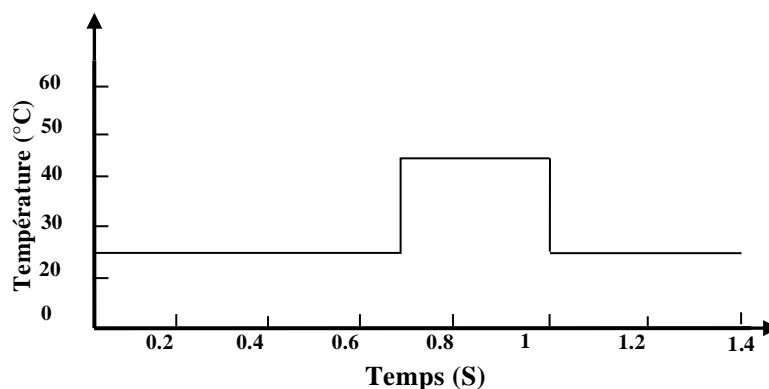


Fig. 3.21. La variation de température.

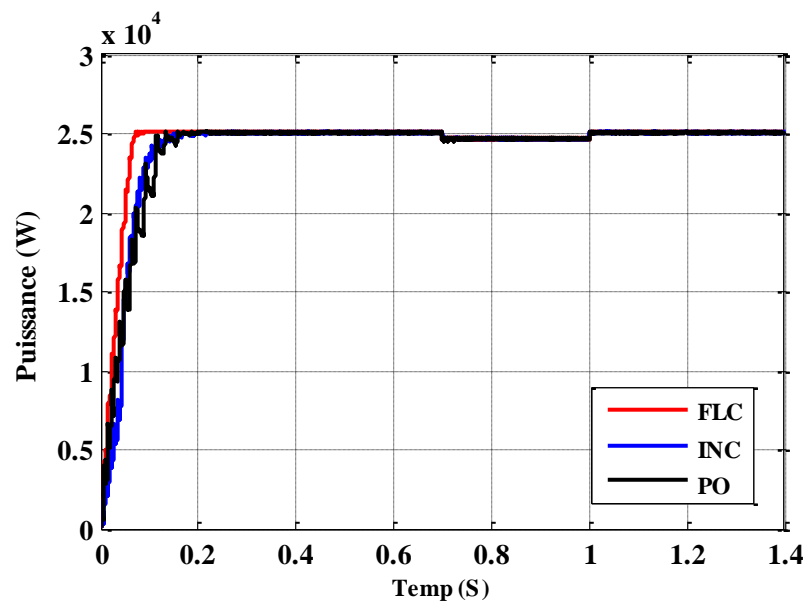


Fig. 3.22. L'évolution de la puissance PV pour une température variable.

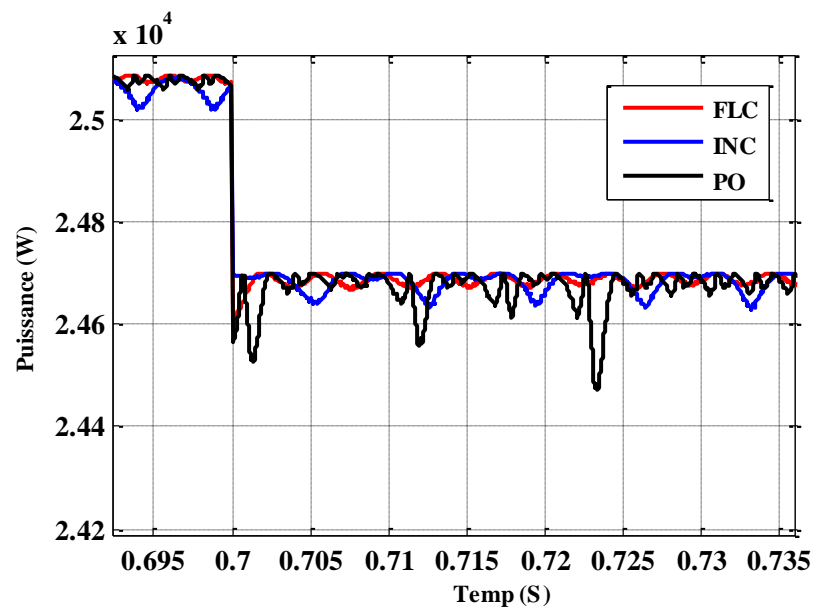


Fig.3.23. Zoom de l'évolution de la puissance PV.

D'après les figures (3.22) et (3.23) respectivement, nous constatons que les performances à savoir la stabilité et la rapidité obtenues avec contrôleur à logique floue est meilleure que les commandes perturbation et observation et conductance incrémentale.

3.7. Conclusion

Le point de puissance maximale (MPPT) permet d'augmenter l'efficacité des systèmes photovoltaïques en assurant les paramètres de fonctionnement du générateur dans des conditions optimales et améliorant ainsi le rendement du système photovoltaïque et par la suite la réduction des coûts.

Ce chapitre est une tentative pour étudier et discuter différents types de techniques MPPT. La technique de la suivie de la puissance maximale (MPPT) est utilisée dans les systèmes photovoltaïques pour extraire le maximum de puissance. Les techniques MPPT les plus populaires sont revues et étudiées, telles que : perturbation et observation, incrément de la conductance, et contrôle à base de la logique floue.

D'après les résultats de simulation obtenus, on a montré que le contrôleur à logique floue conduit à des meilleures performances avec l'absence des oscillations en régime permanent et un temps de réponse plus rapide, Comparativement aux autres techniques.

Chapitre 4

Simulation des onduleurs multi- niveaux à diode de bouclage

4.1. Introduction

Un convertisseur multi-niveau est un système électronique de puissance qui synthétise une tension de sortie souhaitée à partir de plusieurs niveaux de tensions continues en tant qu'entrées. Avec un nombre croissant de DC sources de tension, la forme d'onde de la tension de sortie du convertisseur se rapproche d'une forme d'onde presque sinusoïdale tout en utilisant un schéma de commutation de fréquence fondamentale. Le principal avantage des onduleurs multi niveaux réside dans leur faible tension de sortie qui se traduit par une qualité de sortie supérieure, des composantes harmoniques plus basses et des pertes de commutation plus faibles [20].

Les onduleurs à plusieurs niveaux ont également un intérêt dans le domaine des applications haute tension et haute puissance telles que les compresseurs, les broyeurs, les convoyeurs. La topologie de circuit de puissance la plus connue pour les convertisseurs multi niveaux repose sur l'onduleur multi-niveau à diode de bouclage. La question clé dans la conception d'un onduleur multi-niveau efficace est de s'assurer que la distorsion harmonique totale (THD) de la forme d'onde de la tension de sortie se situe dans des limites acceptables [74].

Pour les fréquences de commutations élevées, la stratégie MLI sinus triangle est la plus utilisée pour l'onduleur multi-niveau, car elle est très simple et facile à implémenter. Dans ce chapitre, nous allons étudier et simuler différents niveaux d'onduleur à diode de bouclage avec comme charge moteur à induction, Ensuite, les résultats des simulations du système photovoltaïque seront discutés.

4.2. L'onduleur multi-niveau à diode de bouclage

Les onduleurs multi-niveaux sont utilisés dans les systèmes de conversion de puissance en raison de l'amélioration des formes d'onde de tension et de courant. Il est récemment apparu comme une alternative très importante dans les applications de haute tension et de moyenne tension en raison de leur avantage sur les solutions classiques et de leur capacité à réduire les harmoniques indésirables. Ainsi, la performance et l'efficacité du système seront améliorées. Le concept d'onduleur multi-niveau est introduit dans le but de réduire les pertes de commutation et d'obtenir la tension de sortie en plusieurs étapes pour obtenir une qualité de puissance améliorée et une capacité de tension plus élevée [75].

La topologie multi-niveau la plus couramment utilisée est l'onduleur à diode de bouclage dans lequel la diode est utilisée comme dispositif de serrage pour bloquer la tension du bus continu afin de réaliser des incréments de la tension de sortie. Ainsi, le concept principal de cet onduleur consiste à utiliser des diodes pour limiter la contrainte de tension des dispositifs d'alimentation. Un onduleur à n niveaux a besoin de $(n-1)$ de sources de tension, de $2(n-1)$ dispositifs de commutation et de $(n-1)(n-2)$ diodes. En augmentant le nombre de niveaux de tension, la qualité de la tension de sortie est améliorée et se rapproche de la forme d'onde sinusoïdale [10].

4.2.1. L'onduleur trois niveaux à diode de bouclage

Dans les applications de fortes puissances, les onduleurs à trois niveaux sont plus adaptés par rapport aux onduleurs classiques, du fait que les tensions et courants de sortie présentent un taux d'harmoniques nettement plus faible. Les onduleurs à diode de bouclage sont intéressants pour les applications triphasées nécessitant peu de niveaux. L'énergie stockée à l'étage intermédiaire peut être réduite [76].

Figure (4.1) montre un bras d'un onduleur trois niveaux à diode de bouclage. Dans ce circuit, la tension du bus continu est divisée en trois niveaux par deux condensateurs de masse connectés en série, C_1 et C_2 . Le point milieu des deux condensateurs (o) peut être défini comme le point neutre. Chaque bras de l'onduleur est constitué de quatre paires (diode-transistor) en séries et deux diodes médianes permettant d'avoir le niveau zéro de la tension de sortie de l'onduleur [75, 76]. La tension de sortie V_{an} a trois états: $V_{dc}/2$, 0 et $-V_{dc}/2$.

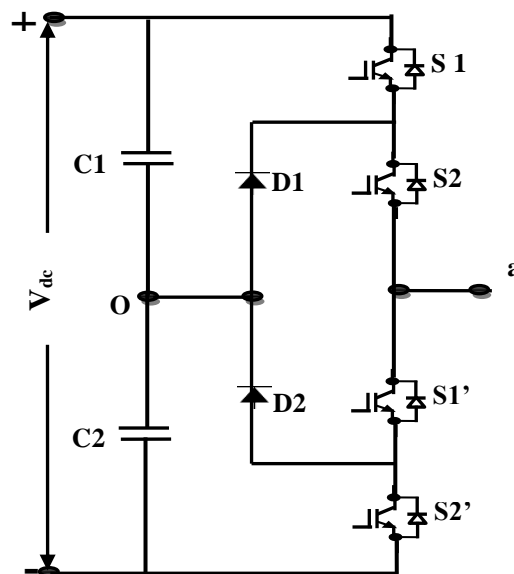


Fig. 4.1. Bras (a) de l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage [75].

4.2.1.1. Principe de fonctionnement :

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre (o). Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs $S1$, $S2$, $S1'$ et $S2'$ du bras.

Pour ce type d'onduleur, seules trois configurations sont fonctionnelles. Elles sont décrites comme suit:

Première configuration {1100}

$S1$, $S2$ sont passants et $S1'$, $S2'$ sont bloqués (figure 4.2). On a la valeur de la tension simple de sortie donnée comme suit :

$$V_{ao} = +V_{dc} / 2$$

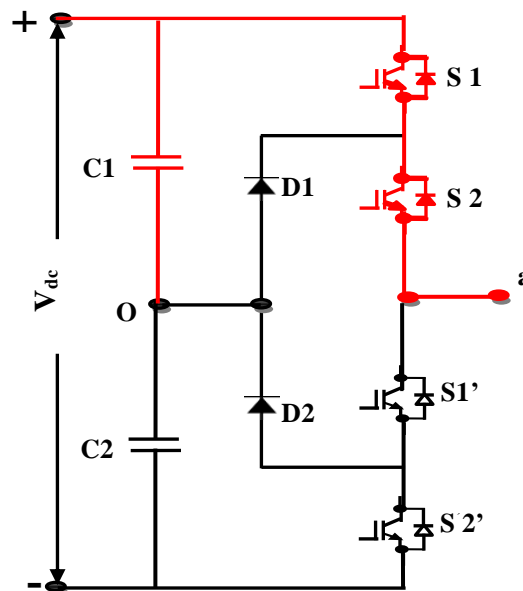


Fig.4.2. Première configuration du bras (a) [20].

Deuxième configuration {0110}

$S2$, $S1'$ sont passants et $S1$, $S2'$ sont bloqués (figure 4.3). Le point a est relié directement au point neutre o. alors, la tension de sortie V_{ao} est nulle :

$$V_{ao} = 0$$

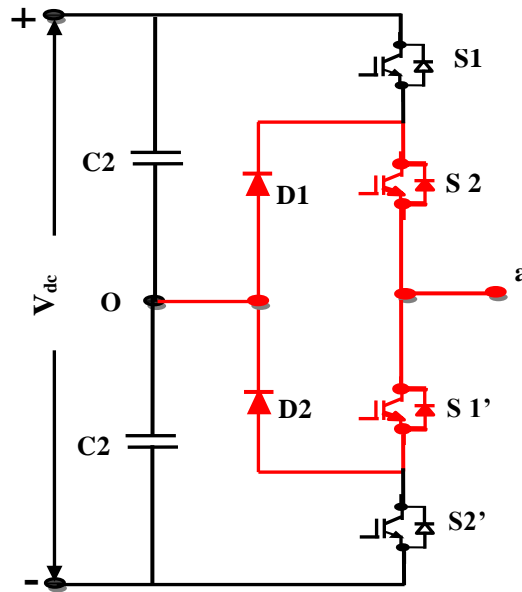


Fig. 4.3. Deuxième configuration du bras (a) [20].

Troisième configuration {0011}

S1', S2' sont passants et S1, S2 sont bloqués (figure 4.4). La tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -V_{dc} / 2$$

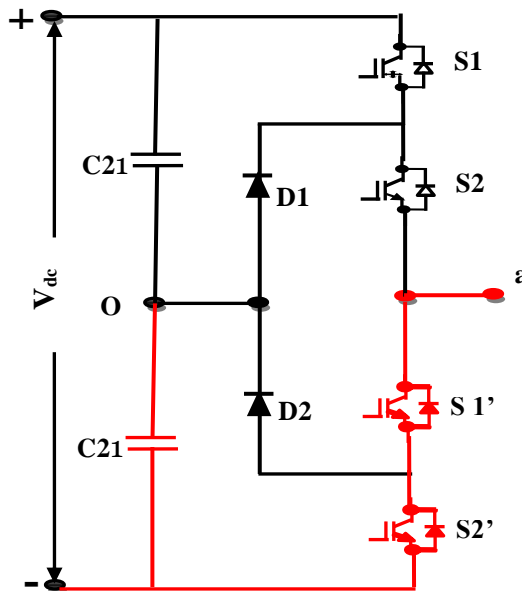


Fig. 4.4. Troisième configuration du bras (a) [20].

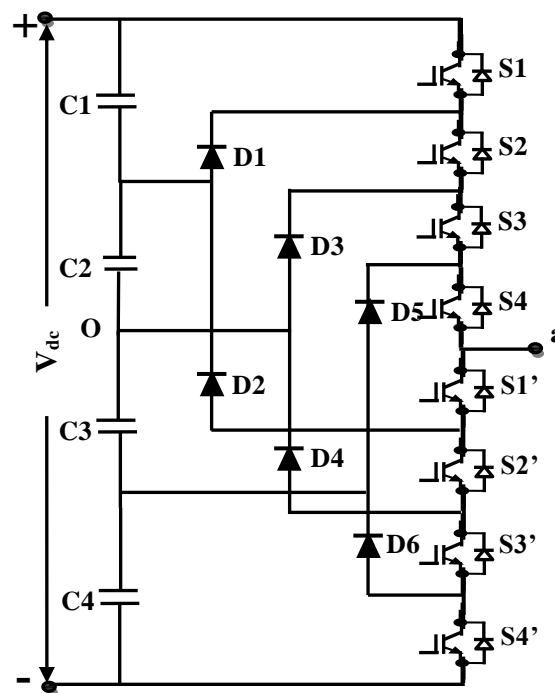
Pour synthétiser une tension de phase à trois niveaux, la commutation des séquences sont données dans le tableau (4.1). La condition d'état 1 signifie l'activation et 0 la désactivation.

Tableau.4.1.Les états de commutation de bras de l'onduleur trois niveaux [77].

Tension V_{ao}	État de commutation			
	$S1$	$S2$	$S1'$	$S2'$
$+V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

4.2.2. Onduleur à cinq niveaux à diode de bouclage

L'onduleur triphasé à cinq niveaux à structure à diode de bouclage se compose de trois bras symétriques constitué chacun de six interrupteurs en série et de deux autres en parallèles. Chacun de ces interrupteurs est composé d'un interrupteur (transistor) et d'une diode montée en tête bêche. La source de tension continue se compose de quatre groupes de condensateurs formant ainsi le bus continu est composé de quatre condensateurs, C_1 , C_2 , C_3 et C_4 . Pour la tension V_{dc} du bus continu, la tension aux bornes de chaque condensateur est $V_{dc} / 4$ et la contrainte de tension de chaque dispositif est limitée à un niveau de tension du condensateur $V_{dc}/ 4$ au moyen de diodes de bouclage [76, 78]. Figure (4.5) montre un bras d'un onduleur cinq niveaux à diode de bouclage.

**Fig. 4.5. Bras (a) de l'onduleur cinq niveaux à diode de bouclage [77].**

4.2.2. 1.Principe de fonctionnement :

Pour ce type d'onduleur, seule cinq séquences sont fonctionnelles. Elles sont d'écrites comme suit:

Première configuration {11110000}

S1, S2, S3 et S4 sont passants et S1', S2', S3' et S4' sont bloqués (figure 4.6). La valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +V_{dc}/2.$$

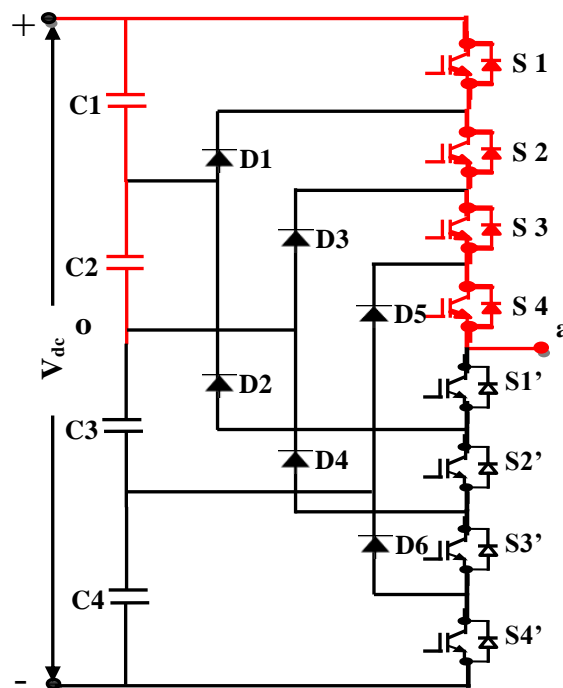


Fig. 4.6. Première configuration du bras (a) [79].

Deuxième configuration {01111000}

S2, S3, S4, et S1' sont passants et, S2', S3', S4' et S1 sont bloqués (figure 4.7). La tension de sortie est :

$$V_{ao} = +V_{dc}/4.$$

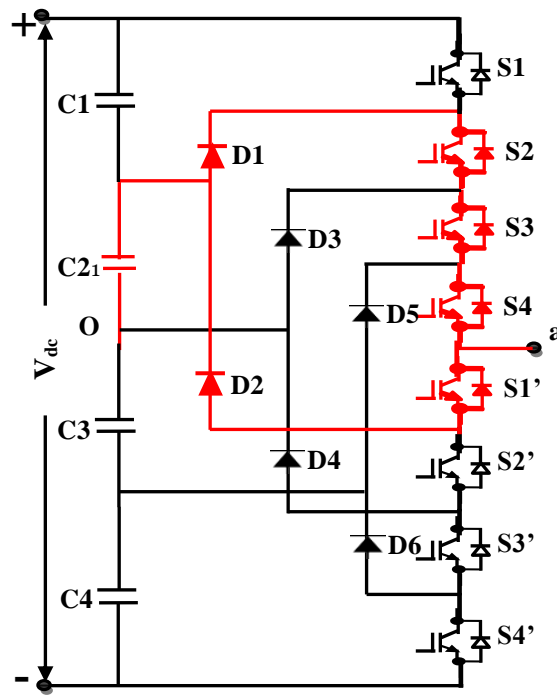


Fig. 4.7. Deuxième configuration du bras (a) [79].

Troisième configuration {00111100}

S3, S4, S1', et S2' sont passants et, S3', S4', S1 et S2 sont bloqués (figure 4.8), on a la tension de sortie: $V_{ao} = 0$

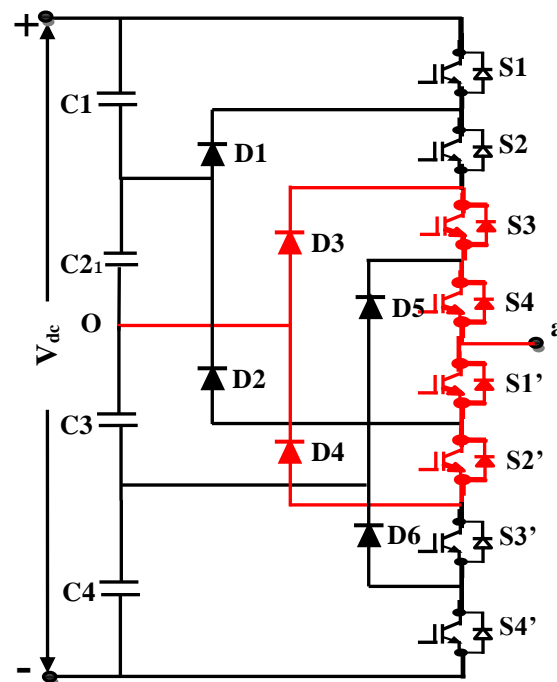


Fig. 4.8. Troisième configuration du bras (a) [79].

Quatrième configuration {00011110}

S4, S1', S2', et S3' sont passants et, S4', S1, S2 et S3 sont bloqués (figure 4.9), on a la tension de sortie est :

$$V_{ao} = -V_{dc}/4.$$

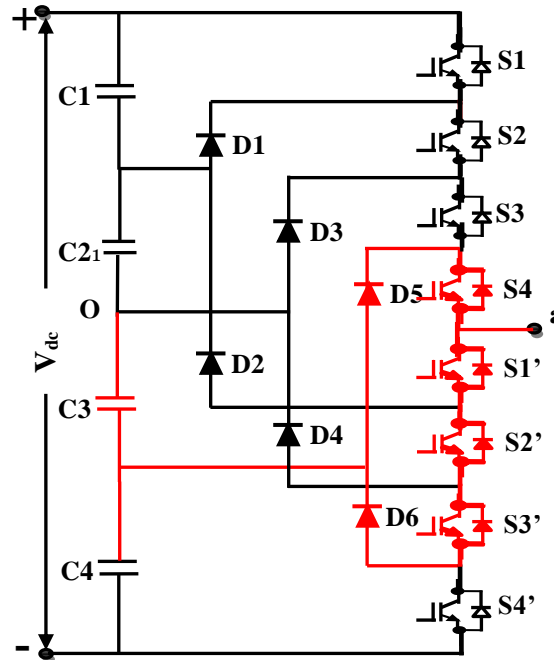


Fig. 4.9. Quatrième configuration du bras (a) [79].

