

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أكلي محمد أولحاج
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence :/MM/2021

المرجع:/م/م / 2021

Mémoire de Master

Présenté au

Département : Génie Électrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electronique

Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Réalisé par :

Khettab mohammed amine

Et

ENNEHATI AZEDDINE

Thème

**Approches hybride pour la commande d'un
convertisseur dans système photovoltaïque**

Soutenu le: 06/11/2021

Devant la commission composée de :

Mr :	MOUDACHE SAID	M.A.A	Univ. Bouira	Président
	SAOUDI KAMEL	M.C.A	Univ. Bouira	Rapporteur
	DJIBIRI MUSTAPHA	M.A.A	Univ. Bouira	Examineur

Année Universitaire: 2020-2021

Dédicaces 1

À l'aide de *DIEU*, le tout puissant, ce travail est achevé ;

Je le dédie à toutes les personnes qui me sont chères ; mes très chers parents pour leurs sacrifices, soutien et amour. Je leurs serai éternellement reconnaissant.

À *ma mère*, la perle la plus chère qui m'a entouré avec sa tendresse et qui n'a cessé de prier pour moi.

À mon *cher père*, la base de toute ma carrière qui m'a appris quela patience est le secret du succès.

À mes chers et précieux frères

À ma précieuse sœur

Mes frères, ma sœur merci pour votre générosité, votre affection, votre soutien moral et financier et pour tout le sacrifice que vous donnez pour moi.

À mon cher qui m'a accepté de lui rejoindre dans ce travail :

aaaaaa

À tous mes amis

À tous mes camarades de Electronique des systèmes embarqués

À tous qui me connaissent de loin ou de près

AZEDDINE

Dédicaces 2

À l'aide de *DIEU*, le tout puissant, ce travail est achevé ;
Je le dédie à toutes les personnes qui me sont chères ; mes très chers
parents pour leurs sacrifices, soutien et amour. Je leurs serai
éternellement reconnaissant.

À *ma mère*, la perle la plus chère qui m'a entouré avec sa
tendresse et qui n'a cessé de prier pour moi.

À mon *cher père*, la base de toute ma carrière qui m'a appris que
la patience est le secret du succès.

À mes chers et précieux frères

À ma précieuse sœur

Mes frères, ma sœur merci pour votre générosité, votre affection,
votre soutien moral et financier et pour tout le sacrifice que vous
donnez pour moi.

À mon cher qui m'a accepté de lui rejoindre dans ce travail :

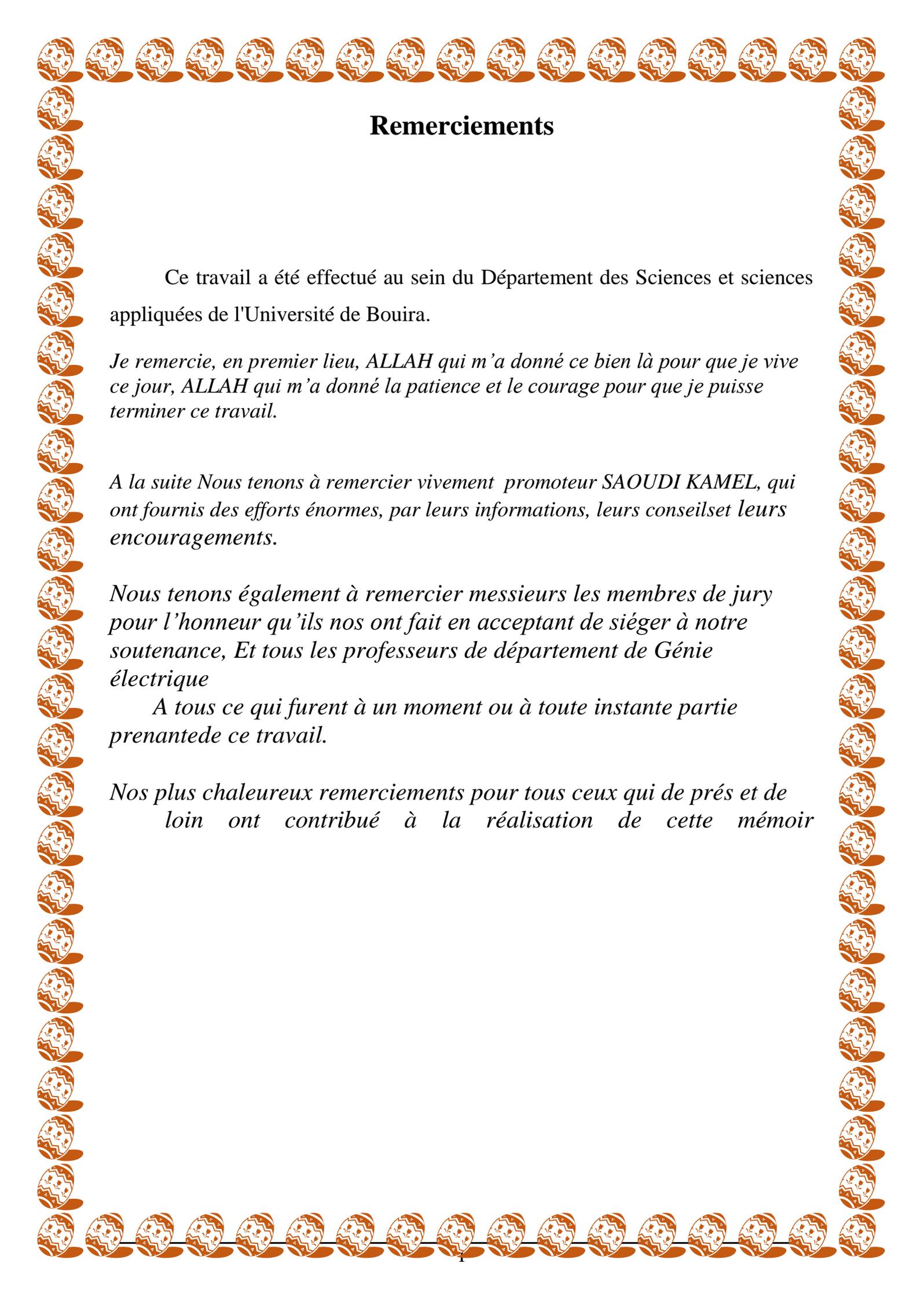
aaaaaa

À tous mes amis

À tous mes camarades de *Electronique des systèmes embarqués*

À tous qui me connaissent de loin ou de près

MOHAMED



Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du Département des Sciences et sciences appliquées de l'Université de Bouira.

Je remercie, en premier lieu, ALLAH qui m'a donné ce bien là pour que je vive ce jour, ALLAH qui m'a donné la patience et le courage pour que je puisse terminer ce travail.

A la suite Nous tenons à remercier vivement promoteur SAOUDI KAMEL, qui ont fournis des efforts énormes, par leurs informations, leurs conseilset leurs encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nos ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance, Et tous les professeurs de département de Génie électrique

A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenantede ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de prés et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoir

Table des Matières

Remerciements	I
Table des Matières	II
Liste des Figures	IV
Liste des Tableaux	VI
Listes des Acronymes et Symboles	VII
Introduction Générale	1
Chapitre I : Etat de l'art – L'énergie électrique photovoltaïque.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. La production d'électricité d'origine renouvelable.....	4
I.3. Les énergies renouvelables, une priorité en Algérie	6
I.3.1. Potentiel solaire en Algérie.....	8
I.4. Effet photovoltaïque.....	10
I.5. Systèmes photovoltaïques autonomes	11
I.5.1. Les différentes composantes.....	12
I.6.Systèmes PV connecté au réseau.....	12
I.7.Conclusion.....	14
Chapitre II : Développement d'une commande d'onduleur PV basée sur le mode glissant	15
II.1. Introduction.....	16
II.2.1.1.Modélisation de la cellule PV.....	16
II.3 .la commande par Mode Glissant.....	17
II.3.1. Principe	18
II.3.3. Choix de la surface de glissement	20
II.3.4. Condition d'existence du glissement.....	20
II.3.5. Méthode de la commande équivalente	20
II.4. Domaine d'application du réglage par mode glissant	23
II.5. Les avantages de la commande par mode glissant	24
II.6. Application de la commande par mode de glissement au convertisseur DC-AC	24

II.7. Conclusion:	28
Chapitre III : Résultat et simulation	29
III.1. Introduction.....	30
III.2.La simulation sur MATLAB :.....	30
III.2.1. Le modèle PV avec convertisseur DC-DC :.....	31
III.2.2. La charge non linéaire :.....	31
III.2.3.la commande de mode glissant :	32
III.3. Analyse et simulation :	33
III.4. Conclusion:	45
Conclusion Générale.....	46
Références bibliographiques.....	48
Rèsumè	Erreur ! Signet non défini.

Liste des Figures

Figure I.1. Structure de la production d'électricité dans le monde -2012	05
Figure I.2. Structure de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde en2012.....	05
Figure I.3. Structure du parc de la production nationale en MW [4].....	07
Figure I.4. Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh.....	08
Figure I.5. Potentiel solaire en Algérie.....	09
Figure I.6. Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie.....	09
Figure I.7. Zones climatiques de l'Algérie.....	10
Figure I.8: Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque	11
Figure I.9. Systèmes photovoltaïques autonomes.....	12
Figure I.10. Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.....	13
Figure I.11. Schéma de la commande entre l'onduleur et le réseau	14
Figure II.1. Schéma équivalent de cellule PV	17
Figure II.2. surface de mode glissant.....	18
Figure II.3. Commande équivalente comme valeur moyenne de commutation entre u^- et u^+	21
Figure II.4 .Représentation de la fonction signe.....	23
Figure II.5. Modèle d'onduleur DC-AC.....	25
Figure (III.1): Schéma fonctionnel d'onduleur sur Simulink.....	31
Figure (III.2): Schéma fonctionnel de model PV array avec convertisseur DC-DC sur Simulink.....	31
Figure (III.3): la charge non linéaire.....	32
Figure (III.4): simulation de la commande mode gisant.....	32
Figure (III.5): Résultats de simulation présenter la tension source (V abcrf source)	33
Figure (III.6): Résultats de simulation présenter la tension source (V abc source)	33
Figure (III.7): Résultat de Signal de commande c_1	34
Figure (III.8): Résultat de Signal de commande c_4	34
Figure (III.9): Résultat de l'erreur dans première phase $u_{ac1}-u_{acr1}$	35
Figure (III.10): Résultat de l'erreur dans deuxième phase $u_{ac2}-u_{acr2}$	35
Figure (III.11): Résultat de l'erreur dans troisième phase $u_{ac3}-u_{acr3}$	36
Figures (III.12): Les allures de signal de commande par mode glissant dans les trois phase.....	36
Figures (III.13): les allures de signal de commande exécutable par mode glissant dans les trois phases.....	37
Figure (III.14): Résultats de simulation présenter la tension source (V abc source)	37
Figure (III.15): Résultat de Signal de commande c_1	38
Figure (III.16): Résultat de Signal de commande c_4	38
Figure (III.17): Résultat de l'erreur dans première phase $u_{ac1}-u_{acr1}$	39