Cinquième configuration {00001111}

S1', S2', S3', et S4' sont passants et, S1, S2, S3 et S4 sont bloqués (figure 4.10), on a la tension de sortie est :

$$V_{ao} = -V_{dc}/2.$$

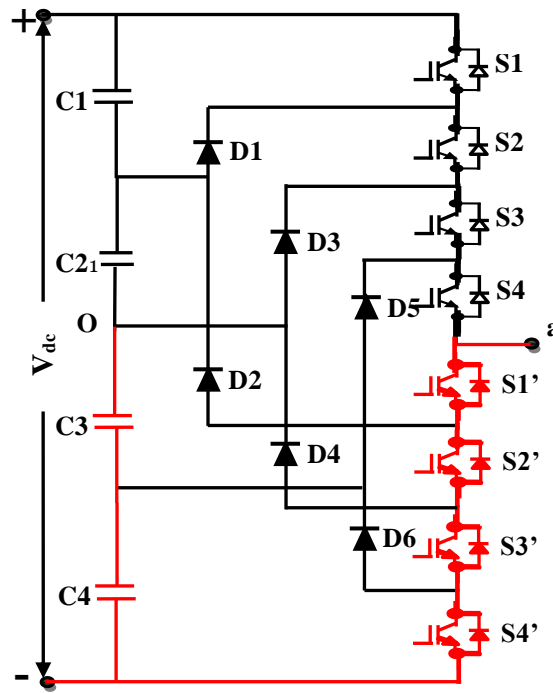


Fig. 4.10. Cinquième configuration du bras (a) [79].

Pour synthétiser une tension de phase à trois niveaux, la commutation, Les séquences sont données dans le tableau (4.2) la condition d'état 1 signifie l'activation et la désactivation de 0.

Tableau .4.2. Les états de commutation de bras de l'onduleur cinq niveaux [78, 80].

Tension V_{ao}	État de commutation							
	S1	S2	S3	S4	S1'	S2'	S3'	S4'
$V_{dc}/2$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_{dc}/4$	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	0
$-V_{dc}/4$	0	0	0	1	1	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	0	0	1	1	1	1

4.2.3. Onduleur à sept niveaux à diode de bouclage

L'onduleur à sept niveaux se compose de trois bras constitués chacun de deux interrupteurs (transistors) et de dix diodes de bouclage connectent la partie supérieure et inférieure du bras [83].

La structure d'un bras d'onduleur de tension à sept niveaux de type à diode de bouclage est illustrée à la figure (4.11). Dans ce circuit, la tension du bus continu est divisée en sept niveaux par six condensateurs connectés en série de C_1 à C_6 . Le point milieu (o) peut être défini comme le point neutre [84].

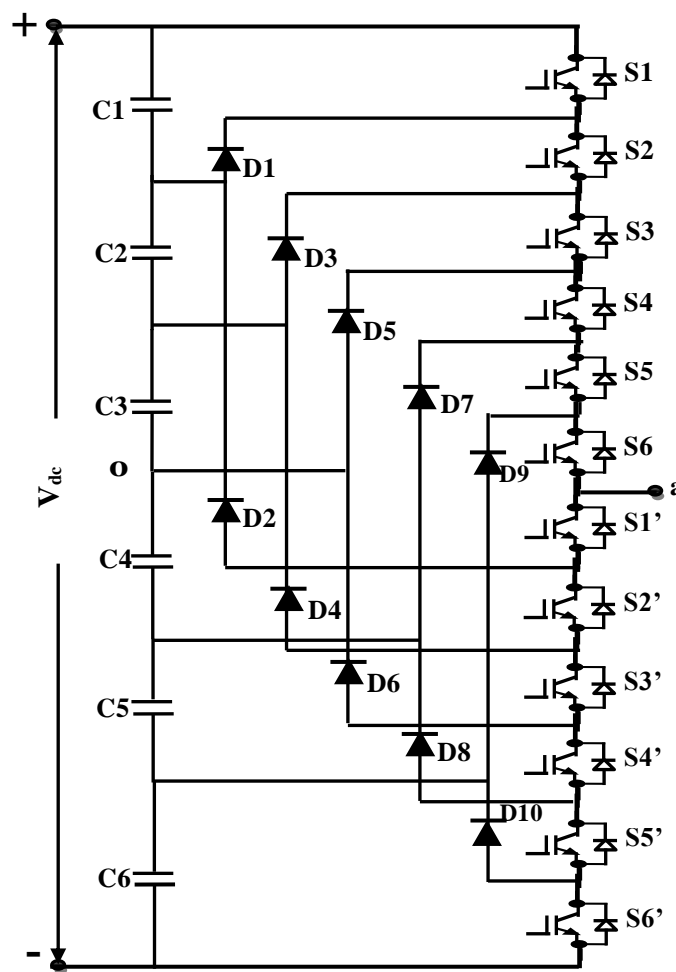


Fig. 4.11. Bras (a) de l'onduleur sept niveaux à diode de bouclage [81].

4.2.3.1. Principe de fonctionnement :

Une analyse topologique d'un bras de l'onduleur montre sept configurations possibles pour ce dernier. Elles sont décrites comme suit :

Première configuration {111111000000}

S1, S2, S3, S4, S5 et S6 sont passants et S1', S2', S3', S4', S5' et S6' sont bloqués (figure 4.12), on a la valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +V_{dc}/2.$$

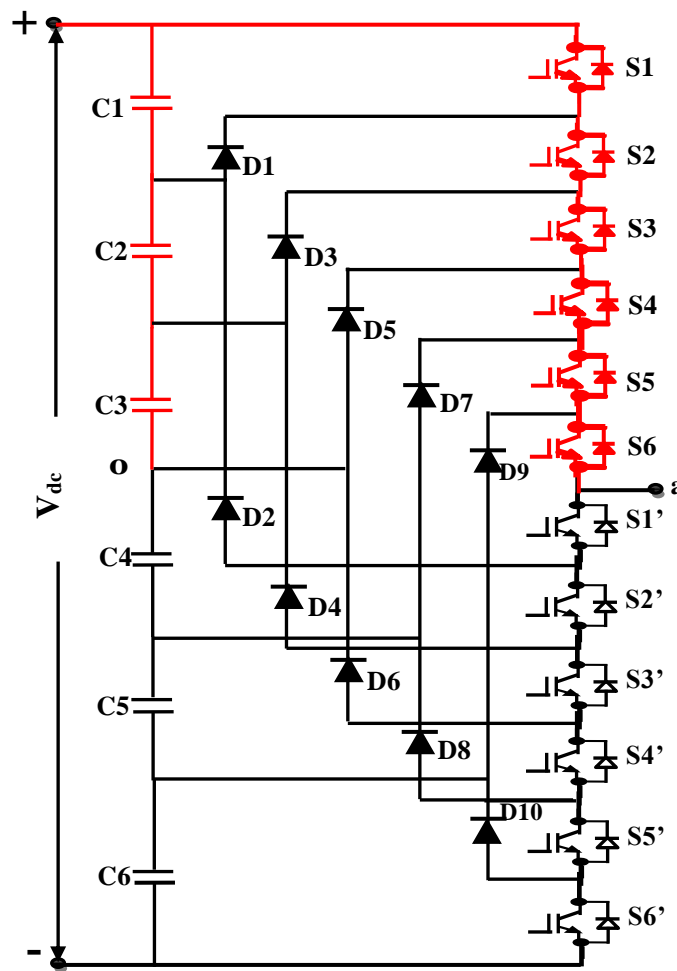


Fig. 4.12. Première configuration du bras (a) [81].

Deuxième configuration {011111100000}

S2, S3, S4, S5, S6 et S1' sont passants et S2', S3', S4', S5', S6' et S1 sont bloqués (figure 4.13).

La valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +V_{dc}/3.$$

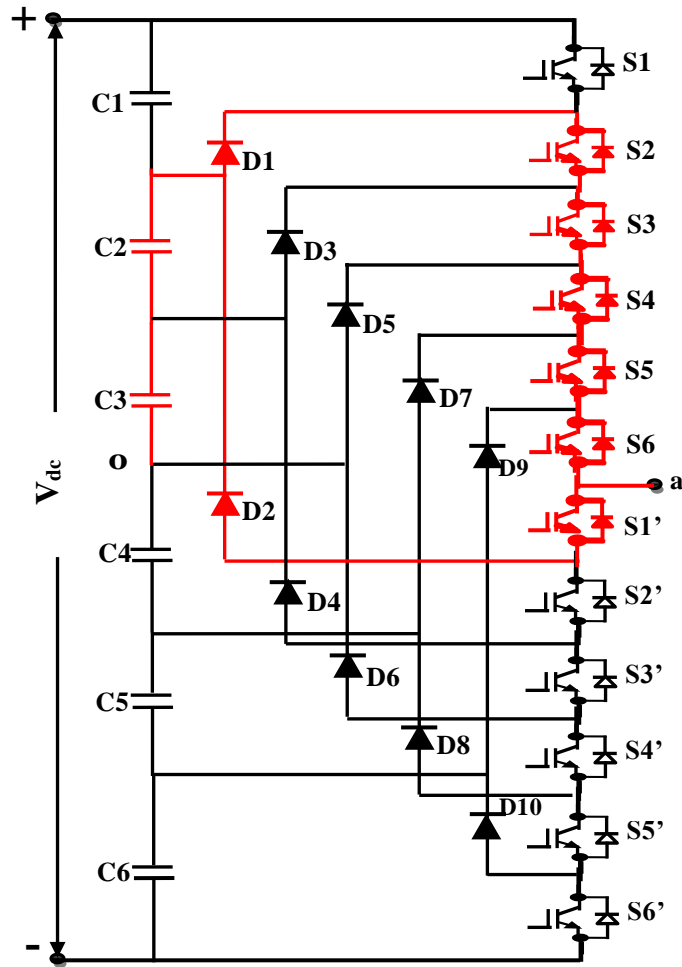


Fig. 4.13. Deuxième configuration du bras (a) [81].

Troisième configuration {001111110000}

S3, S4, S5, S6, S1' et S2' sont passant et S3', S4', S5', S6', S1 et S2 sont bloqués (figure 4.14. La valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +V_{dc}/6.$$

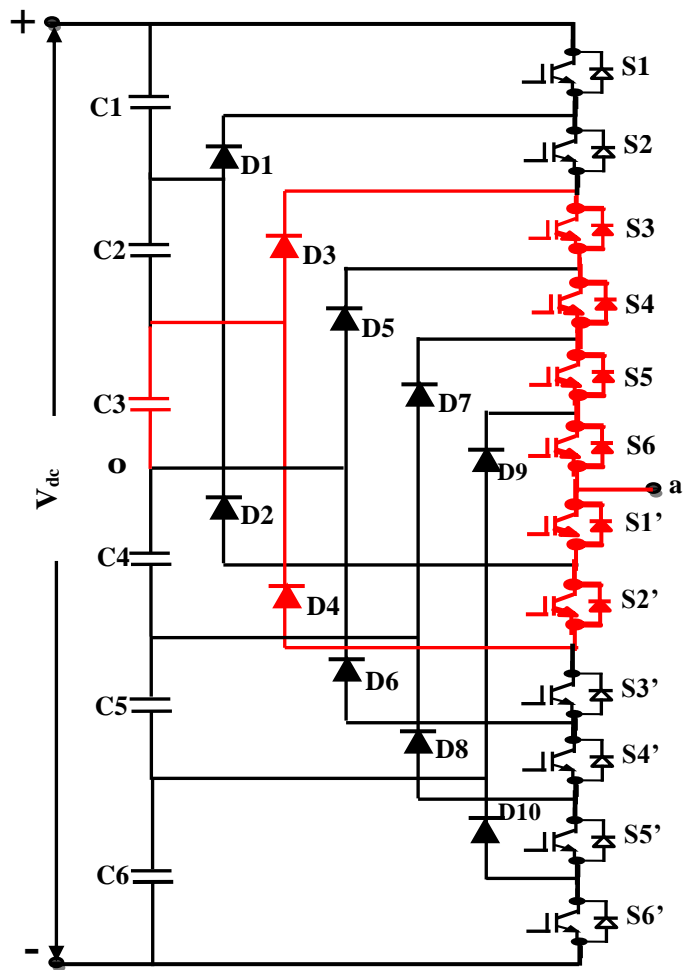


Fig. 3.14. Troisième configuration du bras (a) [81].

Quatrième configuration {00011111000}

S4, S5, S6, S1', S2' et S3' sont passants et S4', S5', S6', S1, S2 et S3 sont bloqués (figure 4.15). La valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = 0$$

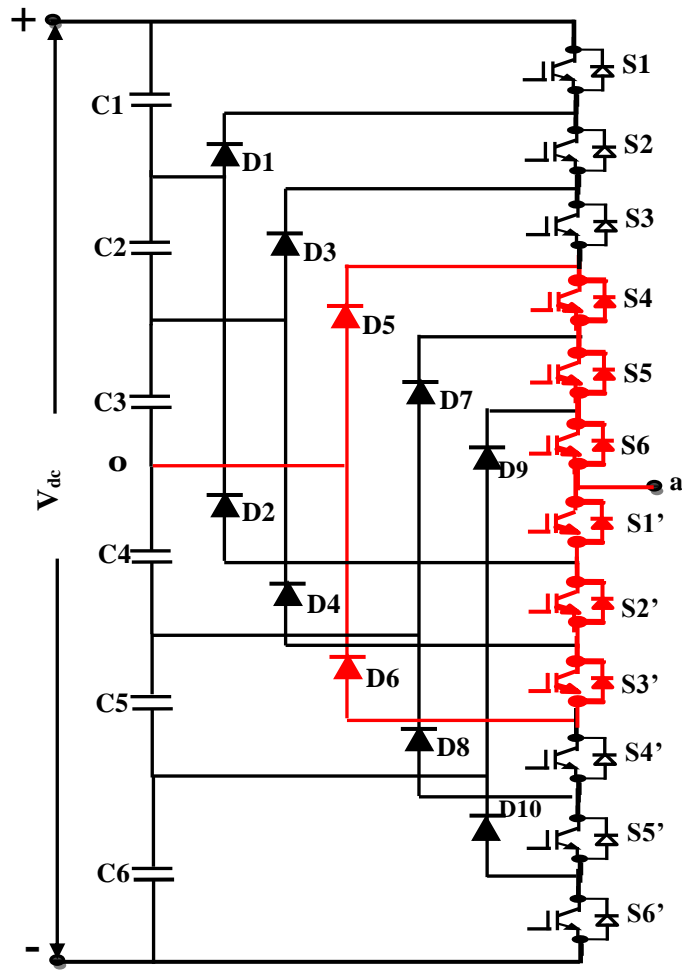


Fig. 3.15. Quatrième configuration du bras (a) [81].

Cinquième configuration {000011111100}

$S5, S6, S1', S2', S3'$ et $S4'$ sont passants et $S5', S6', S1, S2, S3$ et $S4$ sont bloqués (figure 4.16). La valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -V_{dc}/6.$$

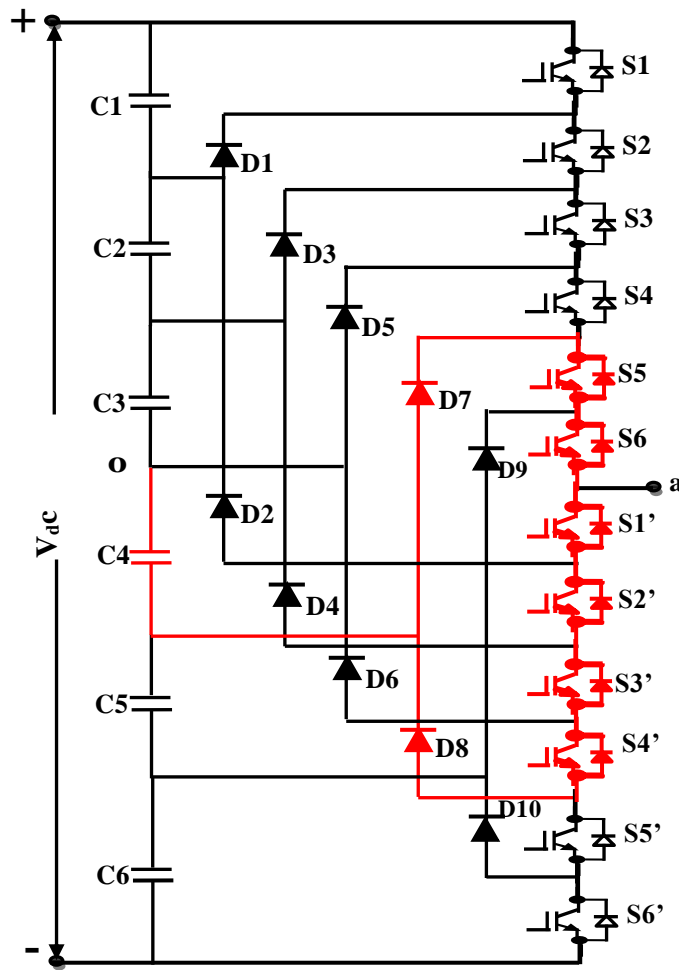


Fig. 4.16. Cinquième configuration du bras (a) [81].

Sixième configuration {00000111110}

S6, S1', S2', S3', S4' et S5' sont passants et S6', S1, S2, S3, S4 et S5 sont bloqués (figure 4.17). La valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -V_{dc}/3.$$

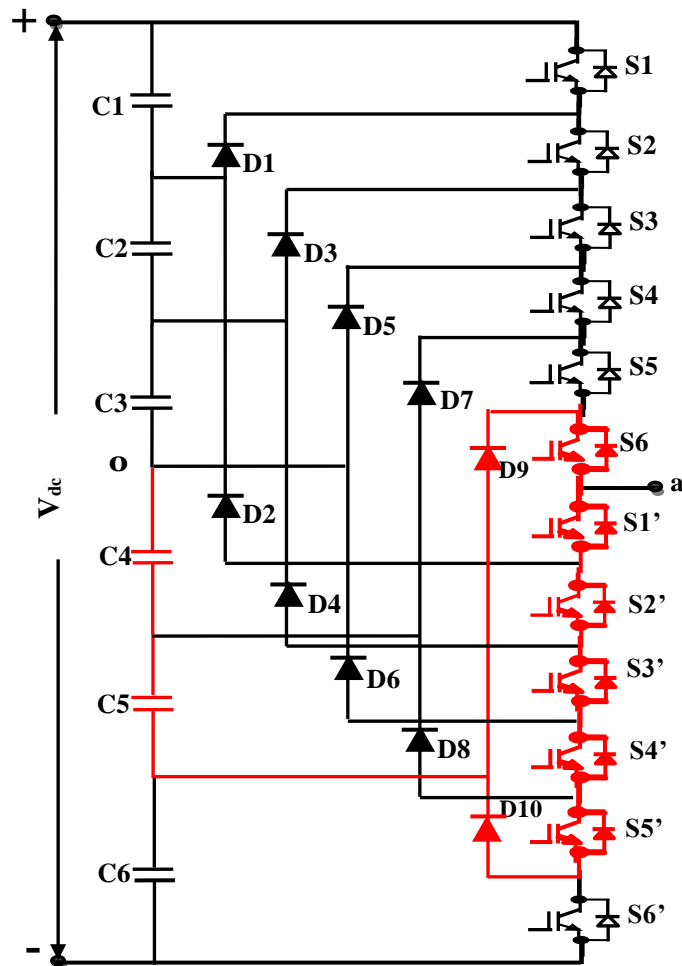


Fig. 4.17. Sixième configuration du bras (a) [81].

Septième configuration {000000111111}

$S1'$, $S2'$, $S3'$, $S4'$, $S5'$ et $S6'$ sont passants et $S1$, $S2$, $S3$, $S4$, $S5$ et $S6$ sont bloqués (figure 4.18). La valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -V_{dc}/2$$

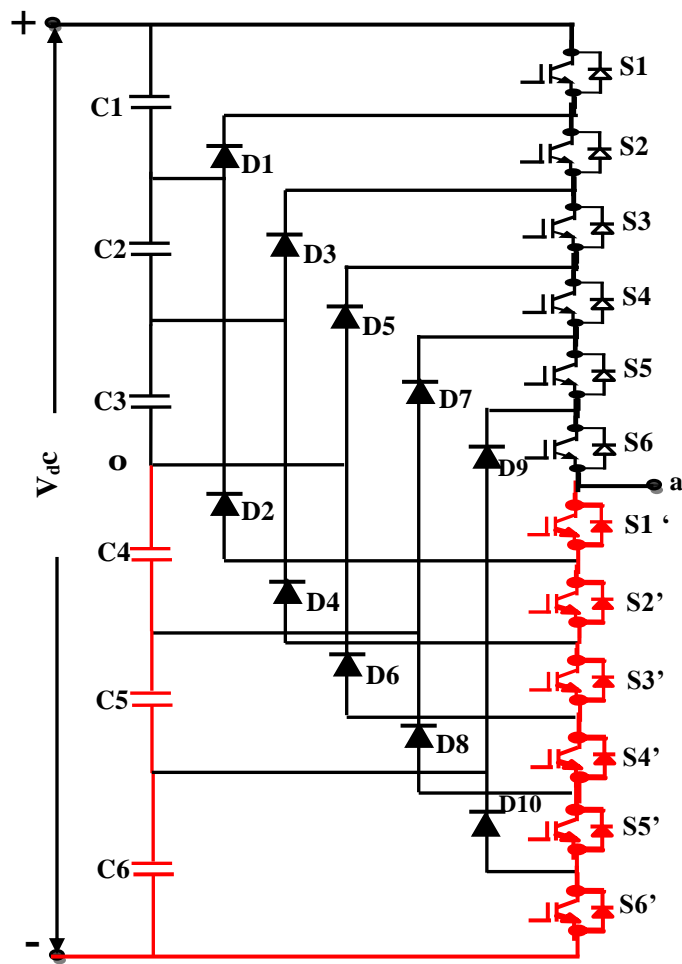


Fig. 4.18. Septième configuration du bras (a) [81].

Pour synthétiser une tension de phase de sortie à sept niveaux, les séquences de commutation sont données dans le tableau (4.3).

Tableau.4.3. Les états de commutation de bras de l'onduleur sept niveaux [82].

Tension V_{ao}	État de commutation											
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S1'	S2'	S3'	S4'	S5'	S6'
$V_{dc}/2$	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
$V_{dc}/3$	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
$V_{dc}/6$	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0
$-V_{dc}/6$	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
$-V_{dc}/3$	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

4.3. La modulation de largeur d'impulsion (MLI)

La modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation) consiste à adopter une fréquence de commutation supérieure à la fréquence des grandeurs de sortie et former chaque alternance de la tension de sortie d'une succession de créneaux de largeur convenable [10].

L'essor de la modulation de largeur d'impulsion est lié aux progrès de développement des semi-conducteurs de puissance ; l'augmentation des nombres des commutations entraînerait des pertes excessives si on n'avait pas réussi à réduire les pertes à chacune des commutations.

La multiplication des nombres d'impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie offre la possibilité de moduler la forme de cette tension de manière à avoir la forme sinusoïdale que possible.

La modulation de largeur d'impulsion permet de repousser vers des fréquences, élevées les harmoniques de la tension de sortie; ce qui facilite le filtrage, la multiplication du nombre des impulsions, formant chacune des alternances d'une tension de sortie, faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie. Elle offre la possibilité de moduler la forme de cette tension et obtenir une forme d'onde approximant de la sinusoïde.

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) permet de commander la tension de sortie de l'onduleur en amplitude et en fréquence à partir des signaux de commandes des interrupteurs de l'onduleur tout en limitant l'effet des harmoniques [83].

On distingue plusieurs types de techniques de modulation de largeur d'impulsion qui peuvent être considérées, dont on peut citer: la modulation sinus-triangle, la modulation en pleine onde, et la MLI vectorielle ...etc.

4.3.1. La modulation sinus-triangle

La MLI sinus triangle utilise le principe d'intersection entre un signal sinusoïdale de fréquence f_r , appelée référence et un signal triangulaire de haute fréquence f_p , appelée porteuse, pour déterminer les instants de commutation des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la figure (4.19). En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de $(2\pi/3)$ à la même fréquence f [10].