Figure(III.18): Résultat de l'erreur dans deuxième phase $u_{ac2}-u_{acr2}$	39
Figure(III.19): Résultat de l'erreur dans troisième phase $u_{ac3}-u_{acr3}$	40
Figures (III.20): Les allures de signal de commande par mode glissant dans les trois phases.....	40
Figures (III.21): les allures de signal de commande exécutable par mode glissant dans les trois phases.....	41
Figure (III.22): Résultats de simulation présenter la tension source (V abc source)	41
Figure(III.23): Résultat de Signal de commande c_1	42
Figure(III.24): Résultat de Signal de commande c_4	42
Figure (III.25): Résultat de l'erreur dans première phase $u_{ac1}-u_{acr1}$	43
Figure(III.26): Résultat de l'erreur dans deuxième phase $u_{ac2}-u_{acr2}$	43
Figure(III.27): Résultat de l'erreur dans troisième phase $u_{ac3}-u_{acr3}$	44
Figures(III.28): Les allures de signal de commande par mode glissant dans les trois phases.....	44
Figures(III.29): les allures de signal de commande exécutable par mode glissant dans les trois phases.....	45

Liste des Tableaux

Tableau I.1. La production d'énergie solaire en TWh pour l'année 2012 dans les principaux pays producteurs d'électricité.....	05+06
Tableau I.2. Les centrales d'électricité à partir d'énergies renouvelables en Algérie 2015-2016.....	07
Tableau I.3. Potentiel solaire en Algérie.....	09

Listes des Acronymes et Symboles

• Acronymes

DC-AC	Conversion continu/alternatif
DC-DC	Conversion continu/continu
GPV	Générateurs photovoltaïques
MLI	Modulation de largeurs d'impulsions
PPM	Point de puissance maximale
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Perturbation et observation
PV	Photovoltaïque
SMC	Sliding Mode Control
SSV	Système à structure variable
I-V	Courant-tension
P-V	Puissance-tension

• Symboles

I	Le courant fourni par la cellule	A
I_{ph}	Le photo-courant	A
I_d	Le courant traversant la diode	A
I_p	Le courant dérivé par la résistance parallèle	A
I_0	Le courant de saturation inverse d'une diode	A
V_T	La tension thermique	
e	charge d'électron (1.602×10^{-19} C)	C
K	constante de Boltzmann (1.381×10^{-23} J/K)	
n	Facteur de non idéalité de la jonction	
T	La température ambiante effective de la cellule en kelvin	K
i_c	Le courant dans le condensateur	A
V_{DC}	La tension du bus continu	V
C	La valeur de la capacité	F
i_{pv}	le courant de sortie du panneau photovoltaïque	V
$i_{rés}$	Le courant modulé par le convertisseur côté réseau	A

Introduction Générale

Les besoins énergétique mondiaux en accroissement constant, le caractère polluant et l'épuisement à terme des énergies fossiles, ont poussé l'humanité à explorer de nouvelles technologies pour la production d'énergie électrique à l'aide de sources propres et renouvelables, comme l'énergie solaire.

L'objectif de ce travail s'inscrit dans le but de étudiée une technique de commande non linéaire appelée : la commande par mode de glissement qui permet de commander les systèmes à structures variable. Nous avons choisi de l'appliquer dans notre cas à un convertisseur DC-AC.

Ce mémoire comportera par la suite : une introduction générale et trois chapitre, une conclusion générale, et on terminera par une bibliographie.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres, organisés comme suit:

Dans le première chapitre : Au début, nous allons parlons généralement sur l'état de l'art - L'énergie électrique photovoltaïque (Production d'électricité dans le monde, Les énergies renouvelables, une priorité en Algérie, Systèmes photovoltaïques autonomes , Systèmes PV connecté au réseau), nous avons présenté le potentiel solaire en Algérie et l'importance du programme ambitieux des énergies renouvelables pour couvrir une partie de la demande nationale en électricité.

Le deuxième chapitre : présente les concepts de base de la commande par mode glissant qui se synthétise en deux étapes : on détermine une sortie fictive $S(x)$ appelée surface de glissement sur laquelle les objectifs des contrôles sont réalisés, après on calcule la loi de commande afin de ramener la trajectoire des états à cette sortie et de la maintenir sur cette surface tout le temps jusqu'à l'équilibre.

Le troisième chapitre : présent Les résultats de simulation du convertisseur DC-AC dans un system PV par Matlab/Simulink, et le schéma avec Les résultats de la commande par mode glissant d'un convertisseur DC-AC, **où nous allons varier** la puissance de l'éclairement solaire qui exprimée en (W/m²), ensuite donnée quelques commentaires sur ces résultats.

Nous terminerons par une conclusion générale ou nous citerons les points important que nous avons tirés de ce modeste travail .

Chapitre I :

Etat de l'art –

L'énergie électrique

photovoltaïque

I.1. Introduction

La production d'énergie électrique est faite principalement à partir d'énergies fossiles et de combustible d'origine nucléaire. La consommation excessive de ces énergies durant le 20^{ème} siècle due à croissance de la demande mondiale en énergie, a conduit à une pollution aggravée de l'atmosphère. Etant donné que cette forme d'énergie recouvre la plus grande partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de rechercher d'autres solutions pour prendre la relève. La contrainte est donc d'avoir une source d'énergie économique, durable et peu polluante, car la protection de l'environnement est devenue aussi un point très important. Beaucoup de recherches ont été menées dans le domaine des énergies renouvelables, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation d'énergie solaire. [01]

Ce chapitre commence par présenter brièvement quelques statistiques sur la production et la croissance mondiale de l'énergie électrique ainsi que la croissance des différentes installations des centrales photovoltaïques qu'elles soient raccordées aux réseaux ou sur sites isolés. Ensuite, Nous nous sommes concentrés sur la production d'électricité à partir de l'énergie solaire qui constitue le sujet de nos recherches. Nous détaillons aussi les étapes importantes d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables en Algérie. A la fin du chapitre, nous présentons les différents types des systèmes photovoltaïques : autonome, connecté au réseau et les suiveurs solaires.