Les équations présentées ci-dessous expriment les formes d'onde de référence [84] :

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

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

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

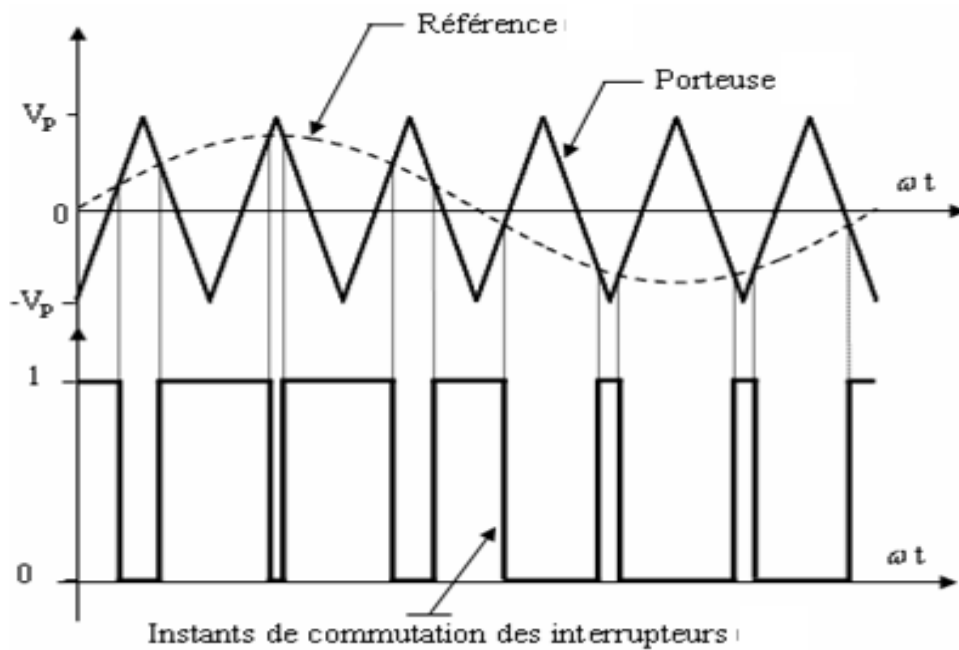


Fig.4.19 : Signal combiné porteuse, référence et leurs résultats [84].

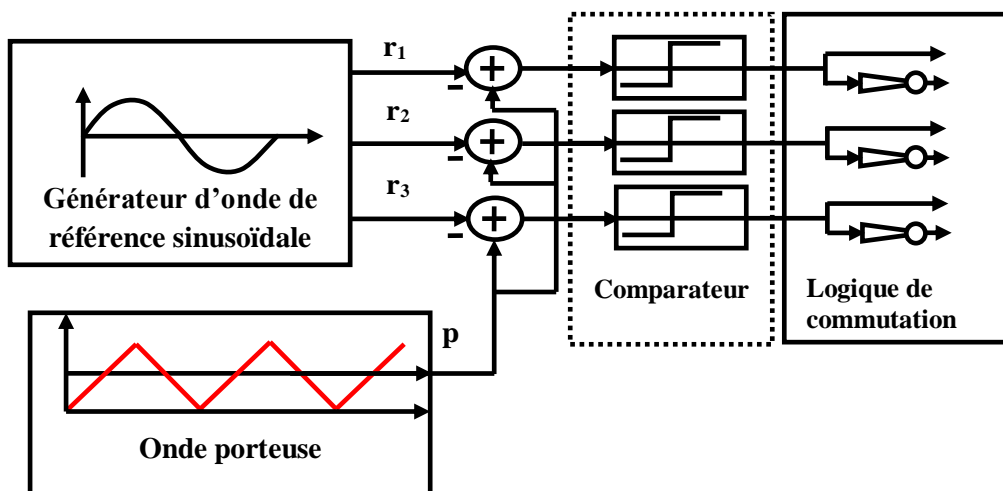


Fig.4.20. Principe de la MLI sinus-triangle.

Caractéristique de la modulation sinus-triangle :

Dans le cas d'une référence sinusoïdale, deux paramètres caractérisent la modulation :

Indice de modulation (m) : Il est égal au rapport de la fréquence f_p de la porteuse à la fréquence f_r de la référence [10, 85] :

$$m = \frac{f_p}{f_r} \quad (4.1)$$

f_p : Fréquence de modulation de la porteuse.

f_r : Fréquence de la référence (modulante).

On choisit généralement les valeurs de « m » supérieures à l'unité afin de déplacer les harmoniques vers les fréquences élevés.

Taux de modulation (r) : Il est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence V_r à celle de la porteuse V_p [85] :

$$r = \frac{V_r}{V_p} \quad (4.2)$$

Avec :

$$0 < r < 1$$

V_r : Amplitude de la référence.

V_p : Amplitude de la porteuse.

Taux de distorsion harmonique : Il se définit comme le rapport de la valeur efficace globale des harmoniques (c'est-à-dire leur somme quadratique) à la valeur efficace de la composante fondamentale [35].

Il peut s'appliquer soit au courant ou à la tension, que l'on remplacera dans la formule suivante :

$$THD = \frac{(\sum_{i=2}^{\infty} Y_i^2)^{\frac{1}{2}}}{Y_1} \quad (4.3)$$

4.3.2. MLI sinus-triangle à plusieurs porteuses

La technique MLI sinus-triangle à plusieurs porteuses est l'une des techniques de modulation les plus populaires appliquées aux onduleurs multi-niveaux. Cette technique est basée sur la comparaison d'un ensemble de porteuses triangulaires avec le signal de référence. Les onduleurs multi niveaux sont généralement basés sur l'utilisation de porteuses triangulaires symétriques. Ces porteuses sont au nombre d'une de moins que le nombre de niveaux, leur agencement caractérise la méthode de modulation. La combinaison des signaux de comparaison permet de déterminer le signal modulé et plus ou moins directement d'obtenir les signaux de commande. Le signal modulé est généré par le convertisseur par l'intermédiaire des signaux de commande [35]. La méthode de contrôle MLI sinus-triangle multi-porteuses est aussi implémentée pour augmenter les performances des onduleurs multi-niveaux. Les techniques multi-porteuses peuvent être classées dans les catégories suivantes :

Disposition en phase (PD), disposition en opposition de phase (POD), et disposition en opposition alternative de phase (APOD) [22].

4.3.2.1. La MLI disposition en phase

Dans cette méthode, tous les opérateurs ci-dessus et au-dessous de la ligne de référence zéro sont dans la même phase. Si tous les porteurs sont sélectionnés avec la même phase, la méthode est connue sous le nom de méthode disposition en phase (PD). Il est généralement admis que cette méthode engendre la distorsion harmonique la plus faible dans les indices de modulation proches de 1, la méthode phase disposition présente le plus faible taux de distorsion harmonique (THD) comparée aux autres méthodes MLI. Pour cette technique, l'énergie harmonique significative est concentrée à la fréquence de la porteuse [10, 22, 86]. Les agencements d'ondes de référence sont comme indiqué sur la figure (4.21).

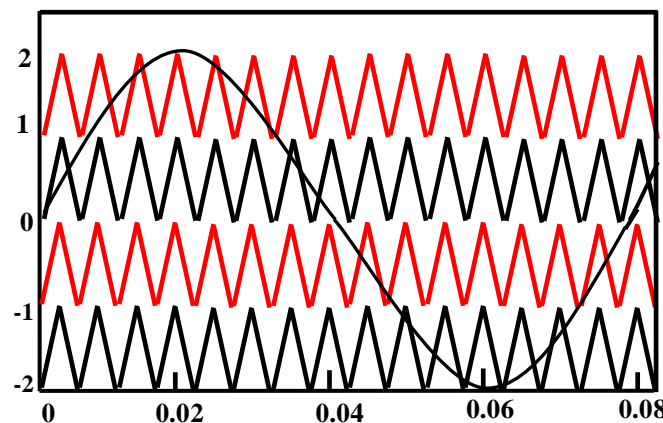


Fig.4.21. La MLI sinus-triangle disposition en phase [86].

4.3.2.2. La MLI disposition d'opposition de phase

Dans cette méthode, tous les opérateurs ont la même fréquence et l'amplitude réglable (différente ou inégale Amplitudes). Mais tous les transporteurs au-dessus de la référence de valeur zéro sont en phase parmi eux mais en opposition (180° degrés déphasés) avec ceux ci-dessous [86]. Les dispositions de l'entourage et de l'onde de référence sont telles que représentées sur la figure (4.22).

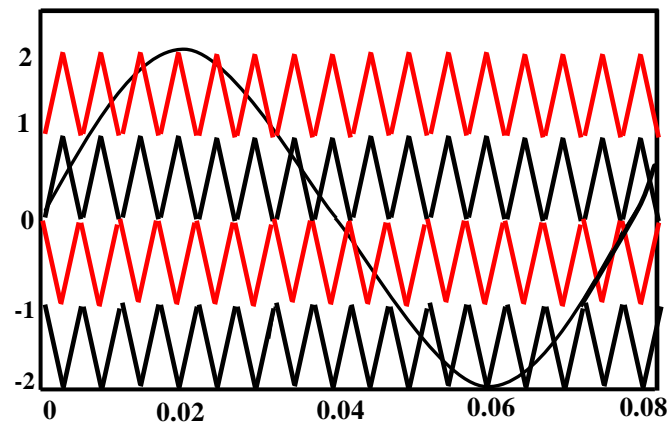


Fig.4.22. La MLI sinus-triangle disposition d'opposition de phase [35].

4.3.2.3. La MLI disposition alternative d'opposition de phase

Dans cette méthode, tous les opérateurs ont la même fréquence et l'amplitude réglable (différente ou inégale Amplitudes). Tous les porteurs sont déphasés entre eux de (180°) [10, 86]. comme indiqué sur la figure (4.23).

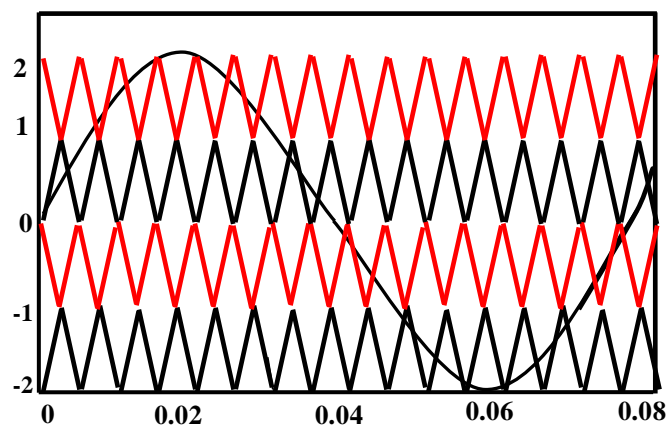


Fig.4.23. La MLI sinus-triangle disposition alternative d'opposition de phase [35].

4.4. Simulation onduleurs multi-niveaux-MAS

L'onduleur triphasé à multi-niveaux à diode de bouclage alimenté par un système photovoltaïque a été simulé à l'aide Matlab / Sim power system. Ce système comprend le générateur photovoltaïque, le convertisseur élévateur de tension continu-continu. Le convertisseur CC-CC est commandé par un signal de modulation de largeur d'impulsion avec une poursuite de point de puissance maximale (MPPT) basée sur une logique floue. Les signaux de commutation pour le convertisseur multi-niveaux à diode de bouclage sont commandés par la technique MLI sinus triangle (disposition en phase). Un moteur à induction a été utilisé comme une charge avec l'onduleur pour obtenir les résultats. La figure (4.24) montre le modèle pour le système complet utilisé dans la simulation.

Les tableaux (4.4) et (4.5) donnent respectivement les paramètres de l'onduleur à diode de bouclage et des paramètres du moteur à induction utilisés dans la simulation.

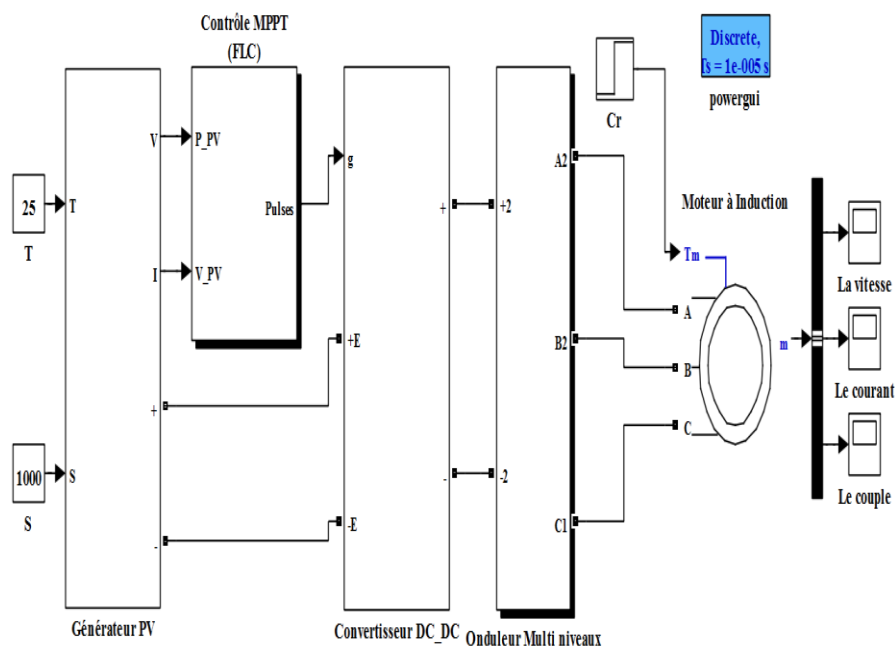


Fig. 4.24. Circuit modèle de simulation.

Tableau .4.4. Paramètres de l'onduleur multi niveaux.

La fréquence de commutation	10 KHz
La fréquence fondamentale	50 Hz
Indice de modulation	0.95
La tension d'alimentation (V_{dc})	600 Volt

Tableau .4.5. Paramètres du moteur à induction.

Tension nominale U_n	400 V
Puissance nominale P_n	4 Kw
Nombre de pôles p	4
Résistance du stator R_s	1.405 Ω
Résistance du rotor R_r	1.395 Ω
La fréquence f	50 Hz
Inductance du stator L_s	0.005839 H
Inductance du rotor L_s	0.005839 H
Inertie J	0.013 Kg.m ²
Inductance mutuelle L_m	0.1722 H

4.4.1. Choisir la stratégie de modulation à MLI sinus-triangle

L'onduleur triphasé à multi-niveaux à diode de bouclage alimenté par un système photovoltaïque a été simulé à l'aide Matlab / Sim power system. Les signaux de commutation MLI mentionnés précédemment ont été utilisés. Des simulations de différentes stratégies MLI sinus-triangle (PD, POD, APOD) sont effectuées afin de sélectionner la meilleure stratégie. Les valeurs correspondantes sont mesurées en% THD de la tension et du courant en utilisant le bloc FFT et sont présentées dans le tableau (4.6).

Tableau .4.6. THD pour différents stratégie de modulation à MLI sinus-triangle.

Niveaux d'onduleur	THD (%) de courant			THD (%) de la tension composée		
	PD	POD	APOD	PD	POD	APOD
Les techniques MLI sinus-triangle						
Trois niveaux	6.45	6.49	6.52	49.88	52.64	52.64
Cinq niveaux	3.30	3.39	3.62	41.99	42.03	45.32
Sept niveaux	3,18	3.32	3.42	27,29	28.90	29.75

Note du tableau (4.6) la méthode disposition en phase (PD) fournit une sortie avec une distorsion minimale par rapport aux autres stratégies utilisées.

Dans cette section, on a choisila stratégie de modulation à MLI sinus-triangle disposition en phase (PD) pour commander des interrupteurs d' un onduleur triphasé à multi-niveaux à diode de bouclage.

4.4.2. Simulation de l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage

Pour réaliser la simulation de l'onduleur de tension à trois niveaux à diode de bouclage commandé par la stratégie de commande MLI, on représente d'abord sa structure générale donnée par la figure (4.25) schématisée par un schéma bloc développé dans l'environnement MATLAB.

Les figures (4.26) et (4.27) montrent respectivement le schéma bloc et la forme d'onde de la commande MLI sinusoïdale de l'onduleur à trois niveaux.

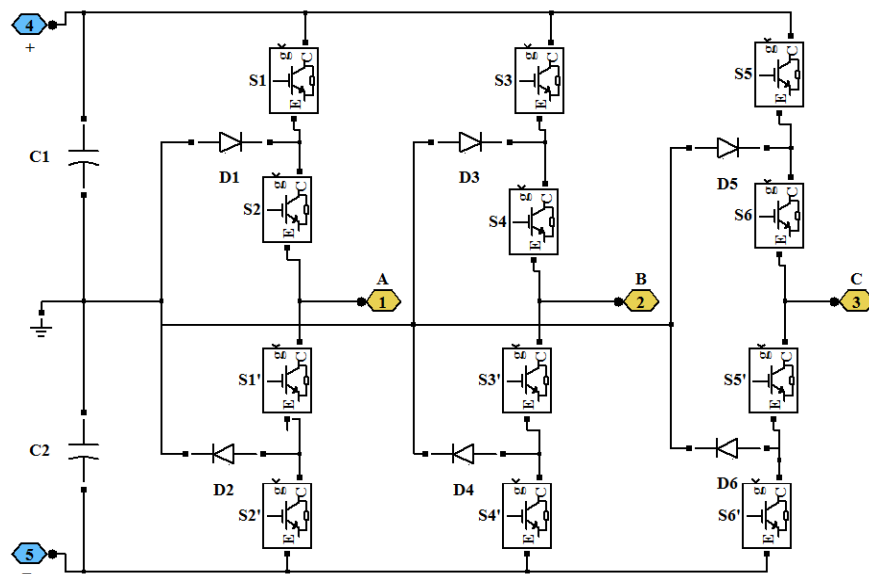


Fig. 4.25. Circuit de simulation d'un onduleur trois niveaux à diode de bouclage.

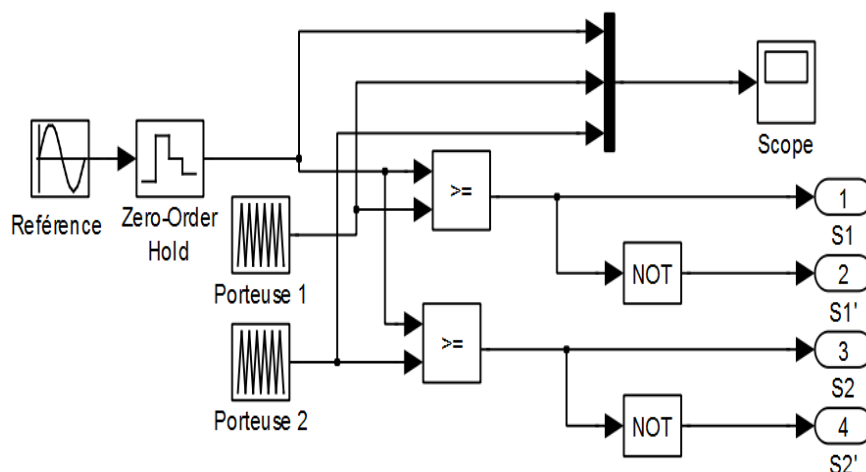


Fig. 4.26. Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur trois niveaux.

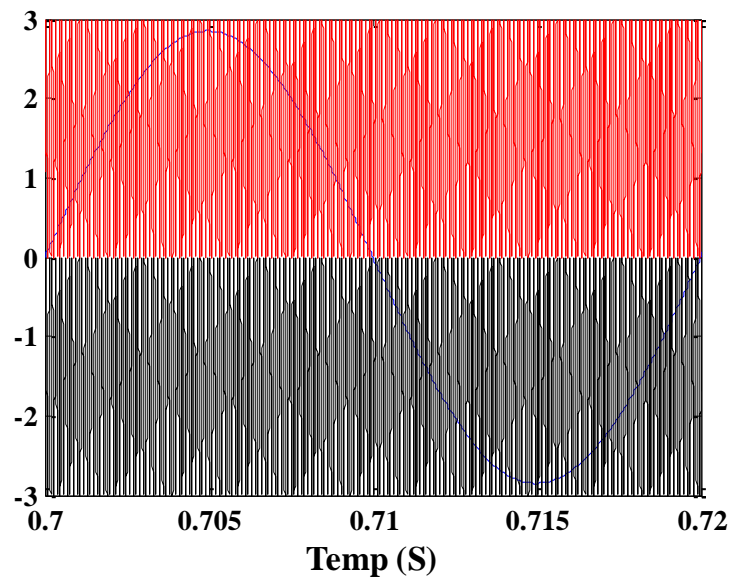


Fig. 4.27. Forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur à trois niveaux.

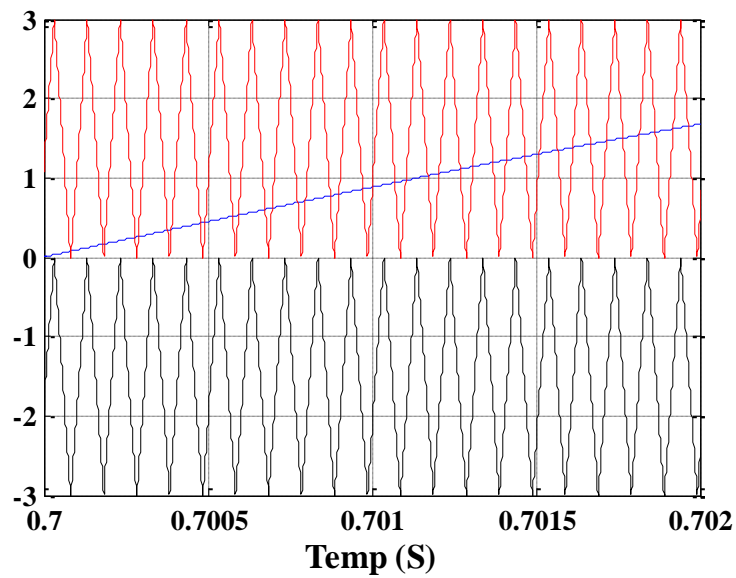
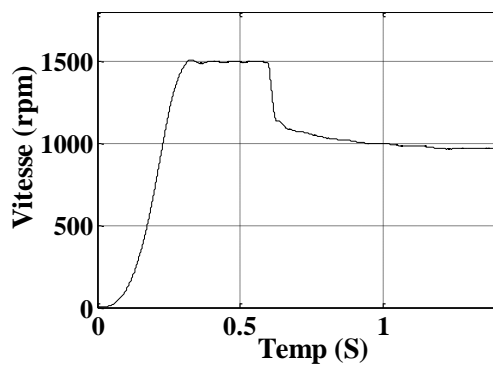


Fig. 4.28. Zoom de forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur à trois niveaux.

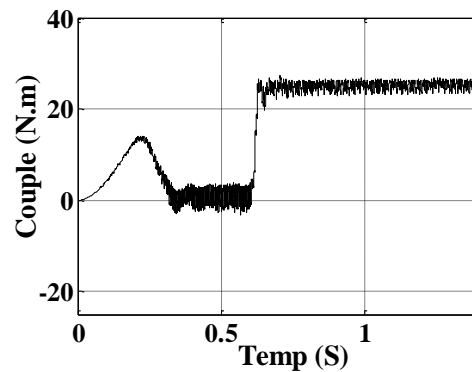
4.4.2.1 .Résultats obtenus

L'onduleur trois niveaux est alimenté par une source photovoltaïque dont la tension est V_{dc} . ($V_{dc}=600V$). Les capacités $C1$ et $C2$ assurent la répartition équitable de cette tension entre les bras de l'onduleur. Autrement dit, les bras supérieurs et inférieurs sont soumis à une tension $V_{dc}/2$ Chacun.