I.2. La production d'électricité d'origine renouvelable

La production d'électricité renouvelable a atteint 20,8% de la production d'électricité mondiale en 2012 (4699,2 TWh). Les combustibles fossiles restent les plus utilisés pour la production de l'électricité mondiale (68,1%) comme le montre la [figure I.1](#).

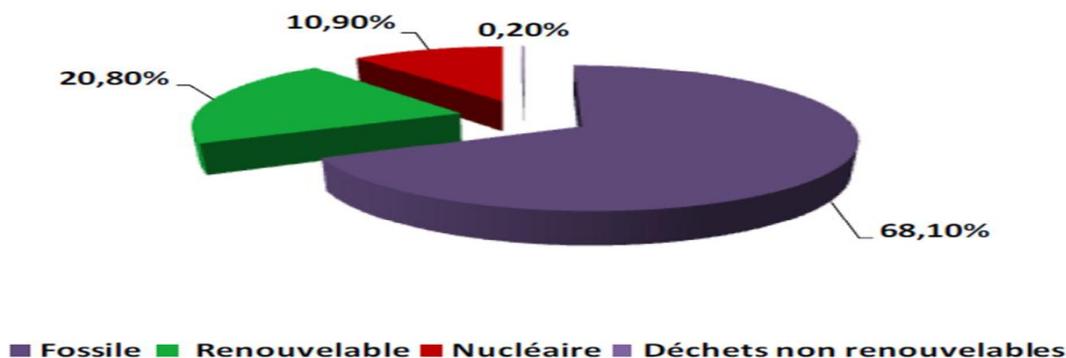


Figure (I.1): Structure de la production d'électricité dans le monde -2012[02]

Au niveau mondial, l'électricité renouvelable provient de six sources distinctes : l'hydroélectricité (centrale de pompage –turbinage) qui contribuent de 78% en 2012, l'énergie éolienne (11,4%), la biomasse (6,9%), le solaire (2,2%) qui regroupe les centrales photovoltaïques et les centrales solaires thermiques, la géothermie (1,5%) et les énergies marines (0,01%), (Voir figure I.2)

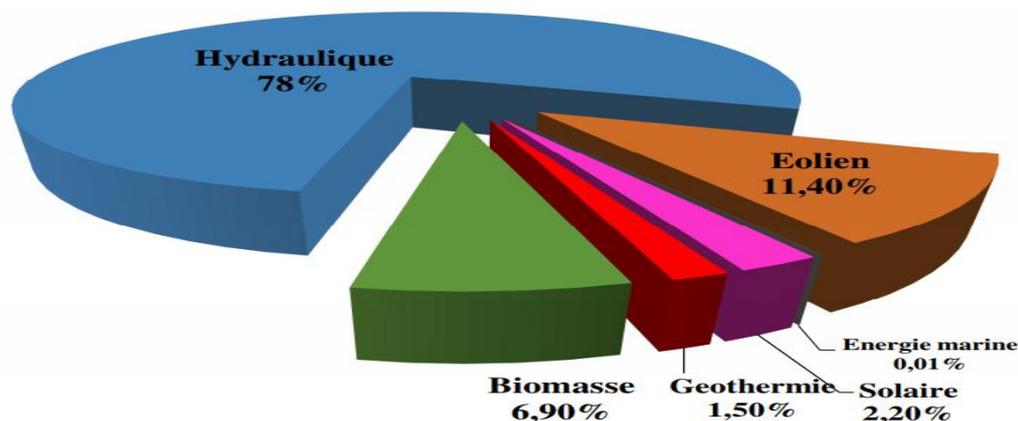


Figure (I.2): Structure de la production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde en 2012[02]

Le tableau I.1 montre la production d'énergie solaire en TWh pour l'année 2012 dans les principaux pays producteurs d'électricité.

Pays	Production (TWh)	Part mondiale production
Allemagne	28	26,8%
Italie	18,9	18%
Etats-Unis	15	14,3%
Espagne	11,9	11,4%
Japon	7,2	6,9%
Chine	5,2	5%
France	4,1	3,9%
République Tchèque	2,2	2,1%
Belgique	1,7	1,6%

Australie	1,5	1,4%
Reste du monde	9	8,6%
Monde	104,5	100%

Tableau I.1. La production d'énergie solaire en TWh pour l'année 2012 dans les principaux pays producteurs d'électricité.

I.3. Les énergies renouvelables, une priorité en Algérie

L'Algérie joue un rôle clé dans les marchés mondiaux de l'énergie en tant que producteur et exportateur de gaz naturel et de gaz naturel liquéfié. Le mix énergétique de l'Algérie en 2010 a été presque exclusivement basé sur les combustibles fossiles, en particulier le gaz naturel (93%). Cependant, le pays a un énorme potentiel d'énergie renouvelable, principalement solaire, dont le gouvernement est (ou devrait) en essayant de l'exploiter en lançant un programme d'énergie renouvelable et d'efficacité énergétique ambitieux.

Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, dont 12 000 MW seront destinés à la consommation interne et le reste pour l'exportation. Le programme est axé sur le développement et l'expansion de l'utilisation des ressources renouvelables, comme l'énergie solaire, le vent, la biomasse, la géothermie et l'hydroélectricité, afin de diversifier les sources d'énergie et promouvoir le développement durable du pays .[03-07]

Les projets des énergies renouvelables pour la production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en trois phases :

- Phase 2011-2013 : pour tester les différentes filières d'énergies renouvelables
Comme exemples de projets pilotes, on peut citer la station photovoltaïque de 1MWc à Oued N'chou, 10km au nord de la commune de Ghardaïa, réalisée sur une superficie de 10 hectares, pour un coût global de près de 900 millions de DA, cette mini-centrale est composée de 6000 modules photovoltaïques de différentes technologies ainsi que la station de 10 MW à Adrar, composée de 12 éoliennes.
- Phase 2014-2015 : déploiement du programme électricité renouvelable et la construction des équipements. Une puissance totale de près de 650 MW serait installée.
- Phase 2016-2020 : déploiement à grande échelle.

Environ 60 centrales solaires photovoltaïques, en se concentrant sur les centrales solaires, parcs éoliens ainsi que des centrales électriques hybrides qui doivent être construites au cours des dix prochaines années.

Capacités des centrales entrées en service en 2015	Capacités des centrales entrées en service en 2016	Capacités des centrales à mettre en service avant fin 2016
-Djanet (illizi) 3 MW -Adrar (Adrar) 20 MW -Kaberten (Adrar) 3 MW -Tamanrasset (Tamanrasset) 13 MW -Tindouf (Tindouf) 9 MW	-Aoulef (Adrar) 5 MW -Z.Kounta (Adrar) 6 MW -Timimoune (Adrar) 9 MW -Reggane (Adrar) 5 MW -In Salah (Tamanrasset) 5 MW -Ain Albel (Djelfa) 20 MW -Telagh (Sidi-Bel-Abbes) 12 MW -SedrateLeghzel (Naama) 20 MW -Ain Skhouna (Saïda) 30 MW -El Khnag (Laghouat) 20 MW -Oued El Kebrit (Souk Ahras) 15 MW	-Ain Al Bel (Djelfa) 33 MW -Laghouat 40 MW -Oued El Ma (Batna) 2 MW -Labiodh Sidi Chikh (El Bayadh) 23 MW -Ain El Melh (M'sila) 20 MW -El Hedjira (Ouargla) 30 MW
TOTAL— 48 MW	TOTAL— 147 MW	TOTAL— 148 MW
		TOTAL GENERAL: 343 MW

Tableau I.2. Les centrales d'électricité à partir d'énergies renouvelables en Algérie 2015-2016.

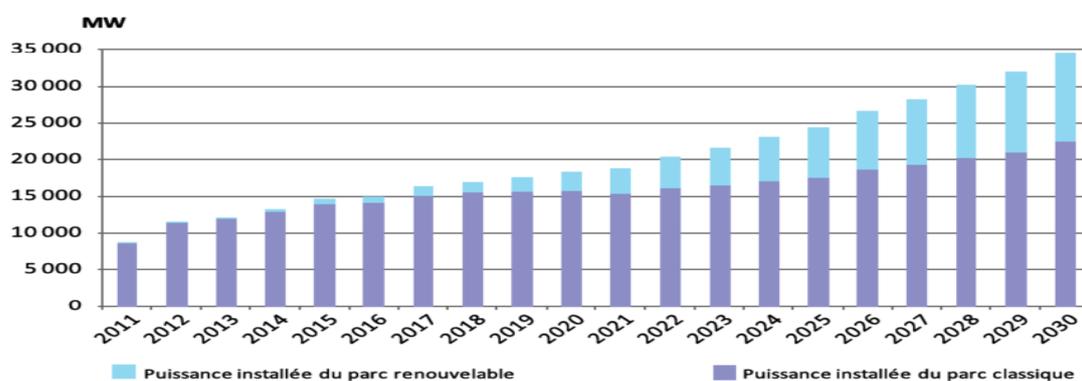


Figure (I.3): Structure du parc de la production nationale en MW [3]

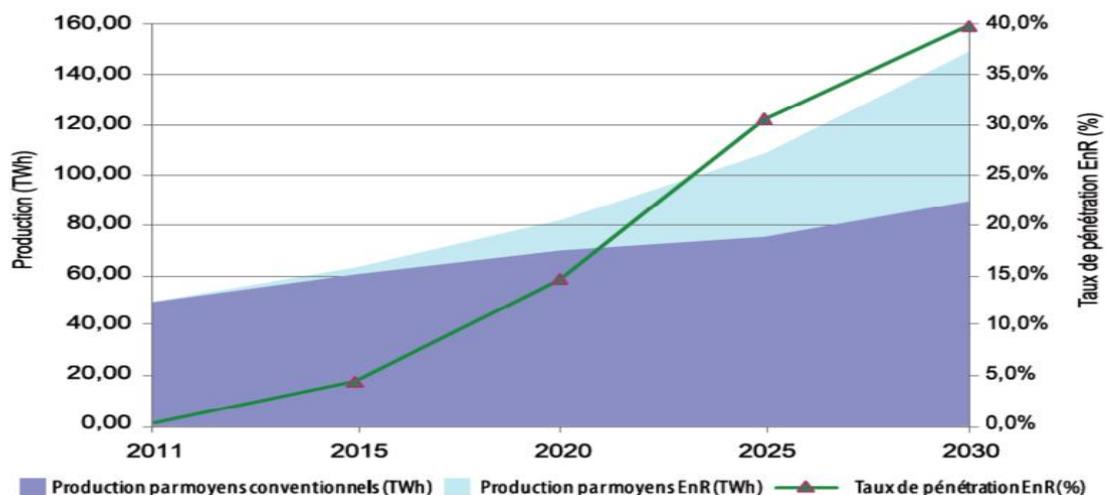


Figure (I.4): Pénétration des énergies renouvelables dans la production nationale en TWh

Des projets pilotent pour la construction de deux centrales solaires avec une capacité totale de stockage d'environ 150 MW chacune, ces derniers seront lancés au cours de la période 2011- 2013. Ceux-ci seront en plus du projet de la centrale hybride de HassiR'Mel avec une capacité de puissance totale de 150 MW, dont 25 MW dans le solaire. Quatre centrales thermiques solaires d'une capacité totale d'environ 1200 MW doivent être construites au cours de la période 2016-2020.