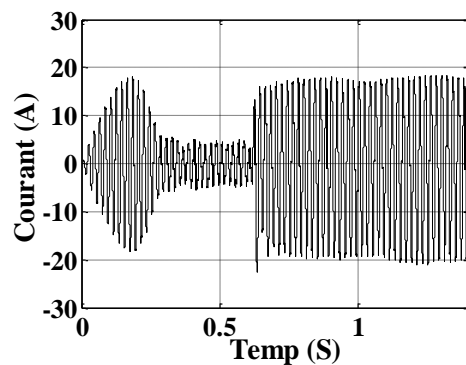
Les formes d'ondes respectivement du MAS et sorties de l'onduleur à trois niveaux sont illustrées à la figure (4.29).



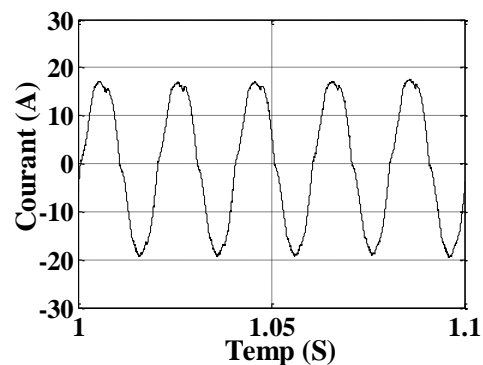
(a) La vitesse du moteur.



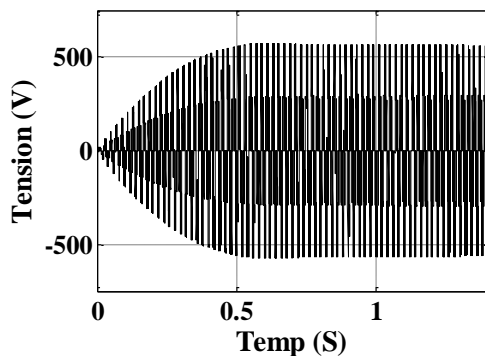
(e) Le couple moteur.



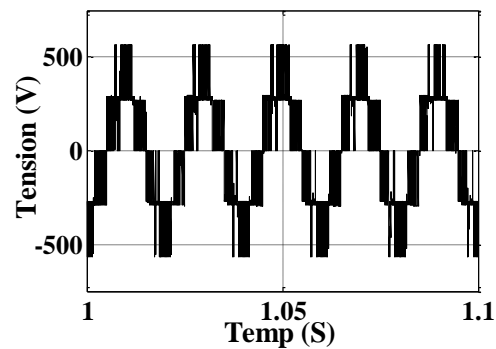
(b) Le courant de sortie



(f) Le zoom du courant de sortie.



(c) La tension de sortie



(g) Le zoom de la tension de sortie.

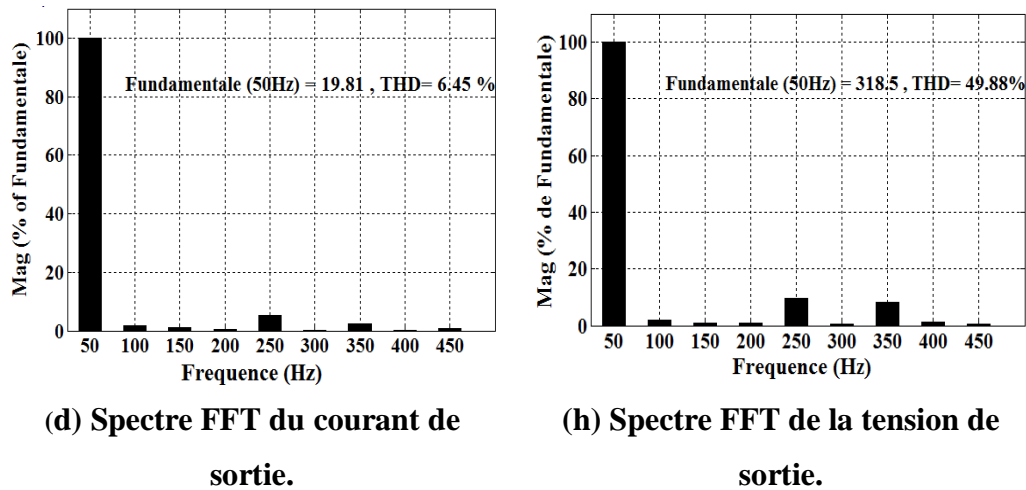


Fig.4.29. Les formes des ondes de l'onduleur trois niveaux alimentant un MAS.

4.4.2.2. Interprétations des résultats

Les figures (4.29 a et e) représentent respectivement la vitesse et le couple et moteur à induction. Le moteur a été démarré sans charge et à 0, 6 s, une charge de 25 N.m a été appliquée. L'application de charge a entraîné une diminution de la vitesse, qui s'est stabilisée à environ 988 tr / min et le couple s'est stabilisé à sa valeur nominale.

Dans les figures (4.29 b et d), le courant de sortie et son spectre FFT sont représentés. Un THD d'environ 6,45% du courant a été obtenu tandis que la tension composée et son spectre FFT sont représentés sur les figures (4.29 c et h) avec respectivement un THD de 49,88% et une amplitude du fondamental d'environ 318,5V. On remarque que ce THD est un peu élevé qu'on peut le diminuer en utilisant un onduleur multi-niveau d'ordre supérieur.

4.4.3. Simulation de l'onduleur cinq niveaux à diode de bouclage

De même que précédemment, pour réaliser les différentes simulations de l'onduleur de tension à cinq niveaux à diode de bouclage avec la stratégie de commande suggérée, on représente sa structure donnée par la figure (4.30) par un schéma bloc développé dans l'environnement Matlab.

Les figures (4.31) et (4.32) montrent respectivement le schéma bloc et la forme d'onde de la commande MLI sinusoïdale de l'onduleur à cinq niveaux.

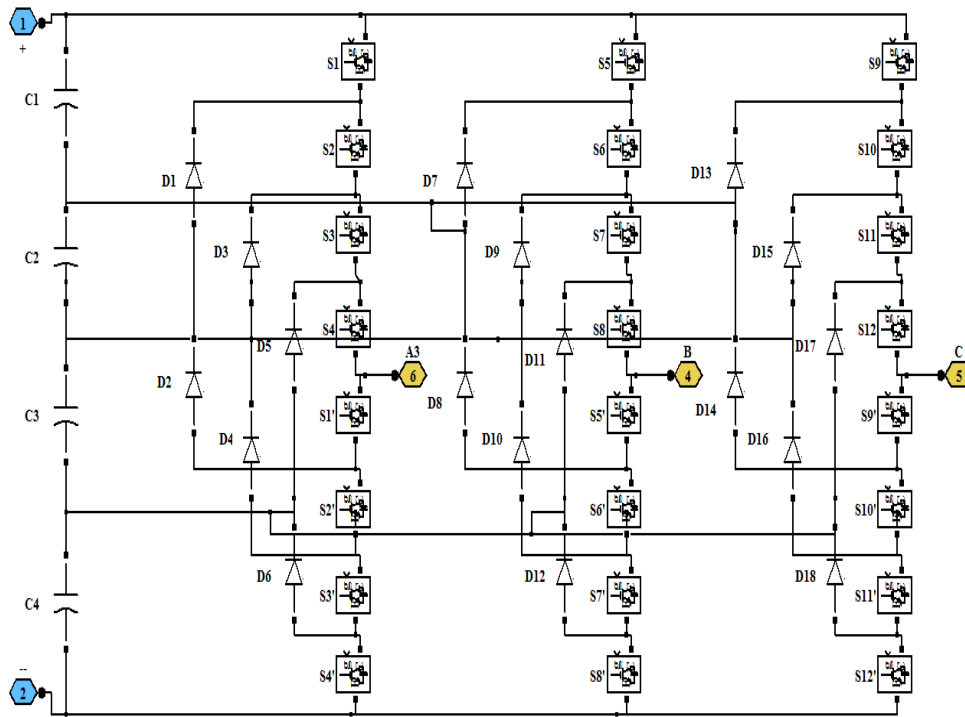


Fig. 4.30. Circuit de simulation d'un onduleur cinq niveaux à diode de bouclage.

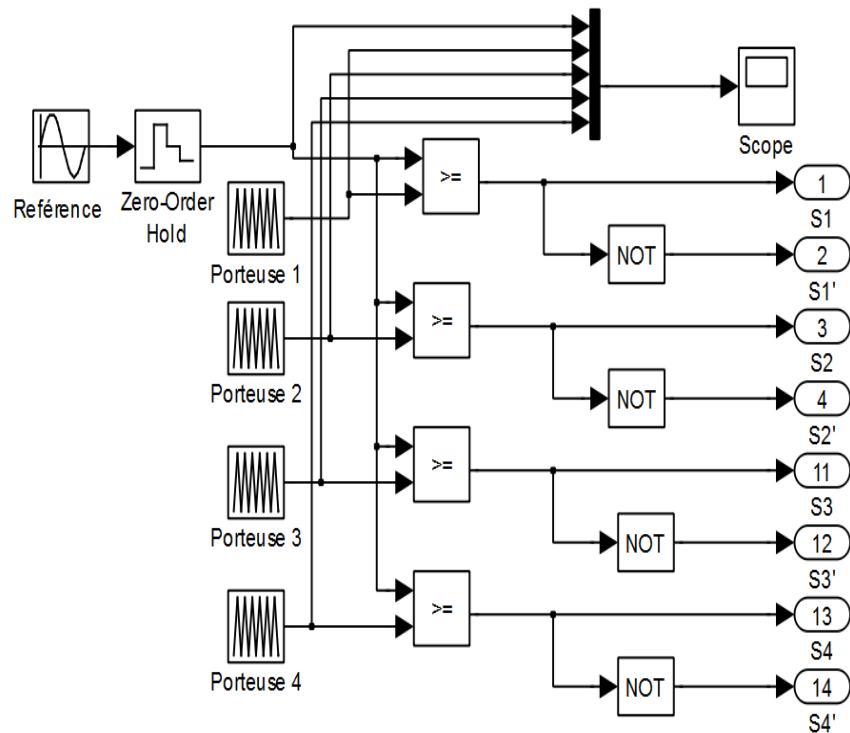


Fig. 4.31. Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur cinq niveaux.

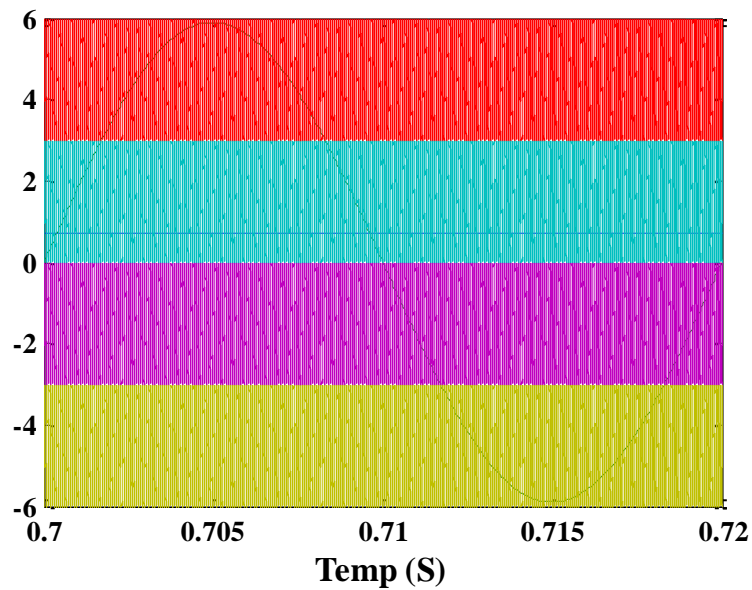


Fig. 4.32. Forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur cinq niveaux.

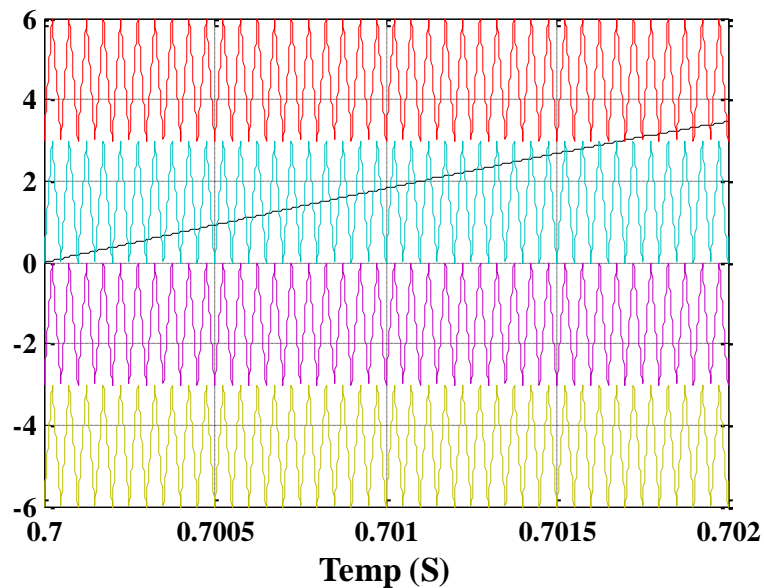
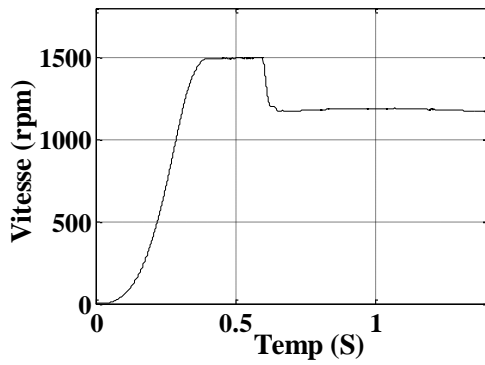


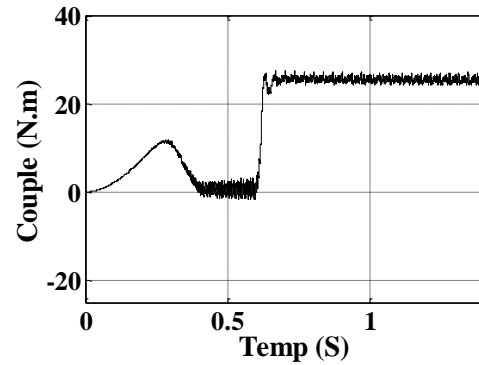
Fig. 4.33. Zoom de forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur cinq niveaux.

4.4.3.1. Résultats obtenu

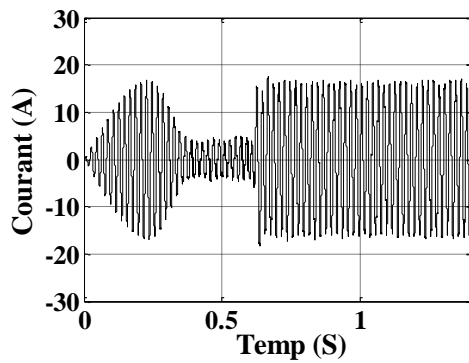
Comme précédemment, le moteur asynchrone est alimenté cette fois-ci par un onduleur à cinq niveaux. La tension d'entrée de l'onduleur est divisée en égalité entre quatre condensateurs. Les formes d'ondes de l'onduleur à cinq niveaux et du moteur asynchrone sont illustrées dans la figure (4.34).



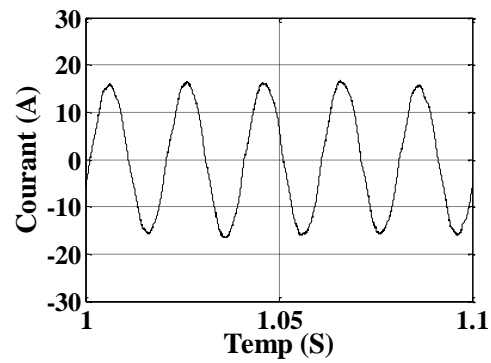
(a) La vitesse du moteur.



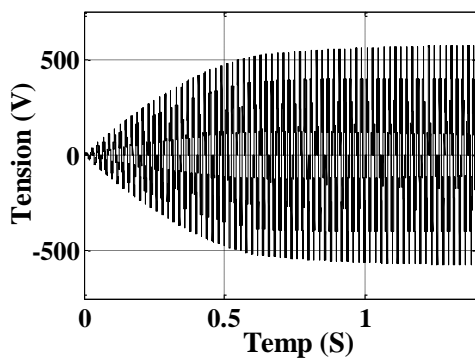
(e) Le couple moteur.



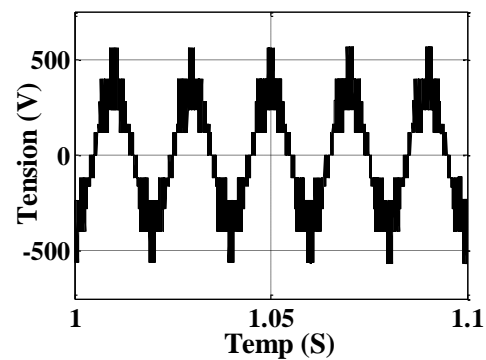
(b) Le courant de sortie



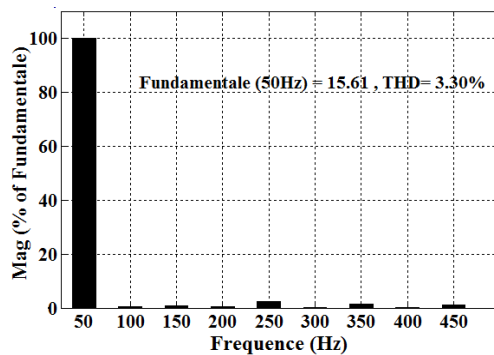
(f) Le zoom du courant de sortie.



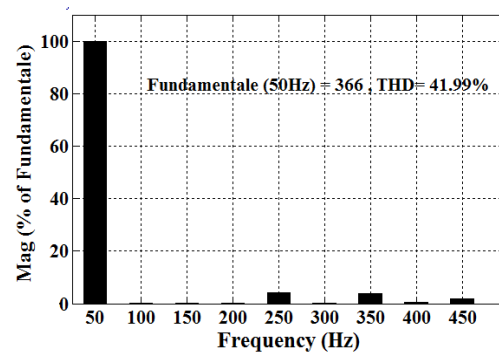
(c) La tension de sortie



(g) Le zoom de la tension de sortie.



(d) Spectre FFT du courant de sortie.



(h) Spectre FFT de la tension de sortie.

Fig.4.34. Les formes d'ondes de l'onduleur cinq niveaux alimentant un MAS.

4.4.3.2. Interprétations des résultats

Les figures (4.34 a et e) représentent respectivement la vitesse et le couple du moteur à induction. Comme auparavant le moteur a été démarré sans charge et à 0,6 s, une charge de 25 N.m a été appliquée. L'application de charge a entraîné une diminution de la vitesse, qui s'est stabilisée à environ 1160 tr / min et le couple s'est stabilisé à sa valeur nominale.

Dans les figures (4.34 b et d), le courant de sortie et son spectre FFT sont représentés, ce qui donne un THD d'environ 3,30%, tandis que la tension composée et son spectre FFT sont représentées sur les Fig. (4.34 c et h) avec respectivement un THD de 41,99% et une amplitude du fondamental d'environ 366 V. Comparativement à un onduleur trois niveaux, le THD soit du courant ou de la tension composée a diminué qui est tout à fait logique. Le plus le nombre de niveaux augmente, le THD diminuera d'avantage.

4.4.4. Simulation de l'onduleur sept niveaux à diode de bouclage

De même que précédemment, pour réaliser la simulation de l'onduleur de tension à sept niveaux à diode de bouclage avec la stratégie de commande suggérée, on représente sa structure donnée par la figure (4.35) par un schéma bloc développé dans l'environnement Matlab.

Les figures (4.36) et (4.37) montrent respectivement le schéma bloc et la forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle de l'onduleur à sept niveaux.

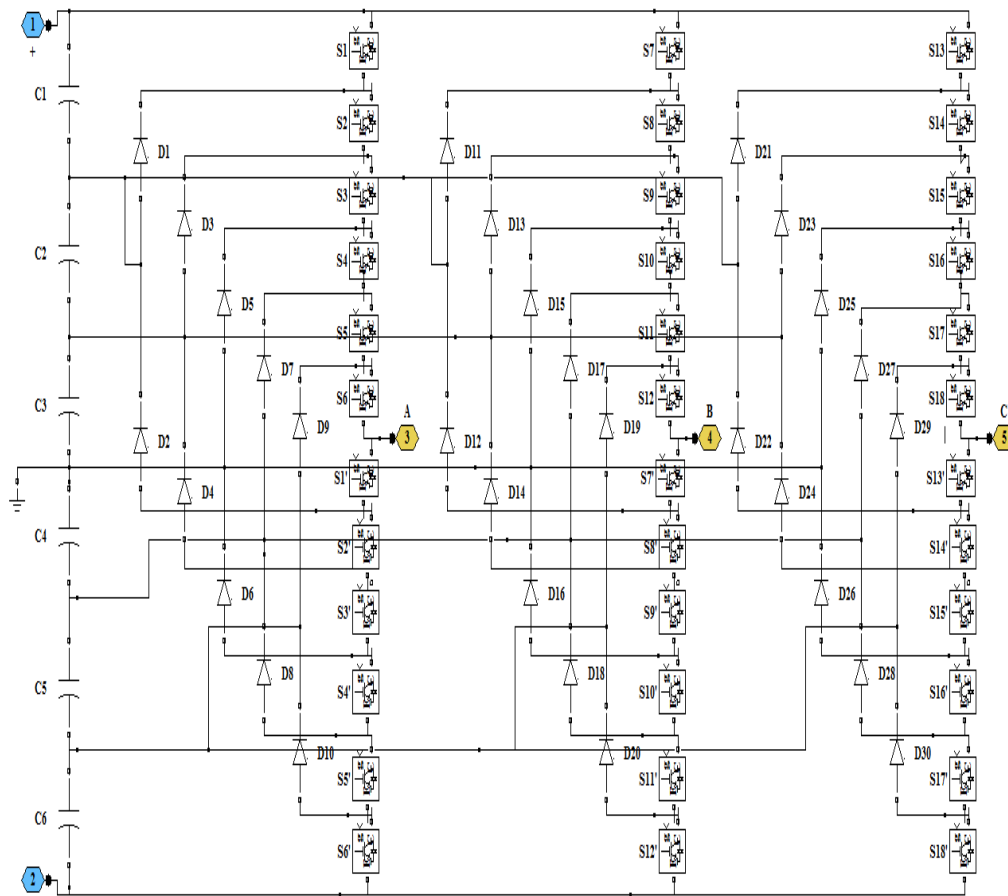


Fig. 4.35. Circuit de simulation d'un onduleur sept niveaux à diode de bouclage.

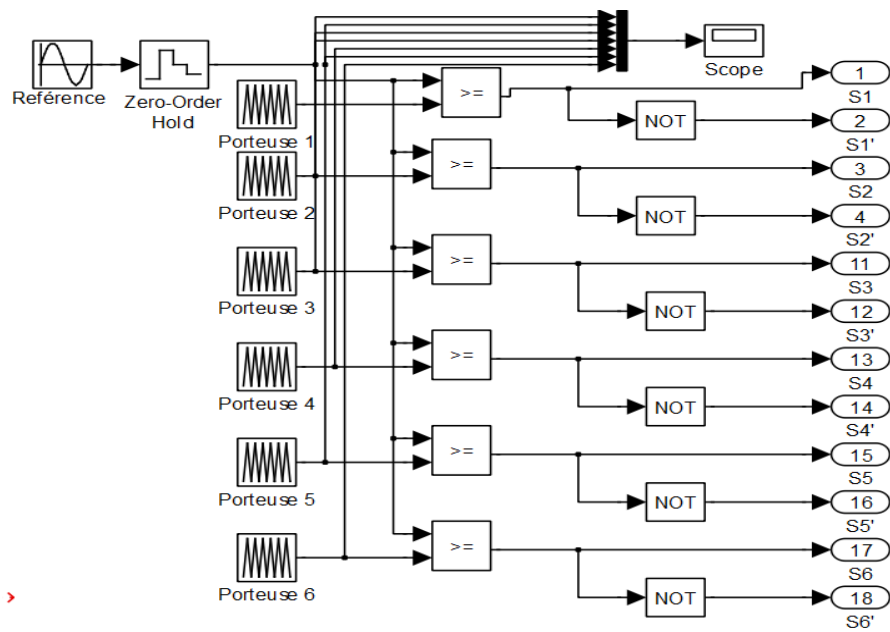


Fig. 4.36. Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur sept niveaux.