La Centrale électrique mixte de HassiR'Mel est l'une des premières centrales hybrides au monde. L'usine combine un creux parabolique de 25 MW concentrant un réseau d'énergie solaire et couvrant une superficie de plus de 180.000 m², en conjonction avec une centrale à cycle combiné à turbine à gaz de 130 MW, afin de réduire les émissions de carbone par rapport à une centrale électrique traditionnelle. La turbine à gaz et le cycle de vapeur sont tirés par le gaz naturel, avec la turbine à vapeur recevant la vapeur solaire supplémentaire produite au cours de la journée. L'usine a commencé la production d'électricité en Juin 2011.

I.3.1. Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose de l'un des gisements solaires les plus importants au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh /m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays.

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m2/an)	1700	1900	2650

Tableau I.3.Potentiel solaire en Algérie

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh.

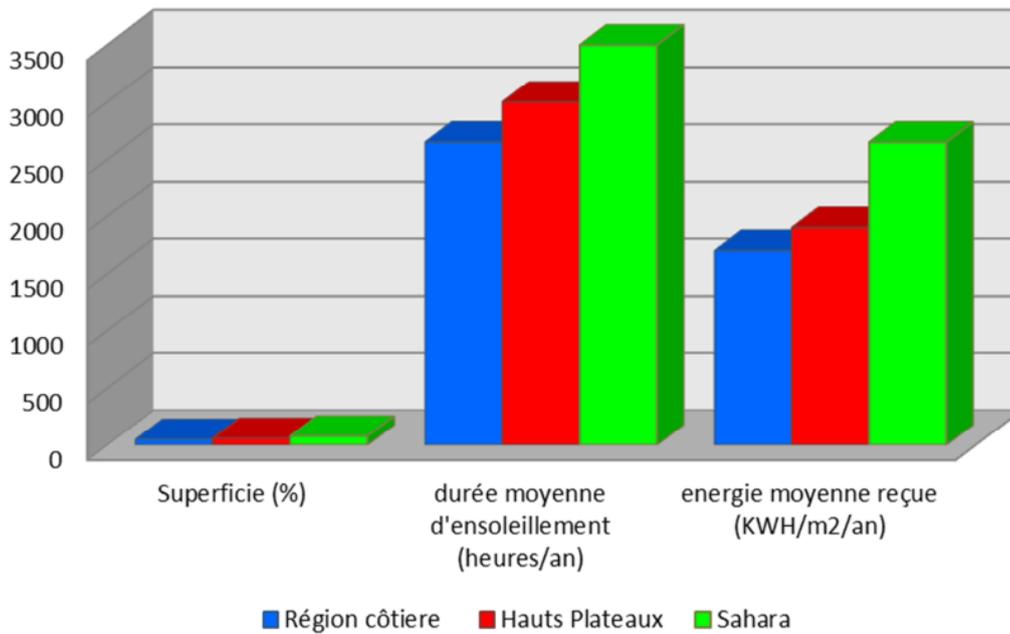


Figure (I.5): Potentiel solaire en Algérie

La figure (I.6) représente la durée moyenne d'ensoleillement en Algérie.

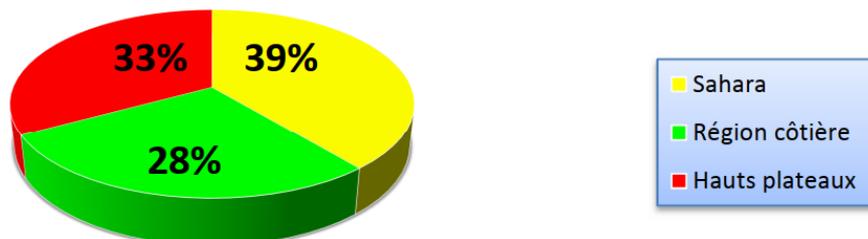


Figure (I.6): Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie

L'Algérie peut être divisée en huit (08) zones climatiques[03] qui ont approximativement un ensoleillement homogène comme indiqué par la figure I.7.

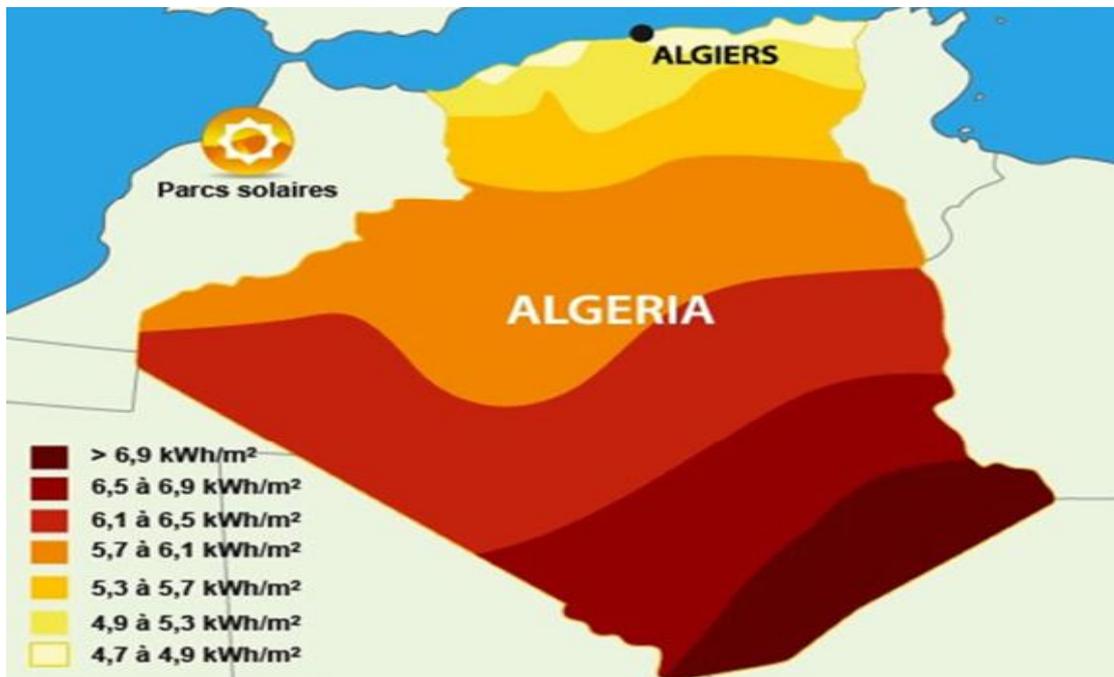


Figure (I.7): Zones climatiques de l'Algérie

Les systèmes solaires photovoltaïques sont classés en [04-05] :

- Systèmes photovoltaïques autonomes (également appelés systèmes hors réseau ou isolée)
- Systèmes photovoltaïques connecté au réseau
- Les systèmes hybrides

I.4. Effet photovoltaïque

La conversion d'énergie solaire PV repose sur un phénomène physique appelé : effet photovoltaïque, qui est la conversion directe de la lumière en électricité quand des photons frappent une cellule faite généralement du silicium. Cette dernière est un composant électronique semi-conducteur dans lequel l'absorption des photons, grains élémentaires de la lumière, libère des "électrons" chargés négativement et des "trous" chargés positivement. Ces charges électriques sont séparées par un champ électrique interne et collectées par une grille à l'avant et un contact à l'arrière. La cellule PV constitue ainsi un générateur électrique élémentaire (Figure I.8).

L'effet PV est un phénomène optoélectronique fut découvert par le physicien Français EDMOND BECQUEREL en 1839. Mais, il faudra attendre jusqu'au 1954 pour que les trois chercheurs américains des laboratoires Bell, Chapin, Pearson et Prince, développent la première cellule PV avec un rendement énergétique ne dépassant pas 4,5% au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.[06]

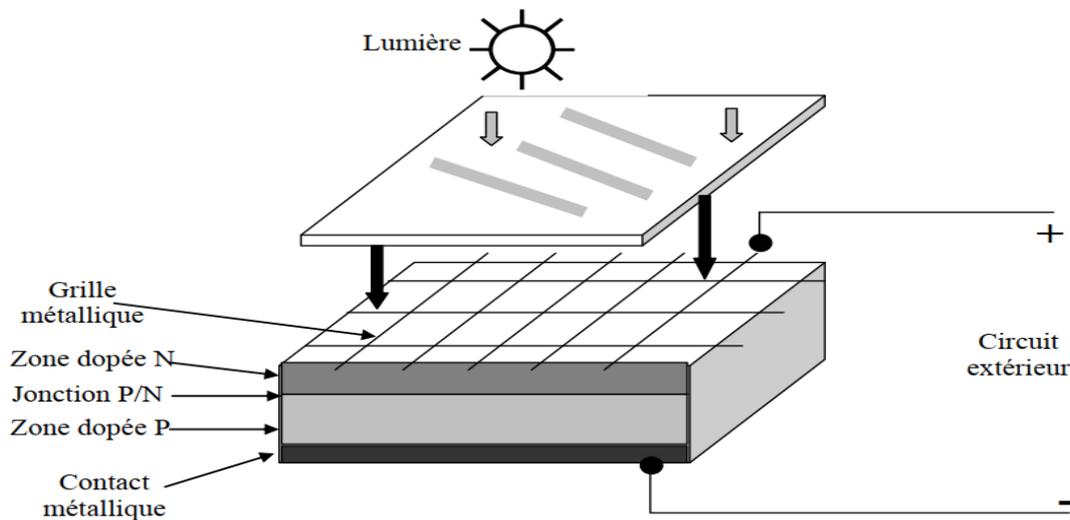


Figure (I.8): Fonctionnement d'une cellule solaire photovoltaïque

I.5. Systèmes photovoltaïques autonomes

Les systèmes autonomes ne sont pas connectés à des lignes électriques utilitaires et ceux-ci sont des auto-systèmes suffisants. Ces systèmes pourraient être utilisés soit pour charger les batteries qui servent en tant que dispositif de stockage d'énergie ou pourraient travailler directement la nuit en utilisant l'énergie solaire disponible. Ces systèmes sont les suivants :

- Les panneaux solaires montés sur le toit ou dans des espaces ouverts. Les modules photovoltaïques produisent l'énergie électrique à courant continu(DC).
- Les batteries pour stocker l'énergie continue générée par les panneaux solaires.
- Le contrôleur de charge pour éviter la surcharge de la batterie.
- L'onduleur pour convertir l'électricité produite par le système de courant continu en courant alternatif.