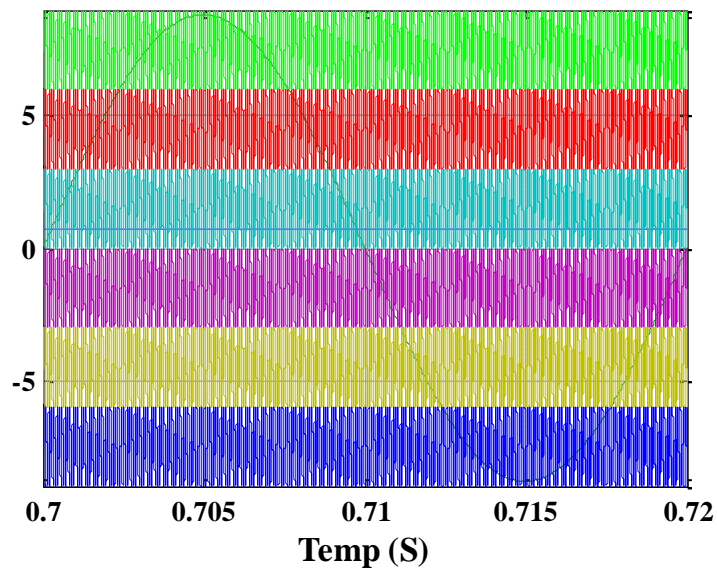


Fig. 4.37. Forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur sept niveaux.

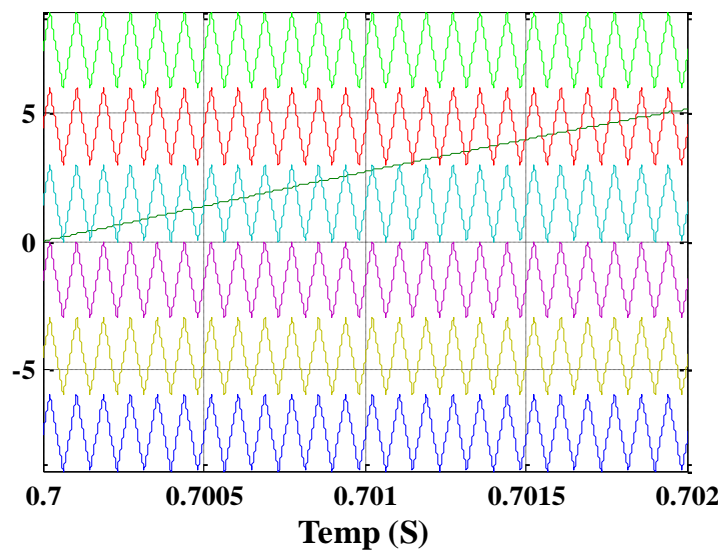
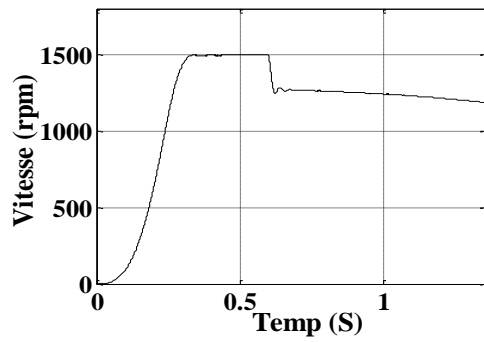


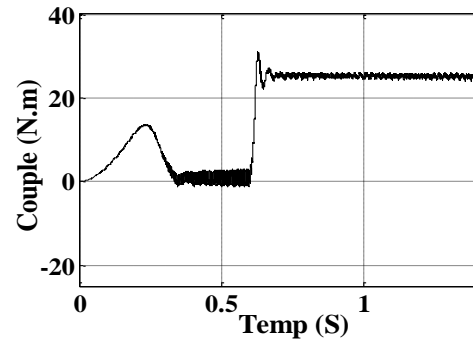
Fig. 4.38. Zoom de forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un onduleur sept niveaux.

4.4.4.1. Résultats obtenu

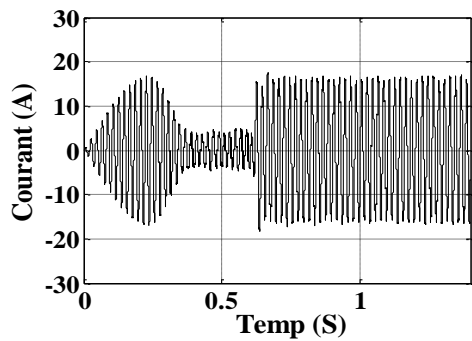
L'onduleur sept niveaux est alimenté par une source photovoltaïque dont la tension d'entrée de l'onduleur est divisée en égalité entre six condensateurs. Les formes d'ondes, sorties de l'onduleur à sept niveaux et du MAS sont illustrées dans la Figure (4.39).



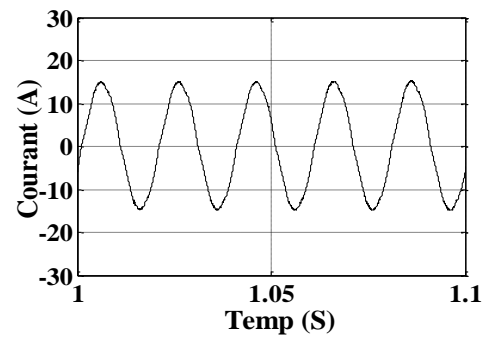
(a) La vitesse du moteur.



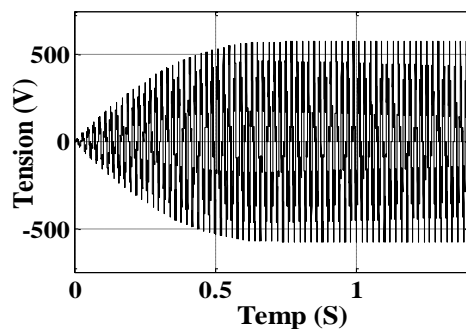
(e) Le couple moteur.



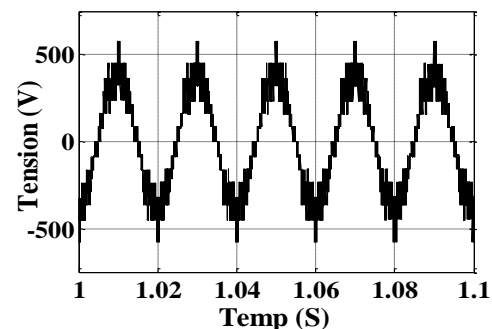
(b) Le courant de sortie



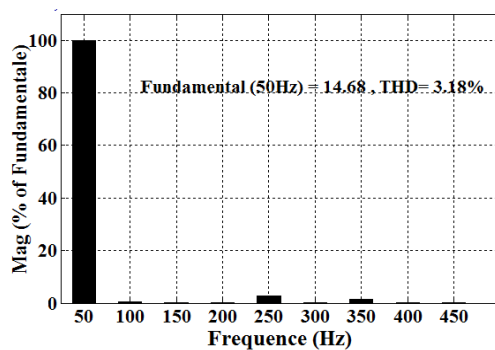
(f) Le zoom du courant de sortie.



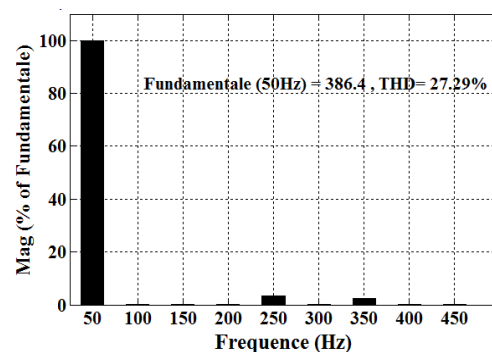
(c) La tension de sortie



(g) Le zoom de la tension de sortie.



(d) Spectre FFT du courant de sortie.



(h) Spectre FFT de la tension de sortie.

Fig .4.39. Les formes des ondes de l'onduleur sept niveaux alimentant un MAS.

4.4.4.2. Interprétations des résultats

Les figures (4.39 a et e) représentent respectivement le couple et la vitesse du moteur à induction. Le moteur a été démarré sans charge et à 0, 6 s, une charge de 25 N.m a été appliquée. L'application de charge a entraîné une diminution de la vitesse, qui s'est stabilisée à environ 1200 tr / min et le couple s'est stabilisé à sa valeur nominale.

Dans les figures (4.39 b et d), le courant de sortie et son spectre FFT sont représentés, ce qui donne un THD d'environ 3,18%, tandis que la tension composée et son spectre FFT sont représentées sur les figures (4.39 c et h) avec respectivement un THD de 27,29% et une amplitude du fondamental d'environ 386,4V.

4.4.5. Comparaisons entre les onduleurs trois, cinq et sept niveaux

En comparant les performances obtenues dans le cas de l'onduleur à sept niveaux avec l'onduleur à trois et à cinq niveaux, on constate que sous les mêmes conditions de fonctionnement (même fréquence de commutation et même taux de modulation), l'onduleur à sept niveaux produit une tension de sortie contenant moins d'harmoniques et la qualité du courant est meilleure et les ondulations du couple sont réduites.

Tableau .4.7. La comparaison entre les trois, cinq et sept niveaux d'onduleur à diode bouclage.

Niveaux d'onduleur	THD (%) de courant	THD (%) de la tension composée
Trois Niveaux	6.45	49.88
Cinq Niveaux	3.30	41.99
Sept Niveaux	3,18	27,29

Le tableau (4.7) montre la comparaison entre les trois, cinq sept niveaux de l'onduleur à diode de bouclage.

On remarque que, lorsqu'on augmente le nombre de niveaux de l'onduleur, la distorsion harmonique totale (THD) du courant et de la tension de sortie est diminué c.-à-d., la forme du courant deviendra proche à la sinusoïde avec une grande stabilité au niveau du couple.

4.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appliqué la stratégie MLI sinus-triangle à disposition de phase pour les onduleurs à trois niveaux, à cinq et sept niveaux à structure à diode de bouclage pour l'entraînement de la machine asynchrone. D'après les résultats de simulations obtenues, nous avons remarqué que l'analyse harmonique du courant et de la tension montre une meilleure qualité spectrale pour le cas de l'onduleur sept niveaux par rapport aux onduleurs trois et cinq niveaux. De manière générale, plus le nombre de niveaux de la tension générée par le convertisseur est grand, plus faible sera son taux de distorsion harmonique. Dans les convertisseurs multi-niveaux, plus ce nombre de niveaux est élevé, plus compliquée devient la structure du convertisseur. Son coût et la complexité de sa commande s'en trouvent augmentés et sa fiabilité deviendra réduite.

Dans le chapitre suivant, nous allons modifier l'onduleur trois niveaux conventionnel à diode de bouclage pour améliorer la qualité de l'énergie sans la nécessité d'augmenter le nombre de niveau de l'onduleur.

Chapitre 5

Simulation de l'onduleur à trois niveaux modifié

5.1. Introduction

L'onduleur multi-niveau à diode de bouclage est la topologie la plus utilisée dans l'industrie pour les applications haute tension. Les avantages les plus avantageux de ces onduleurs sont ceux qui ont un niveau suffisamment élevé, la nécessité de filtrer est réduite car le contenu en harmoniques sera faible. Cependant, un nombre supérieur à trois niveaux présente l'inconvénient du contrôle qui est complexe.

L'onduleur trois niveaux à diode de bouclage sera modifié pour améliorer sa qualité en termes de courant et tension sans avoir à augmenter le nombre de niveau de l'onduleur à plus de trois niveaux. Il est alimenté par un hacheur boost à MPPT à base de logique floue et il va entraîner par la suite un moteur asynchrone. La simulation de la faisabilité de cette topologie modifiée sera vérifiée.

Dans ce chapitre, la structure et le principe de fonctionnement de l'onduleur modifié seront présentés ainsi que les résultats et les discussions de simulation du système complet.

5.2. L'onduleur à trois niveaux modifié

La structure de l'onduleur modifié est similaire à celle de la diode de bouclage dans laquelle un condensateur est ajouté en parallèle entre chacune des deux diodes de serrage pour chaque bras. L'objectif principal de cette modification est d'améliorer l'onduleur en niveaux en termes de contenu harmonique à abaisser.

Un onduleur à niveau n à un bras nécessite $2(n-1)$ dispositifs de commutation, $2(n-2)$ diodes de serrage, $(n-1)$ sources de tension, en plus de celles-ci, $(n-2)$ condensateur en parallèle avec deux bornes de serrage des diodes sont ajoutées.

La structure de l'onduleur modifié à trois niveaux est représentée sur la figure (5.1). Le bus continu d'entrée est composé de deux condensateurs en série permettant l'accès au potentiel $+V_{dc}/2$, 0 , $-V_{dc}/2$, formant un point milieu noté (O). La tension totale du bus continu vaut V_{dc} , dans les conditions normales de fonctionnement, celle-ci est uniformément répartie sur les deux capacités qui possèdent alors une tension $V_{dc}/2$ à leurs bornes.

Chacun des trois bras (A, B et C) de l'onduleur est composé de quatre interrupteurs commandés (S1, S2, S1' et S2' pour le bras A) et deux diodes à bouclage (D1 et D2) connectées au point milieu du bus continu. Les interrupteurs commandés sont unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant : il s'agit d'association classique d'un transistor et d'une diode antiparallèle.

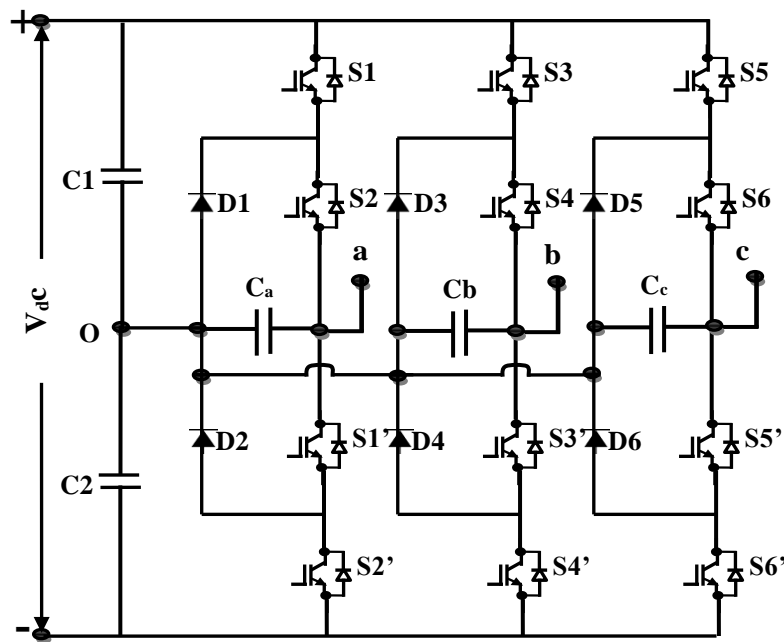


Fig. 5.1. Structure de l'onduleur à trois niveaux modifié.

5.3. Principe de fonctionnement

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre (o). Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs S1, S2, S1' et S2' du bras.

Pour ce type d'onduleur, seules trois configurations sont fonctionnelles. Elles sont décrites comme suit:

Première configuration {1100}

S1, S2 sont passants et S1', S2' sont bloqués (figure 5.2). La valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = +V_{dc}/2$$

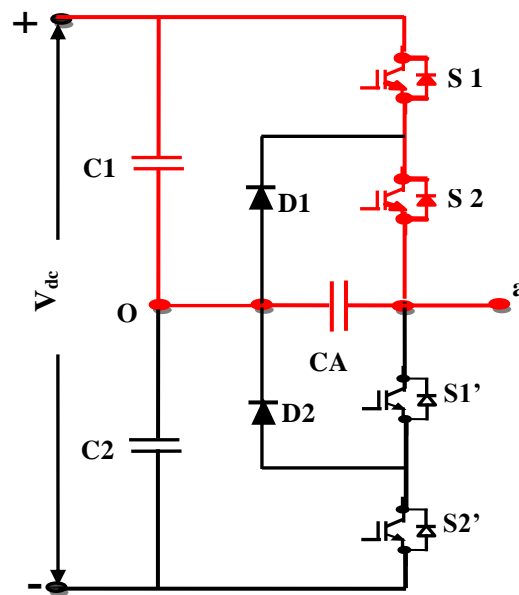


Figure .5.2. Première configuration du bras (a).

Deuxième configuration {0110}

S2, S1'sont passants et S1, S2'sont bloqués (figure 5.3). Le point (a) est relié directement au point neutre (o). Alors, la tension de sortie V_{ao} est nulle :

$$V_{ao} = 0$$

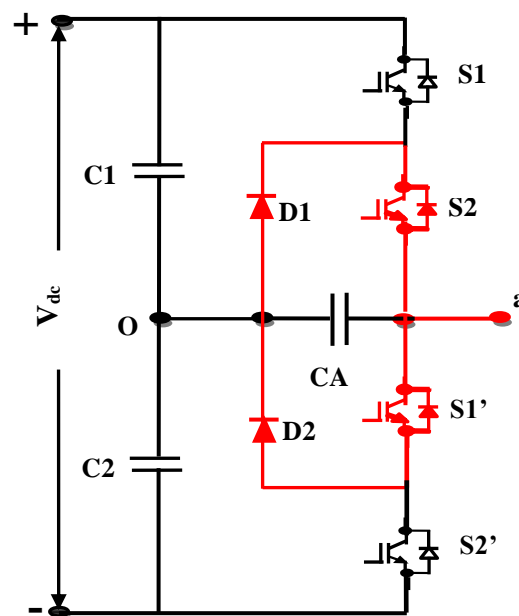


Fig. 5.3. Deuxième configuration du bras (a).

Troisième configuration {0011}

$S1'$, $S2'$ sont passants et $S1$, $S2$ sont bloqués (figure 5.4). La valeur de la tension simple de sortie est :

$$V_{ao} = -V_{dc}/2$$

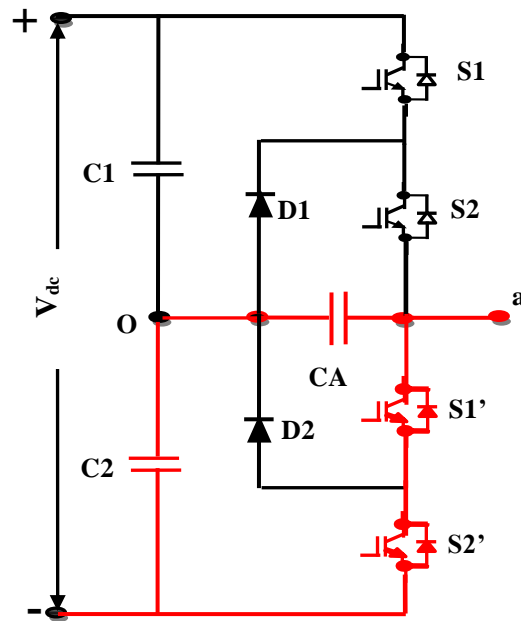


Fig. 5.4. Troisième configuration du bras (a).

Pour synthétiser une tension de phase à trois niveaux, la commutation des séquences sont données dans le tableau (5.1). La condition d'état 1 signifie l'activation et 0 la désactivation.

Tableau .5.1. Les états de commutation de bras de l'onduleur modifié à trois niveaux.

Tension V_{an}	État de commutation			
	$S1$	$S2$	$S1'$	$S2'$
$+V_{dc}/2$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-V_{dc}/2$	0	0	1	1

5.4. Résultats de simulation

L'onduleur triphasé à trois niveaux modifié alimenté par un système photovoltaïque a été simulé à l'aide Matlab Sim-power système. Cet système comprend le générateur photovoltaïque dont la tension de sortie est V_{dc} ($V_{dc}=600V$), le convertisseur élévateur de tension continu-continu qui est commandé par un signal de modulation de largeur d'impulsion avec une poursuite de point de puissance maximale (MPPT) basée sur une logique floue. Les signaux de commutation pour le convertisseur à trois niveaux modifié sont commandés par la technique MLI sinus triangle. Un moteur à induction a été utilisé comme une charge.

La figure (5.5) montre le modèle pour le système complet utilisé dans la simulation et la structure de l'onduleur trois niveaux modifié donnée est par la figure (5.6).

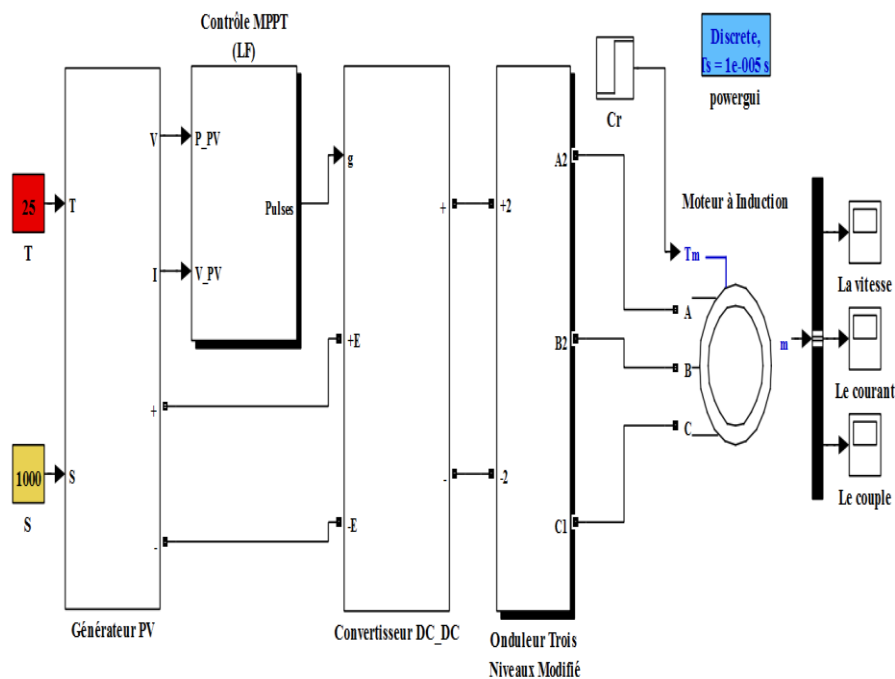


Fig. 5.5. Circuit complet de simulation.

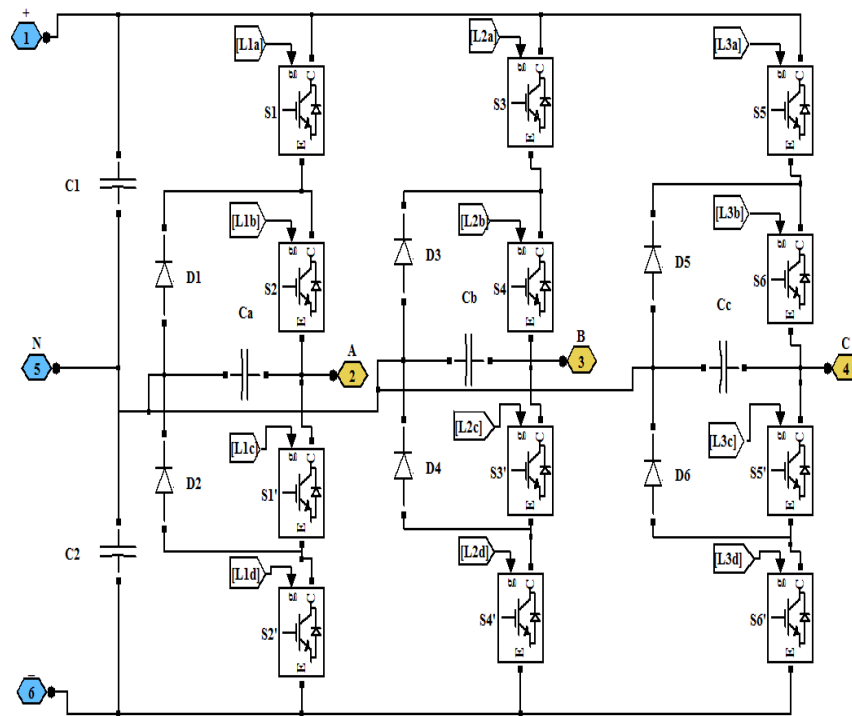


Fig. 5.6. Circuit d'un onduleur modifié.

La simulation a été faite pour plusieurs valeurs de taux de modulation et d'indice de modulation afin de trouver les valeurs les plus informant.

Les premières simulations ont été exécutées pour la valeur de $m=200$ et r allant de 0.65 à 0.95. Le résultat obtenu est donné dans le tableau (5.2).

D'autres simulations ont été exécutées pour $r = 0.95$ et m allant de 10 à 200. Le résultat cette fois-ci est représenté au tableau (5.3).

Tableau .5.2. Performance de l'onduleur trois niveaux modifié avec la commande MLI sinus-triangle pour $m=200$ et r allant de 0.65 à 0.95.

Taux de modulation r	THD (%) du courant	THD (%) de la tension composée
$r=0.65$	6.95	53.24
$r=0.75$	6.55	51.62
$r=0.85$	6.15	49.38
$r=0.95$	5.66	47.52

Le tableau (5.2) représente les résultats obtenus avec différents taux de modulation de l'onduleur à trois niveaux. On remarque que le taux de modulation r quand il a augmenté la valeur des THD du courant diminue de 6,95% jusqu'à une valeur de 5.66%, tandis que le THD de la tension est réduit de 53.24% jusqu'à une valeur de 47.52%.

Tableau .5.3. Performance de l'onduleur trois niveaux modifié avec la commande MLI sinus-triangle pour $r = 0.95$ et m allant de 10 à 200.

L'indice de modulation m	THD (%) du courant	THD (%) de la tension composée
$m = 10$	10.59	47.99
$m = 50$	6.04	47.93
$m = 100$	5.89	47.84
$m = 150$	5.73	47.77
$m = 200$	5.66	47.52

Les formes d'ondes de sortie de l'onduleur à trois niveaux modifié pour un taux de modulation $r=0.95$ et un indice de modulation $m = 10$ jusqu'à $m = 200$ sont illustrées par les figures (5.7) et (5.10).

Pour $m=10$ (500HZ) :

La figure (5.7) représente le schéma bloc de la commande MLI sinusoïdale à deux porteuses de l'onduleur trois niveaux modifié. Dans cette méthode, tous les opérateurs ci-dessus et au-dessous de la ligne de référence zéro sont en phase. Si toutes les porteuses sont sélectionnées avec la même phase, la méthode est connue sous le nom de méthode disposition en phase. Les deux porteuses et la référence sont comme indiquées dans la figure (5.8).

La figure (5.9) et la figure (5.10) représentent respectivement la forme d'onde de la tension simple (V_{ao}) et les signaux de cette stratégie pour un bras (a) de l'onduleur pour $m=10$ (500 Hz).

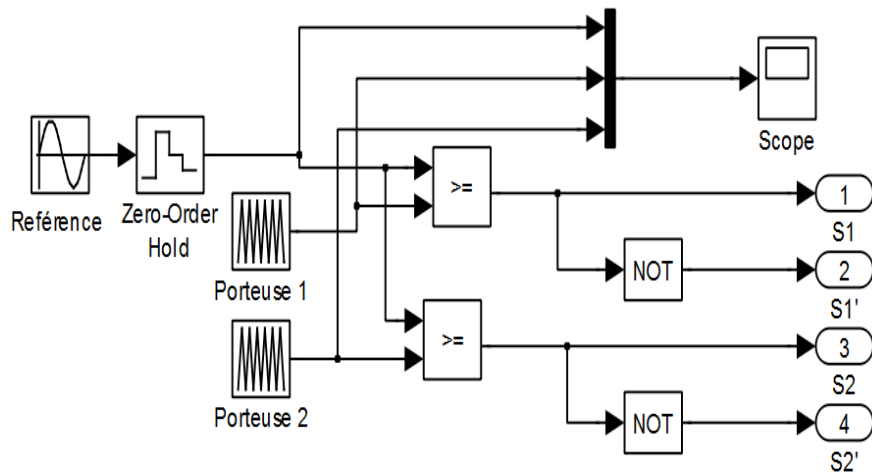


Fig. 5.7. Le schéma bloc de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) d'onduleur trois niveaux modifié.

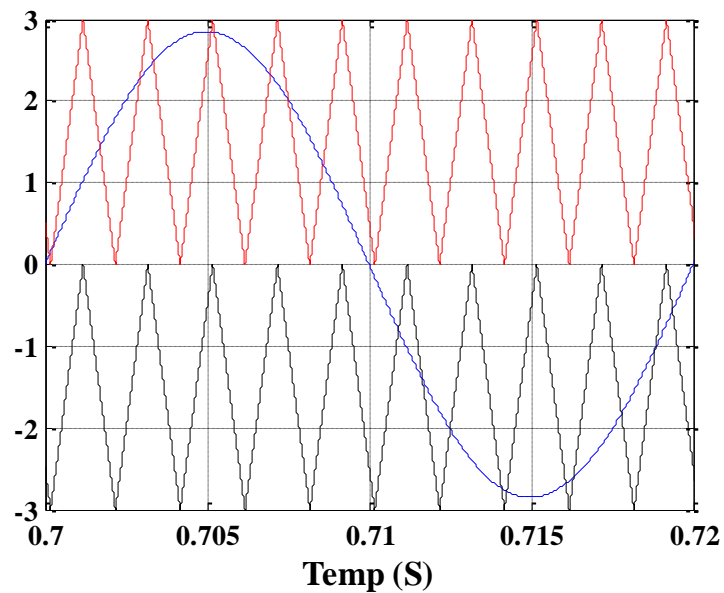


Fig. 5.8. Formes d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) de l'onduleur trois niveaux modifié pour $m=10$.

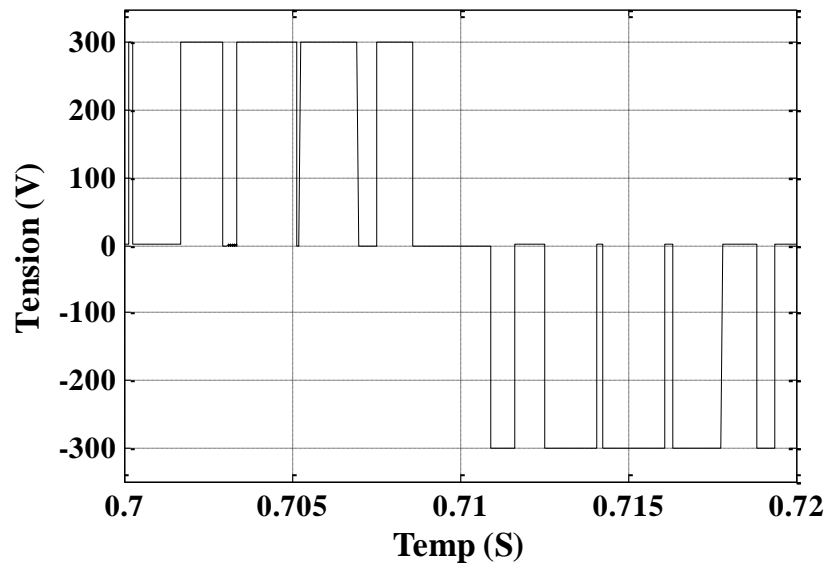
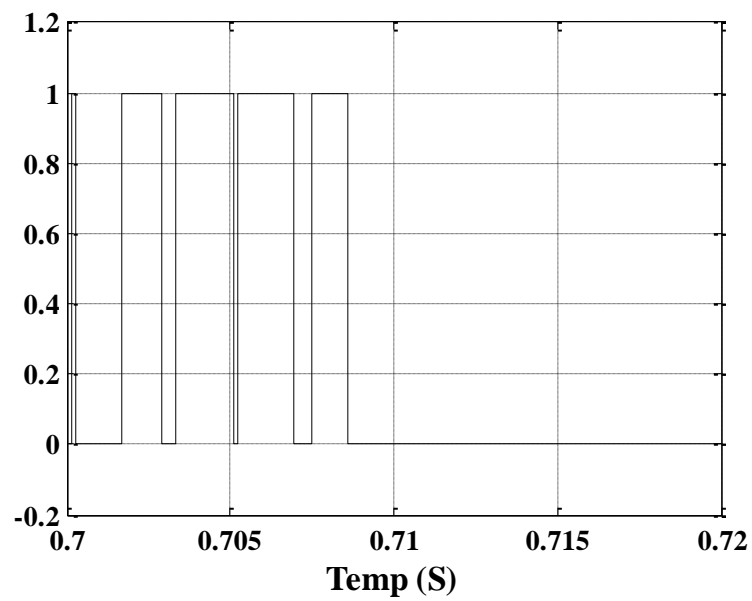
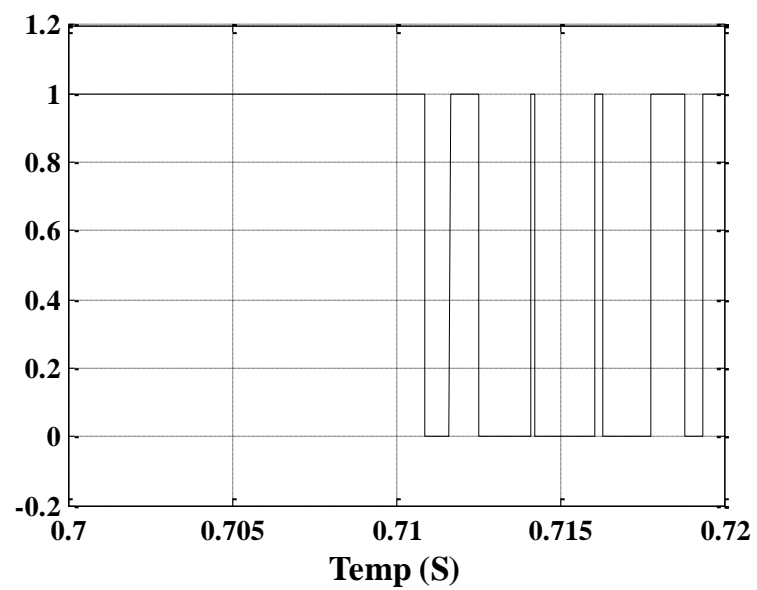


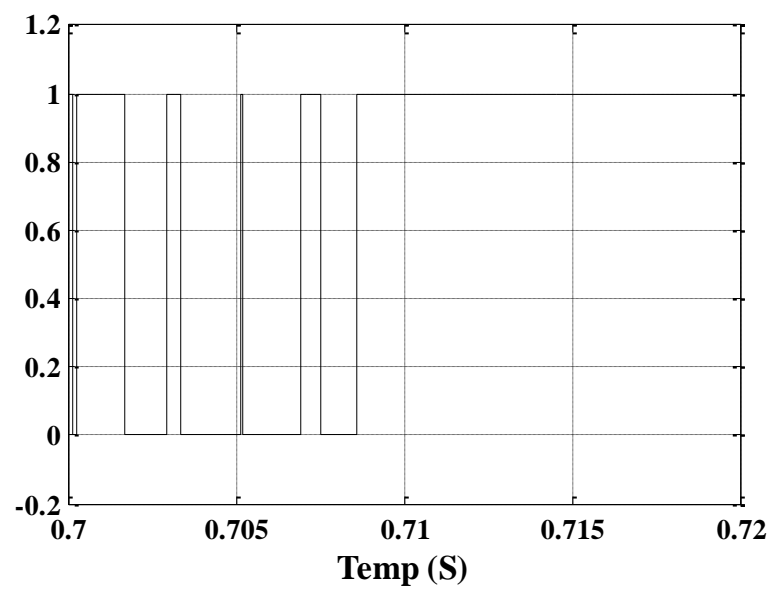
Fig. 5.9. Forme d'onde de la tension simple (V_{ao}) d'un onduleur trois niveaux modifié pour $m=10$.



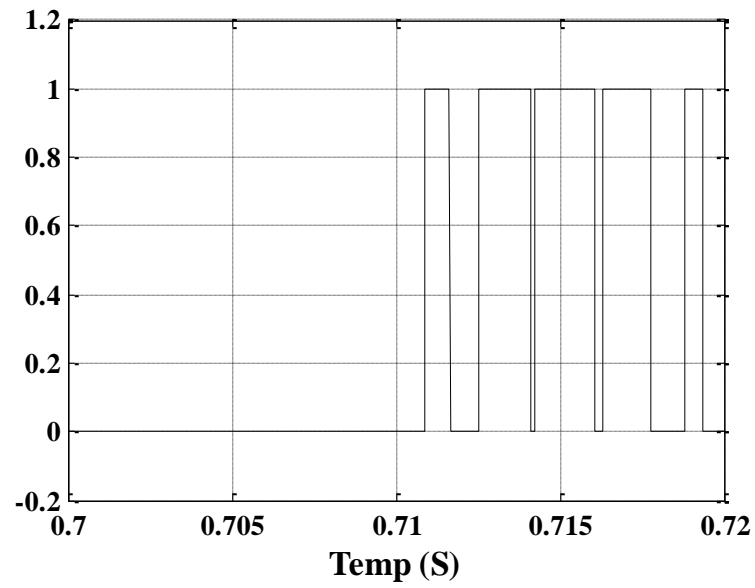
(a) Signal 1.



(b) Signal 2.

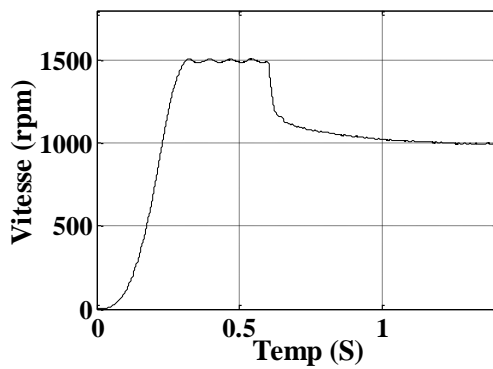


(c) Signal 1'.

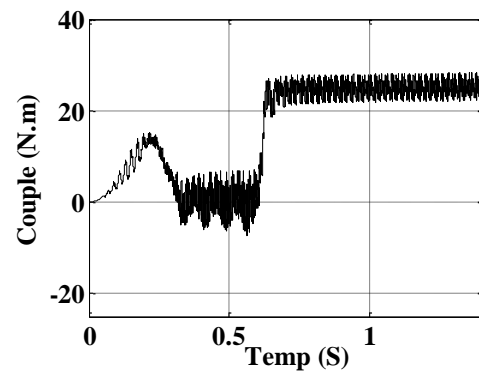


(d) Signal 2'.

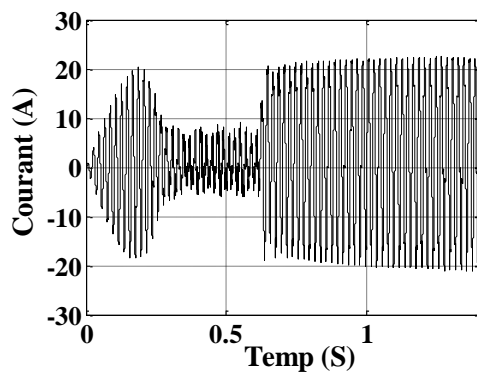
Fig. 5.10. Les signaux de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) pour $m=10$.



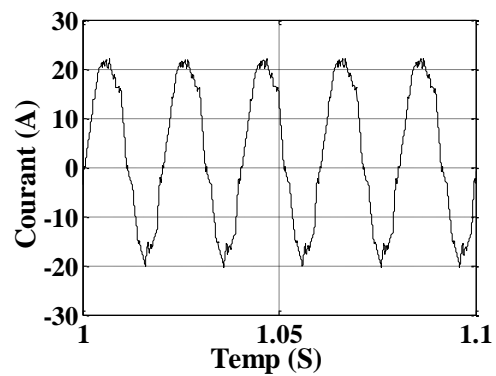
(a) La vitesse du moteur.



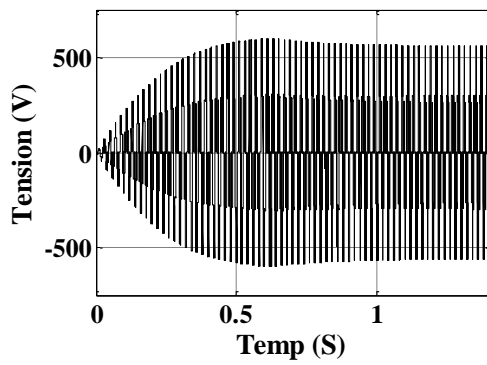
(e) Le couple moteur.



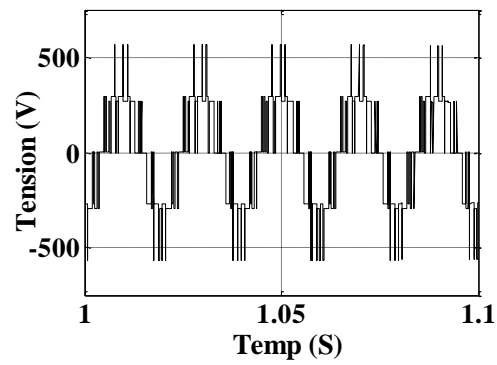
(b) Le courant de sortie



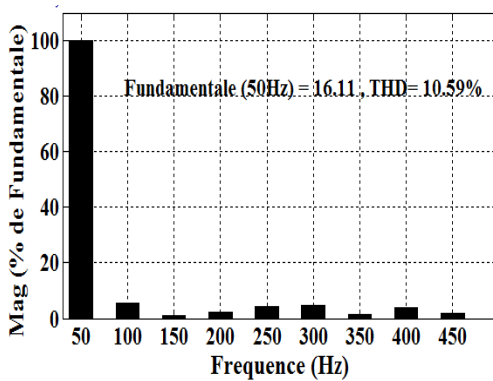
(f) Zoom du courant de sortie.



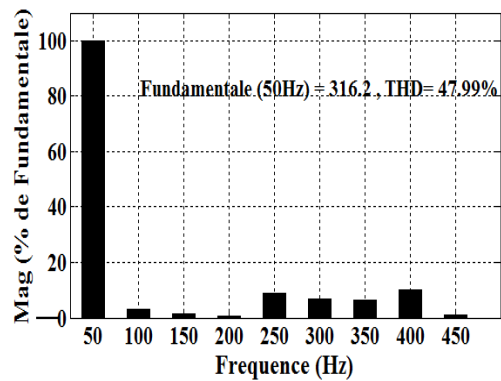
(c) La tension de sortie



(g) Zoom de la tension de sortie.



(d) Spectre FFT du courant de sortie.



(h) Spectre FFT de la tension de sortie.

Fig.5.11. Les formes des ondes de topologie modifiée pour $r=0.95$ et $m=10$.

$m=200$ (10 KHZ) :

La figure (5.12) représente la forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un bras de l'onduleur trois niveaux pour $m = 200$.

Les figures (5.14) et la figure (5.15) montrent la forme d'onde de la tension simple (V_{ao}) et les signaux de cette stratégie pour un bras (a) de l'onduleur pour $m=200$ (10 KHz).

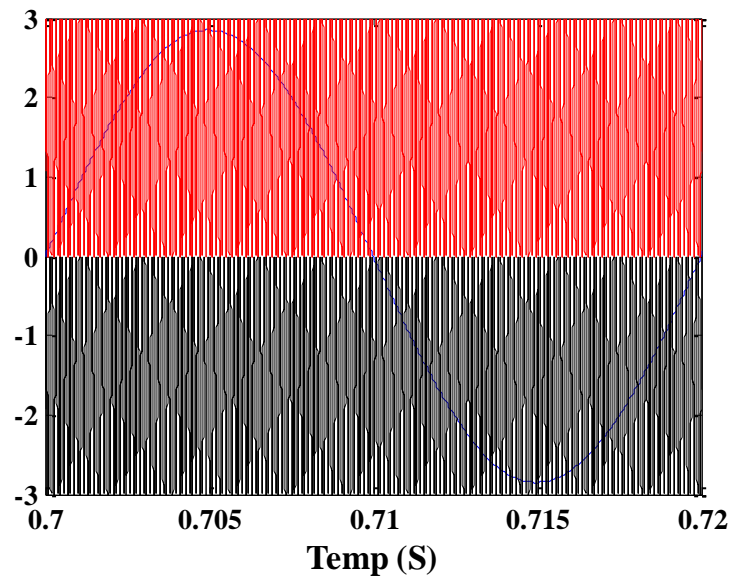


Fig. 5.12. Forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) de l'onduleur trois niveaux modifié pour $m=200$.

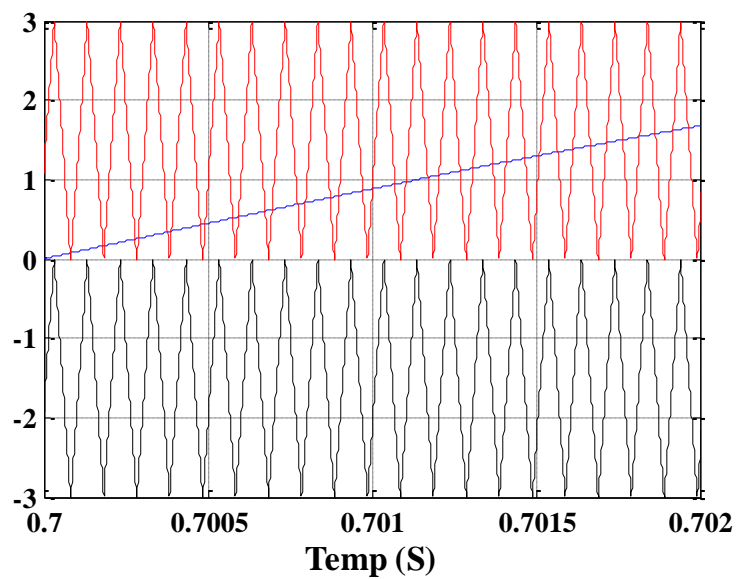


Fig. 5.13. Zoom de la forme d'onde de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) d'onduleur trois niveaux modifié pour $m=200$.

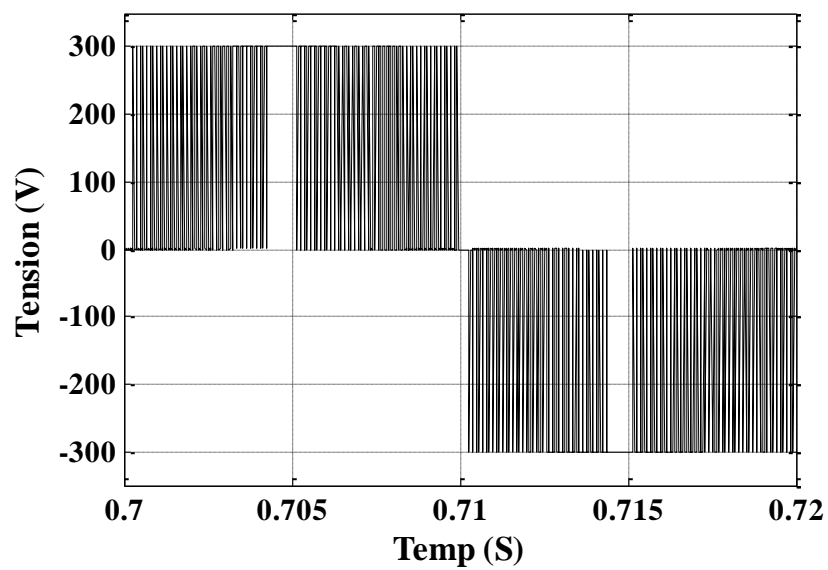
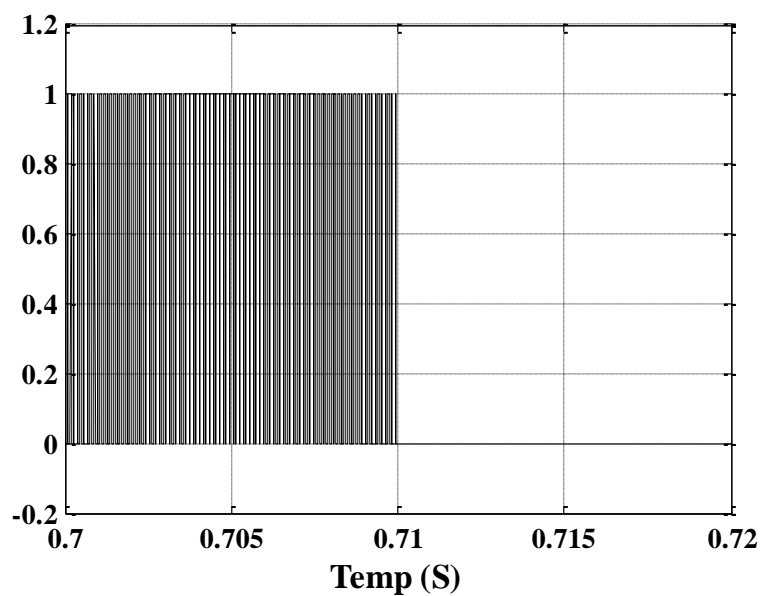
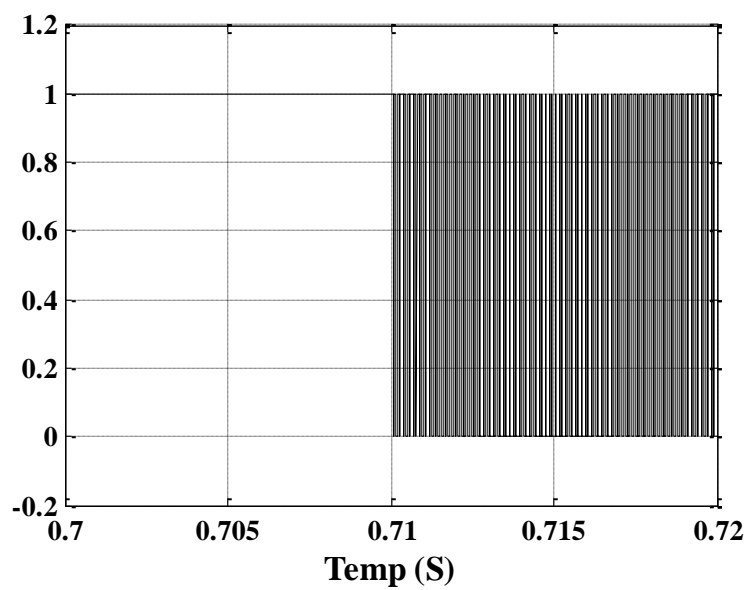


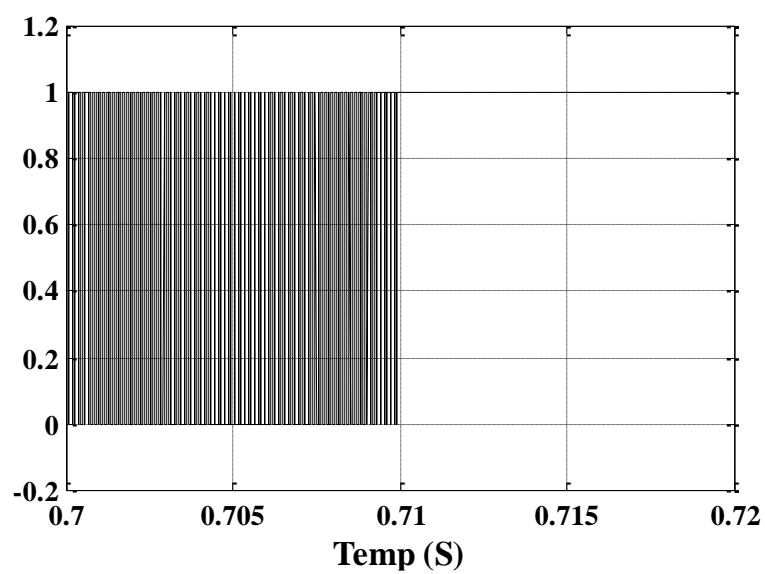
Fig. 5.14. Forme d'onde de la tension simple (V_{ao}) de l'onduleur trois niveaux modifié pour $m=200$.



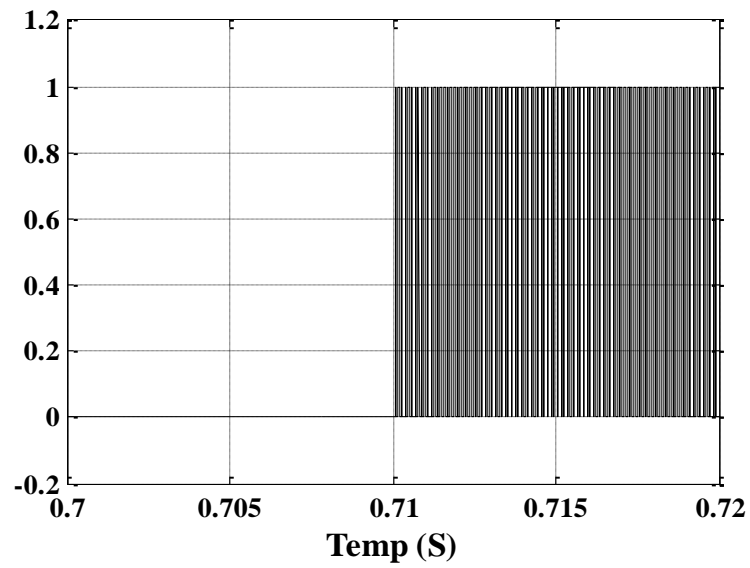
(a) Signal 1.



(b) Signal 2.

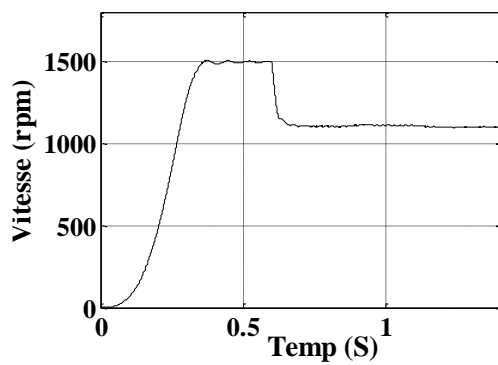


(c) Signal 1'.

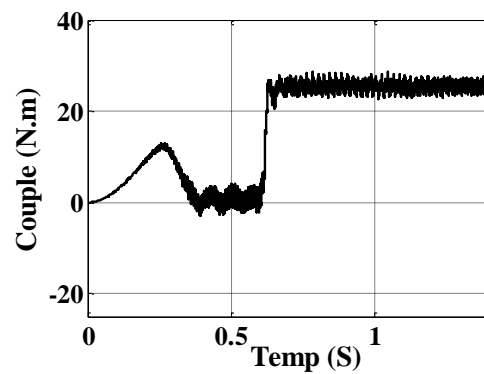


(d) Signal 2'.

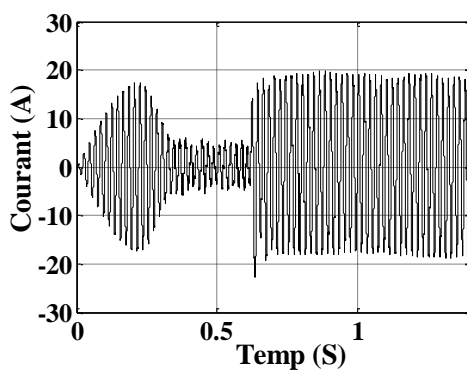
Fig. 5.15. Les signaux de la commande MLI sinus-triangle d'un bras (a) pour $m=200$.



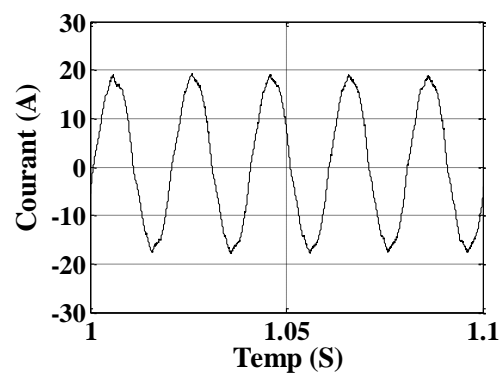
(a) La vitesse du moteur.



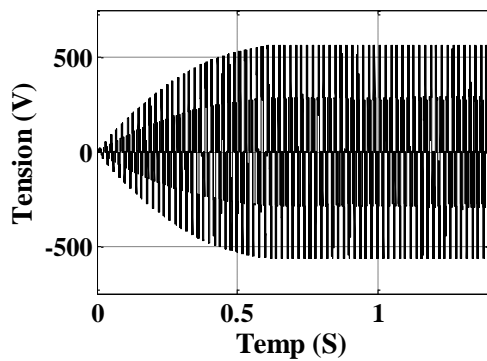
(e) Le couple moteur.



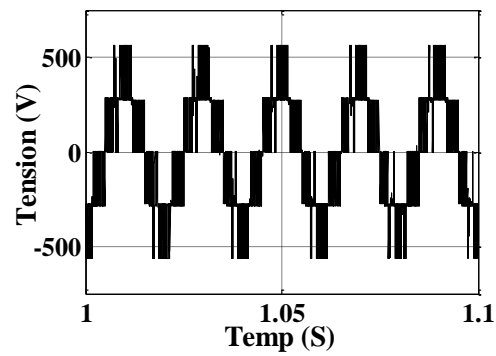
(b) Le courant de sortie



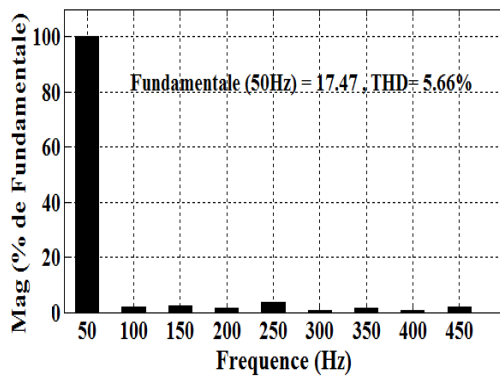
(f) Zoom du courant de sortie.



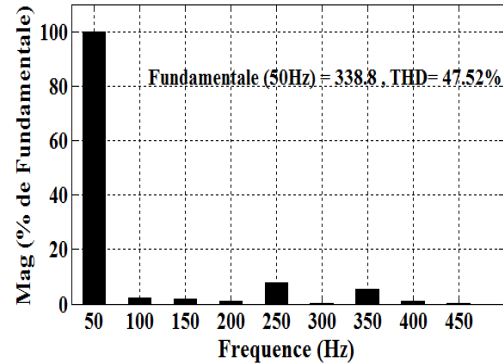
(c) La tension de sortie



(g) Le zoom de la tension de sortie.



(d) Spectre FFT du courant de sortie.



(h) Spectre FFT de la tension de sortie.

Fig.5.16. Les formes des ondes de topologie modifiée pour $r=0.95$ et $m=200$.

5.5. Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus concernant l'onduleur :

- Le convertisseur commute sur $+ V_{dc} / 2$ lorsque l'onde sinusoïdale est supérieure aux porteuses en haut, dans ce cas $S1, S2$ sont passants et $S1', S2'$ sont bloqués.
- Le convertisseur est commuté à zéro lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure à la porteuse en haut mais supérieure à la porteuse en bas, dans ce cas $S2, S1'$ sont passants et $S1, S2'$ sont bloqués.
- Le convertisseur passe à $- V_{dc} / 2$ lorsque l'onde sinusoïdale est inférieure aux deux porteuses, dans ce cas $S1', S2'$ sont passants et $S1, S2$ sont bloqués.

Les résultats de simulation sont présentés en association onduleur – machine asynchrone et la commande MLI avec un taux de modulation $r = 0.95$ et deux indices de modulation $m = 10$ et $m = 200$ respectivement. Le couple nominal de charge est égale à 25 N.m.

Pour $m=10$, les résultats obtenus de la topologie modifiée sont illustrés à la figure (5.11).

Les figures (5.11 a et e) représentent respectivement la vitesse et le couple du moteur à induction. Le moteur a été démarré sans charge et à 0, 6 s, une charge de 25 N.m a été appliquée. L'application de charge a entraîné une diminution de la vitesse qui s'est stabilisée à environ 993.2 tr / min et le couple s'est stabilisé à sa valeur nominale, 25 N.m.

Dans les figures (5.11 b et d), le courant de sortie et son spectre FFT sont représentés, ce qui donne un THD d'environ 10,59%, tandis que la tension de sortie composée et son spectre FFT sont représentés sur les Figures (5.11c et h) respectivement, un THD de 47,99% et une amplitude du fondamental 316,2 V ont été obtenus.

Pour $m=200$ et $r=0.95$, les résultats de la topologie modifiée sont illustrés à la Figure (5.16).

Les figures (5.16 a et e) montrent respectivement la vitesse et le couple du moteur à induction. Comme précédemment, nous avons démarré notre moteur sans charge et à 0,6 s, une charge complète a ensuite été appliquée pour visualiser les performances du système. La vitesse est maintenant augmentée à environ 1100 tr / min qui est dû principalement à l'augmentation r de la tension fondamentale de 316,2 V à 338,8 V.

En ce qui concerne le courant de sortie et son spectre FFT montré aux figures (5.16 b et d) respectivement, on a obtenu une valeur de THD d'environ 5,66%. On remarque qu'il y a une diminution de THD par rapport à celui pour $m=10$. Sur les figures (5.16 c et h), la tension de sortie composée et son spectre FFT sont montrés avec un THD de 47,52% et une amplitude du fondamental d'environ 338,8 V.

En récapitulant dans le tableau (5.3) les résultats pour $r=0.95$ et $m=10$ à 200 des THD courant et tension respectivement, on voit clairement qu'une augmentation de l'indice de modulation conduira à une amélioration nette soit du THD courant ou THD de la tension. Mais, dans ce cas, il faut faire très attention aux pertes de commutation avec une fréquence de commutation élevée. En principe, il faut avoir un compromis entre diminution du THD du courant et réduction des oscillations au niveau du couple avec l'augmentation de la fréquence.

5.6. Résultats de l'onduleur modifié lors de la variation de la valeur du condensateur ajouté

Les simulations ont été exécutées pour vérifier les performances de l'onduleur modifié connecté avec une machine asynchrone (en charge de 25 N.m) lors de la variation de la valeur

du condensateur de 1 μF à 7 μF . La simulation a été faite avec un taux de modulation $r=0.95$ et un indice de modulation $m = 200$.

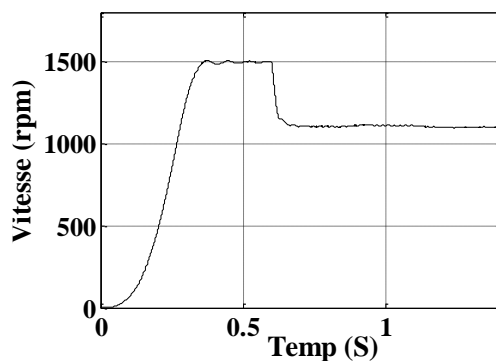
Le tableau (5.4) montre le résultat de l'onduleur modifié lors de la variation de la valeur du condensateur.

Tableau .5.4. Résultat de l'onduleur modifié lors de la variation de la valeur du condensateur.

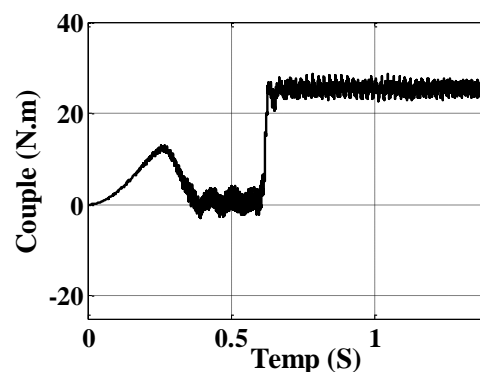
Valeur du condensateur (μF)	THD (%) du courant	THD (%) de la tension composée
C = 1μF	6.01	48.52
C = 3μF	5.66	47.52
C = 5μF	5.94	47.24
C = 7μF	6.28	46.81

D'après les résultats obtenus au tableau (5.4), on remarque que les THD pour la valeur 1 μF sont les plus mauvais. Lorsque la valeur du condensateur augmente de 3 μF à 5 μF , le THD du courant a augmenté d'environ 4,7% et le THD de la tension diminue d'environ 0,6%. Le taux de variation du THD du courant est plus important que celui de la tension. On résume que la valeur de 3 μF donne les meilleures résultats.

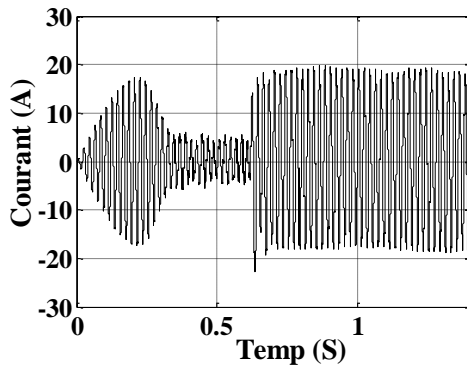
Pour C = 3 μF :



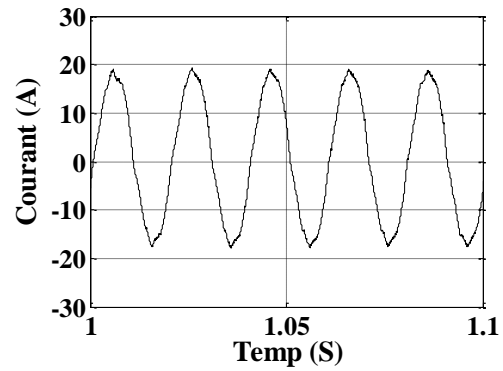
(a) La vitesse du moteur.



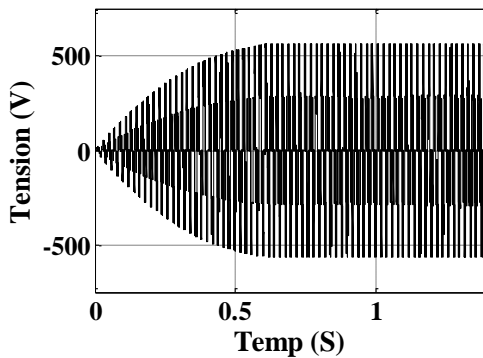
(e) Le couple moteur.



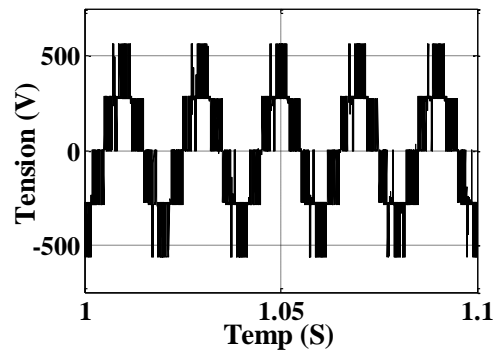
(b) Le courant de sortie



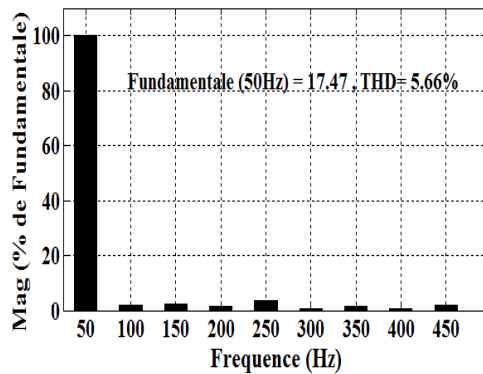
(f) Le zoom du courant de sortie.



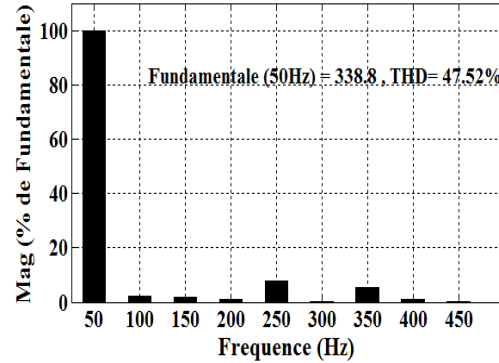
(c) La tension de sortie



(g) Le zoom de la tension de sortie.



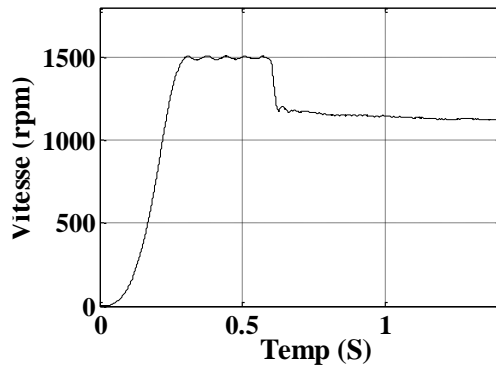
(d) Spectre FFT du courant de sortie.



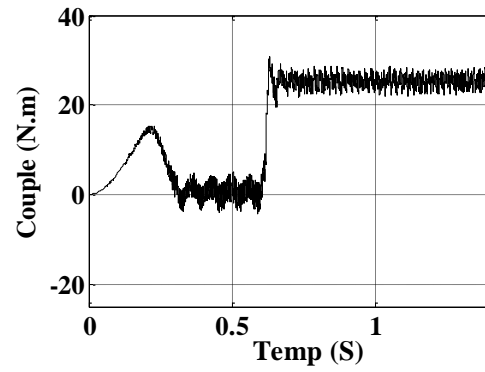
(h) Spectre FFT de la tension de sortie.

Fig.5.17. Les formes des ondes de la topologie modifiée pour $C = 3\mu F$.

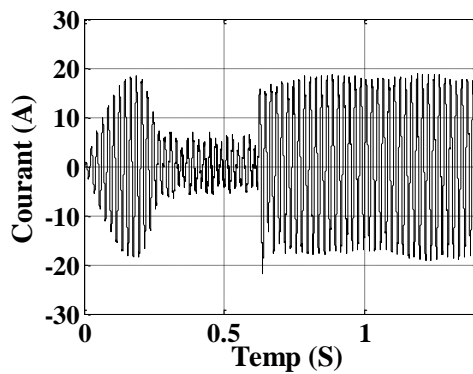
Pour $C = 5\mu\text{F}$:



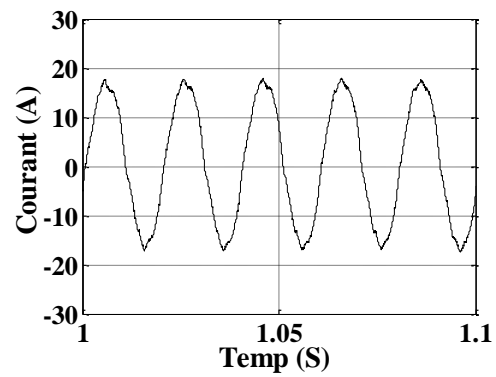
(a) La vitesse du moteur.



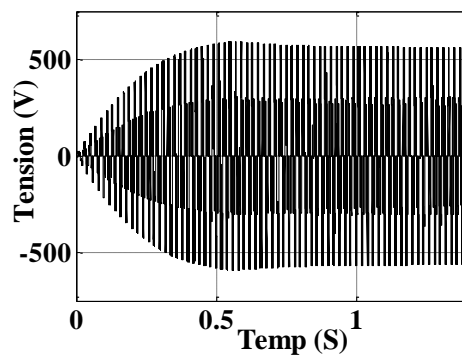
(e) Le couple moteur.



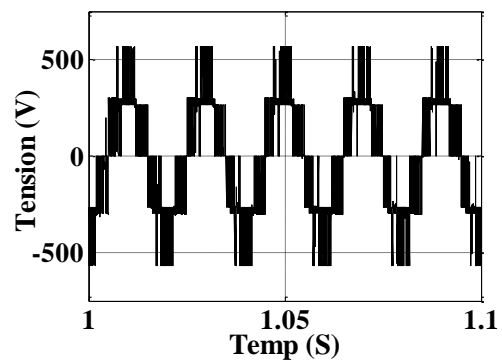
(b) Le courant de sortie.



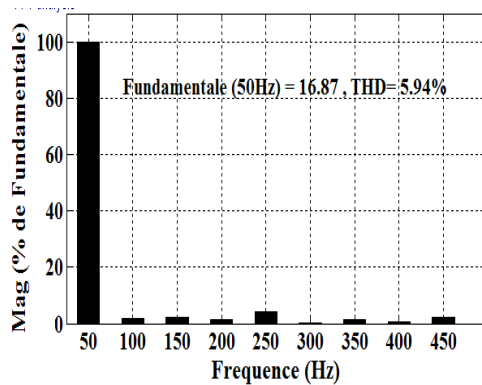
(f) Le zoom du courant de sortie.



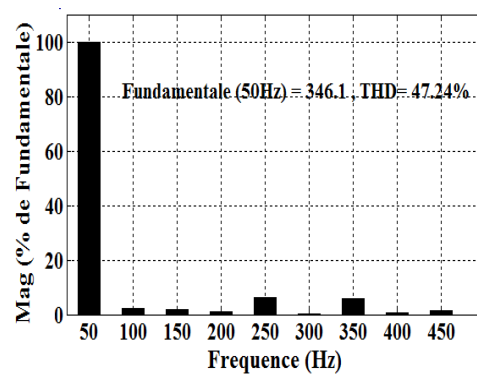
(c) La tension de sortie.



(g) Le zoom de la tension de sortie.



(d) Spectre FFT du courant de sortie.



(h) Spectre FFT de la tension de sortie.

Fig.5.18. Les formes des ondes de la topologie modifiée pour $C = 5\mu F$.

5.7. Comparaison entre onduleur classique et onduleur modifié

On va maintenant comparer les performances de l'onduleur à diode de bouclage avec l'onduleur modifié en choisissant le condensateur de $3\mu F$.

Tableau .5.5. Comparaison entre onduleur classique et onduleur modifié.

	Onduleur à diode de bouclage	Onduleur modifié
THD (%) du courant	6.45	5.66
THD (%) de la tension composée	49.88	47.52
Tension fondamentale (V)	318.5	338.8
La vitesse (tr/min)	988	1100

D'après les résultats obtenus suite au tableau (5.5), l'onduleur modifié montre clairement de meilleures performances que l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage (NPC) en termes du THD courant et THD tension. En outre, l'onduleur modifié proposé génère moins de contenu harmonique ce qui conduira à des signaux de sortie meilleurs.

5.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons modifié l'onduleur à diode de bouclage (NPC) par l'insertion d'un condensateur au niveau de chaque phase afin d'obtenir les meilleures performances en terme de THD donc une bonne qualité d'énergie sans la nécessité d'augmenter le nombre de niveaux de l'onduleur.

Conclusion

générale

Conclusion générale

De nombreuses structures multi-niveaux ont été créées grâce à l'évolution de l'électronique de puissance. Depuis, de nombreuses structures sont apparues ayant des propriétés assez intéressantes, comme la topologie à diode de bouclage qui joue un rôle important sur la réduction du taux de distorsion harmonique.

D'après les résultats de simulations obtenues, nous avons remarqué que l'analyse harmonique du courant et de la tension montrent une meilleure qualité spectrale pour le cas de l'onduleur sept niveaux par rapport aux onduleurs trois et cinq niveaux respectivement. De manière générale, plus le nombre de niveaux de la tension générée par le convertisseur est grand, plus faible sera son taux de distorsion harmonique. En contrepartie, la complexité de sa commande et son coût deviennent importants.

Dans cette thèse, nous avons modifié l'onduleur trois niveaux à diode de bouclage pour améliorer sa qualité d'énergie et réduire son taux d'harmonique sans la nécessité à augmenter le nombre de niveaux de l'onduleur plus de trois.

D'après les résultats obtenus en effectuant plusieurs essais de simulation à l'aide Matlab/Sim power de notre system, l'onduleur modifié a clairement montré de meilleures performances que l'onduleur trois niveaux conventionnel à diode de bouclage en termes du THD du courant ainsi que le THD de la tension composée. La forme d'onde de sortie s'approche de l'onde sinusoïdale, ce qui permet d'améliorer la qualité de la puissance sans la nécessité d'augmenter le nombre de niveaux de l'onduleur.

On a exposé dans le premier chapitre les différentes topologies de convertisseurs multi-niveaux en énumérant les avantages et les inconvénients de chacune d'elle et aussi une comparaison des topologies multi-niveaux en termes de nombre des composants et des sources de tension continue.

Le module PV a été abordé dans le deuxième chapitre, en commençant par un aperçu historique de l'énergie photovoltaïque ainsi que le principe de la conversion photovoltaïque et les différents types des cellules photovoltaïques. La seconde partie du chapitre est consacrée à la modélisation d'une cellule photovoltaïque et les avantages et inconvénients du système photovoltaïque en général.

Le convertisseur élévateur (boost), son fonctionnement et la technique de commande retenue en vue de poursuivre le point de puissance maximale du GPV sont abordés au troisième chapitre. Le choix de la technique MPPT est fait suite à une analyse comparative des différentes techniques MPPT les plus populaires telles que : perturber et observer (P&O), incrément de la conductance et contrôle à base de la logique floue. D'après les résultats de simulation obtenus, on montre que le contrôleur à logique floue conduit à des meilleures performances avec l'absence des oscillations en régime permanent et un temps de réponse plus rapide. Ainsi, la méthode de la logique floue a été choisie pour être utilisée avec le système PV afin d'extraire la puissance maximale (MPPT).

Dans le quatrième chapitre nous avons appliqué la stratégie MLI sinusoïdale pour les onduleurs à trois niveaux, à cinq et sept niveaux à structure à diode de bouclage. D'après les résultats de simulations obtenus, nous avons remarqué que l'analyse harmonique du courant et de la tension montre une meilleure qualité spectrale pour le cas de l'onduleur sept niveaux par rapport aux onduleurs trois et cinq niveaux.

Le cinquième chapitre décrit la simulation de l'onduleur modifié avec la stratégie de la commande MLI sinus-triangle. Justifiant le choix de modification en visant les meilleures performances sans augmenter le nombre de niveaux de l'onduleur. L'onduleur modifié a été simulé et évalué.

Comme perspective, nous pouvons proposer la continuité du travail effectué avec l'introduction d'autres MLI plus performantes.

Bibliographie

Bibliographie

1. El-Fergany. A, 'Efficient tool to characterize photovoltaic generating systems using mine blast algorithm'. *Electric Power Components and Systems*, 43(8-10), 890-901. 2015.
2. Abouda. S, Nollet. F, Chaari. A, Essounbouli. N, and Koubaa. Y, 'Direct torque control - DTC of induction motor used for piloting a centrifugal pump supplied by a photovoltaic generator'. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, Vol:7, No:8 . 2013.
3. Abdourrziq. M, Ouassaid. M, and Maaroufi. M, 'Single-sensor based mppt for photovoltaic systems'. *International Journal of Renewable Energy Research*, 6(2), 570-579 .2016.
4. Sridhar. S, Raj. P. G, Ramaprabha. R, and Muthu. R, 'Microcontroller based maximum power point tracking control for PV fed space vector controlled three phase induction motor'. In *Tencon IEEE Region 10 Conference* (pp. 1-4). 2008
5. Lee. J. S, Lee. S. J, and Lee. K. B, ' Novel switching method for single-phase NPC three-level inverter with neutral-point voltage control'. *International Journal of Electronics*, 105(2), 303-323. 2018.
6. Sruthi. C. K, and Saritha. P, 'A novel multilevel inverter using single carrier PWM technique'. In *Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT), International Conference on* (pp. 468-472). 2014.
7. Kim. S. H, and Kim. Y. H, 'Design and analysis of an LC trap/LCR output filter for a single-phase NPC three-level inverter'. *International Journal of Electronics*, 95(12), 1279-1292. 2008.
8. Bakhshizadeh. M. K, Iman-Eini. H, and Blaabjerg. F, 'Selective harmonic elimination in asymmetric cascaded multilevel inverters using a new low-frequency strategy for photovoltaic applications'. *Electric Power Components and Systems*, 43(8-10), 964-969. 2015.
9. Albert .A. S, and Manigandan. T, 'Digital control strategy for solar photovoltaic fed inverter to improve power quality'. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 6(1), 013128. 2014.

10. Karima. B, 'Approche Mathématique pour la Modulation de Largeur d'Impulsion pour la conversion statique de l'énergie électrique : Application aux onduleurs multi-niveaux'.Thèse de doctorat, L'université de Toulouse.2016.
11. Alexandre. L, 'Etude, Commande et Mise en œuvre de Nouvelles Structures Multi-niveaux' .Thèse de doctorat, L'université de Toulouse.2011.
12. Bindeshwar. S, Nupur .M, Verma. K.S, Deependra. S, Singh. S.P, Rahul. D, Manvendra .S, and Aanchal .B, 'Multi-level inverter: a literature survey on topologies and control strategies'. International Journal of Reviews in Computing. Vol. 10. 2012.
13. Mishra. R, and Mishra; G, 'Simulation model of a three phase multilevel inverter for a grid connected photovoltaic system'. Intl J Engg Sci Adv Research .1(1):106-112. 2015.
14. Chutake. M. S, and Shelar. M. A, 'Multilevel Inverter's: A Survey of Structures'.3rd International Conference on Research Trends in Engineering, Applied Science and Management (ICRTESM).2017.
15. Chebbah .M. T,' Etude et simulation d'un convertisseur multi-niveaux type puc'. Thèse de doctorat, L'université de Montréal.2014.
16. Nami. A, and Firuz .Z, 'Multilevel converters in renewable energy systems'. Renewable energy. InTech, 2009.
17. Martin .C .W, 'Etude Prospective de la Topologie MMC et du packaging 3D pour la réalisation d'un variateur de vitesse en moyenne tension'. Thèse de doctorat, L'université de Grenoble.2015.
18. Ben Abdelghani. H, ' Etude, conception et réalisation d'un convertisseur statique hybride multi-niveaux tolérant aux défauts'. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse .2016.
19. Tehrani. K. A, 'Conception, synthèse et application d'une nouvelle commande robuste par PID fractionnaire pour les onduleurs multi-niveaux'. Thèse de doctorat, L'université de Lorraine.2010.
20. Rodriguez. J, Franquelo. L. G, Kouro, S, Leon. J. I, Portillo. R. C, Prats. M. A, and Perez, M. A, 'Multilevel converters: An enabling technology for high-power applications'. Proceedings of the IEEE, vol. 97, no 11, p. 1786-1817. 2009.

21. Lai. J. S, and Peng.F.Z, 'Multilevel converters-a new breed of power converters'. Industry Applications Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS'95. Conference Record of the IEEE. Vol. 3. 1995.
22. Panagis. P, Stergiopoulos. F, Marabeas. P, and Manias. S, 'Comparison of state of the art multilevel inverters'. IEEE Power Electronics Specialists Conference (pp. 4296-4301). 2008.
23. Sepra .L. A, 'Current Control and Strategies for and Multilevel Grid and Connected', Rapport de thèse de doctorat, N° d'ordre : 1746, FIT Zurich.2007.
24. Mariéthoz. J. S, 'Étude formelle pour la synthèse de convertisseur multi-niveaux asymétrique : Topologies, modulation et commande'. Thèse de doctorat N° d'ordre : 3188, EPFL de Lausanne.2005.
25. Kouro. S, Malinowski. M, Gopakumar. K, Pou. J, Franquelo. L. G, Wu. B, and Leon. J. I, 'Recent advances and industrial applications of multilevel converters', IEEE Transactions on industrial electronics 57.8. 2553-2580.2010.
26. Rodriguez. J, Lai. J. S, and Peng. F.Z, 'Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications'. IEEE Transactions on industrial electronics 49.4. 724-738.2002.
27. Tolbert. L. M, Peng. F. Z., and Habetler. T. G, 'Multilevel inverters for electric vehicle applications'. Power Electronics in Transportation, IEEE, (pp. 79-84). 1998.
28. Manguelle. J. S, 'Convertisseur multi-niveaux asymétrique alimentés par transformateurs multi-secondaires basse fréquence'. Thèse de doctorat N° d'ordre : 3033, EPFL Lausanne. 2004.
29. Luque. A, and Hegedus. S, ' Handbook of Photovoltaic Science and Engineering'. ISBN 0-471-49196-9. 2003.
30. Mekemeche. A, 'Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes'. Thèse de doctorat, L'université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem.2017.
31. Messenger .R. A, and Abtahi. A, 'Photovoltaic Systems Engineering'. Second edition, this edition published in the Taylor & Francis e-Library. 2010.

32. Paulescu. M, Paulescu. E, Gravila. P, and Badescu. V, 'Weather modeling and forecasting of PV systems operation'. Springer Science and Business Media. 2012.
33. Fraas. L.M. 'Low- cost solar electric power' .Springer international publishing Switzerland. 2014.
34. Réaux. D, 'Cellules photovoltaïques à hétérojonctions de silicium (a-SiH/c-Si) : modélisation des défauts et de la recombinaison à l'interface'. Thèse de doctorat, L'université paris-sud .2017.
35. Zegrar. M, ' Optimisation de l'association GPV- onduleur multi-niveau'.Thèse de doctorat, L'université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf .2017.
36. Pastor. A. C, 'Conception et réalisation de modules photovoltaïques'. Thèse de doctorat, L'institut National des Sciences Appliquées de Toulouse. 2006.
37. Mahfoud. A, 'Modélisation des cellules solaires tandem à couches minces et à haut rendement'. Thèse de doctorat, L'université de Sétif 1.2015.
38. Camara. M. A, 'Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs'. Thèse de doctorat, L'université Paris Est Créteil.2011.
39. Meekhun. D, 'Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique'. Thèse de doctorat, L'université de Toulouse.2010.
40. Şahin. M. E, and Okumuş. H. İ, 'Physical structure, electrical design, mathematical modeling and simulation of solar cells and modules'. Turkish Journal of Electro-mechanics and Energy 1.1 .2016.
41. Ibrahim Elmi. O, 'Nouvelles structures de cellules solaires à base de silicium : Texturation, passivation et association de réseaux de nanostructures métalliques avec une couche Down-Conversion'. Thèse de doctorat, L'université de Lille 1.2017.
42. Bagher. A. M, Vahid. M.A and Mohsen. M, 'Types of solar cells and application'. American Journal of optics and Photonics 3.5: 94-113.2015.
43. Bellia. H, Youcef .R, and Fatima. M, 'A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB'.NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics 3.1: 53-61.2014.

44. Celik. A.N, and Acikgoz. N, 'Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four and five parameter models'. *Applied energy* 84.1: 1-15.2007.
45. Manuel G .R, Godina. R, Marzband. M, and Pouresmaeil. E, 'Simulation and Comparison of Mathematical Models of PV Cells with Growing Levels of Complexity'. *Energies* 11.11: 2902.2018.
46. Brahimi imen .S, 'Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires'. Thèse de doctorat, L'université Djilali liabes de Sidi-Bel-Abbès. 2018.
47. Arrouf. M, 'Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque'. Thèse de doctorat, L'université Mentouri de Constantine .2007.
48. Jimmy .R, Thomas. D, Eric .S ,et Bocar .S.S, 'Le pompage photovoltaïque'. IEPF, L'université d'Ottawa, EIER, CREPA, ISBN 2-89481-006-7.1998.
49. Djarallah M, ' Contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique'. Thèse de doctorat, L'université de Batna .2008.
50. Belakehal. S,' Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables'. Thèse de doctorat, L'université de Constantine. 2010.
51. Salas. V, Olias. E, Barrado. A, and Lazaro. A, 'Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems '.*Solar energy materials and solar cells* 90.11: 1555-1578. 2006.
52. Ayache. Z, Bendaoud. A, Slimani. H, Benazza. B, Miloudi. H, and Bentaallah. A, 'Commande MPPT et contrôle d'un système photovoltaïque par la logique floue'. *International Conference on Electrical Networks (ICEN)*, Sidi Bel-Abbès. 2010.
53. Belhachat. F, Larbes. C, Barazane. L, and Kharzi. S, 'Commande neuro-floue d'un hacheur MPPT'. 4^{ème} Conférence Internationale, Computer Integrated Manufacturing, CIP. Vol. 7, pp. 03-04. 2007.
54. Alsumiri. M. A, Jiang. L, and Tang. W. H , 'Maximum power point tracking controller for photovoltaic system using sliding mode control'. 7-3.2014.

55. Singh. S, Mathew. L, and Shimi. S. L, 'Design and simulation of intelligent control MPPT technique for PV module using MATLAB/SIMSCAPE'. Int. J. Adv. Res. Electr. Electron. Instrum. Eng 2: 4554-4566.2013.
56. Correvon .M, 'Systèmes électroniques'. Haute école spécialisée de Suisse Occidentale.
57. Séguier. G, Francis. L, and Philippe. D, 'Electronique de puissance'. Edition DUNOD.1999.
58. Masri. S, and Chan. P.W, 'Design and development of a dc-dc Boost converter with constant output voltage'. In Intelligent and Advanced Systems (ICIAS), International Conference on (pp. 1-4). IEEE.2010.
59. Sudhakar. N, Rajasekar. N, Akhil. S, and Reddy. K.J, 'Chaos control in solar fed DC-DC boost converter by optimal parameters using nelder-mead algorithm powered enhanced BFOA'. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 263. No. 5. IOP Publishing, 2017.
60. Abbes. H, Abid. H, Loukil. K, Toumi. A, and Abid. M, 'Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque'. Revue des Energies Renouvelables 17.3: 435-445.2014.
61. Tumma, A, and Balasubramanian. V.G , 'Study on using maximum power point algorithms to improve the efficiency of solar energy storage for unmanned aerial vehicles'. International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication 1.8 2: 49-54.2013.
62. Cabal. C,' Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque'. Thèse, université de Toulouse 3-Paul Sabatier. 2008.
63. Faranda. R, and Leva. S, 'Energy comparison of MPPT techniques for PV Systems', WSEAS transactions on power systems 3.6: 446-455.2008.
64. Ngan. M. S, and Tan. C. W, 'A study of maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems'.IEEE Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC) (pp. 22-27). 2011.
65. Hatti. M, 'Contrôleur Flou pour la poursuite du point de puissance maximum d'un système photovoltaïque', JCGE'08 LYON 16 .2008.

66. Aouchiche. N, Cheikh. M. A, and Malek. A, 'Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation '.Revue des Energies Renouvelables 16.3: 485-498.2013.
67. Makhloufi. M. T, Khireddine. M. S, Abdessemed. Y, and Boutarfa. A , 'Maximum Power Point Tracking of a Photovoltaic System using a Fuzzy Logic Controller on DC/DC Boost Converter', International Journal of Computer Science Issues (IJCSI) 11.3: 1.2014.
68. Mekhloufi .M, Dris. K, and Salem. A, 'Optimisation de la production d'un GPV par différent techniques MPPT'.L' université Ammar Teliji Laghouat .2009.
69. Bdourraziq. M. A, Maaroufi. M, and Ouassaid. M, 'A new variable step size INC MPPT method for PV systems'.International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS) (pp. 1563-1568). IEEE .2014.
70. Esum. T, and Chapman. P. L, 'Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques'.IEEE Transactions on energy conversion 22.2: 439-449. 2007.
71. Farid. B, Saida. B, and Tarek. A, 'Optimisation of a GPV by an artificial intelligence technical'. International Journal of Renewable Energy Research (IJRER) 2.4:730-735.2012.
72. Cherchali. N. O, Morsli. A, Boucherit. M. S, Barazane. L, and Tlemçani. A, 'Application de la logique floue pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque'. 2014.
73. Abderezak. L, Aissa. B, and Hamza. S, 'Comparative study of three MPPT algorithms for a photovoltaic system control'. Information Technology and Computer Applications Congress (WCITCA), World Congress on. IEEE. 2015.
74. Sagar .U. S, Vadira .J, 'Performance comparison of three phase five level and seven level dcml', International journal of advanced research in electrical and electronics engineering, volume: 2 issue: 2 08-, ISSN_no: 2321-4775.2014.
75. Sahu. V, and Kaushik. S, 'A new five-level diode clamp multilevel inverter topology'.Int. J. Creat. Res. Thoughts1.4: 2-5.2013.
76. Serpa. L. A, ' Current control strategies for multilevel grid connected inverters'. Thesis report, University of ETH Zurich, 2007.

77. Rathore. S, Kirar. M. K, and Bhardwaj. S. K, 'Simulation of cascaded h-bridge multilevel inverter using pd pod apod Techniques'. Electrical & Computer Engineering: An International Journal (ECIJ) 4.3: 27-41.2015.
78. Prafulla j. K, Vandana .D, Shital .B, 'Modeling & simulation of five level diode clamped inverter for reduction of common mode voltage in induction motor drive'. International journal of engineering research & technology (IJERT), 2278-0181.2015.
79. Kelaiaia .M .S, 'Amélioration de la qualité de l'énergie délivrée par un onduleur multi niveaux alimentant une machine asynchrone a cage'. Thèse doctorat, L'université de Badji Mokhtar-Annaba. 2007.
80. Bhuvaneswari. G, and Nagaraju, 'Multi-level inverters a comparative Study', IETE journal of research 51.2: 141-153.2005.
81. Talha. T, 'Etude de différentes cascades de l'onduleur a sept niveaux a structure npc. application a la conduite d'une machine synchrone a aimants permanents'. Ecole nationale polytechnique_ El-Harrach. 2004.
82. Preethi. K, Anil. G, and Vani. E, 'Speed control of induction motor using eleven levels multilevel inverter'. International Journal of Science and Modern Engineering (IJISME) ISSN: 2319-6386, Volume-1, Issue-5. 2013.
83. Benaouda .O. F, 'La contribution du contrôle direct de couple d'un mas alimentée par des onduleurs multi-niveaux en appliquant l'intelligence artificielle (logique floue-réseau de neurone)'.Thèse doctorat, L'université d'Oran Mohamed Boudiaf. 2017.
84. Miloudi. A, 'Etude et conception de régulateurs robustes dans différentes stratégies de commandes d'un moteur asynchrone'.Thèse doctorat, L'université d'Oran Mohamed Boudiaf. 2006.
85. Benzazah. C, Lafkih. M. A, et Lazrak. L, 'Etude comparative entre deux topologies d'onduleurs triphasés, classique à 2-niveaux et NPC à 3-niveaux avec deux différentes méthodes de commande MLI-ST et SWM', International Journal of Innovation and Applied Studies 9.2: 841-852. 2014.
86. Radan. A, Shahirinia. A. H, and Falahi. M, 'Evaluation of carrier-based PWM methods for multi-level inverters'. International Symposium on Industrial Electronics (pp. 389-394). IEEE.2007.