La figure I.9 suivante illustre le système de PV alimentant les charges CA avec la banque de batteries pour le stockage d'énergie. Les charges CC peuvent également être connectées directement à la banque de batteries. Il est également possible d'alimenter la charge de courant alternatif sans

batterie, mais dans ce cas il serait limité seulement au jour lorsque le rayonnement solaire est suffisant pour générer l'électricité requise.

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique

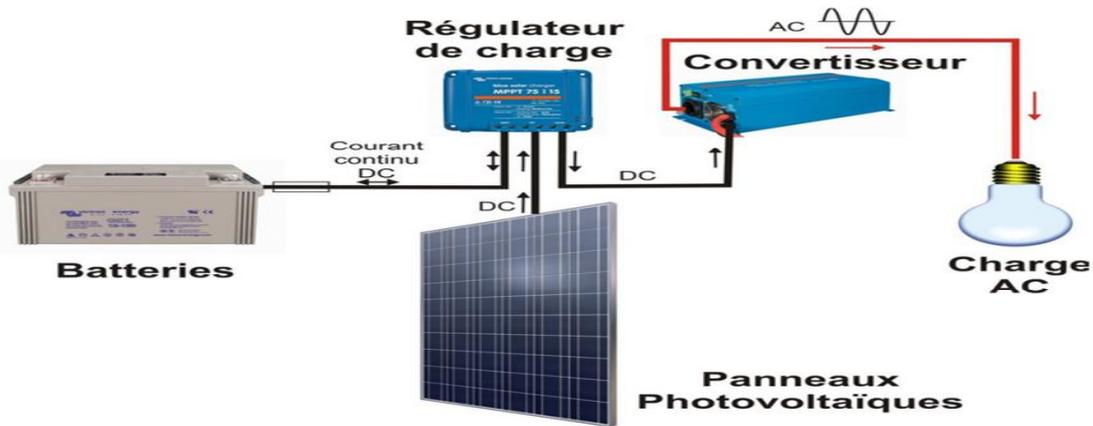


Figure (I.9): Systèmes photovoltaïques autonomes

I.4.1. Les différentes composantes

On distingue deux types selon les besoins de la charge [07]:

I.5.1. Système autonome sans batterie.

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (ex. : calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (ex. : pompage photovoltaïque : le réservoir d'eau sert de stockage).

I.5.2. Système autonome avec batterie.

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes que les anglophones appellent Stand-alone Systems. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie.

L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. (Ex. l'éclairage d'une maison la nuit).

I.6. Systèmes PV connecté au réseau

Un système photovoltaïque raccordé au réseau sera en interaction avec le réseau électrique. Le principal avantage de ce système est que le pouvoir peut être tiré du réseau électrique et lorsque l'alimentation n'est pas disponible à partir du réseau, le système PV peut compléter ce pouvoir. Ces

systèmes connectés au réseau sont conçus avec une batterie ou sans stockage de la batterie. Ces systèmes sont les suivants :

- Les panneaux solaires montés sur le toit ou dans des espaces ouverts. Les modules photovoltaïques produisent l'énergie électrique à courant continu (DC).
- Les batteries pour stocker l'énergie continue générée par les panneaux solaires.
- Le contrôleur de charge pour éviter la surcharge de la batterie.
- L'onduleur spécialement conçu pour transformer le courant continu généré par le générateur PV en courant alternatif, qui sera injecté au réseau

La figure I.10 suivante illustre la structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique.

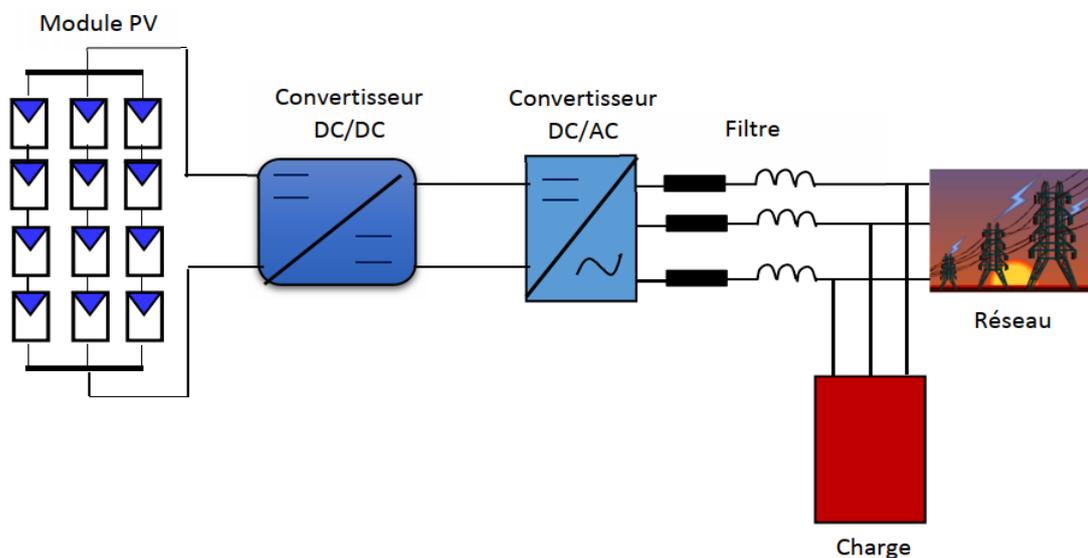


Figure (I.10): Structure générale d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique

I.6.1. Schéma synoptique de connexion au réseau

Le schéma synoptique de connexion au réseau électrique de distribution basée sur l'algorithme de commande vectorielle se présente comme le schéma ci-après :

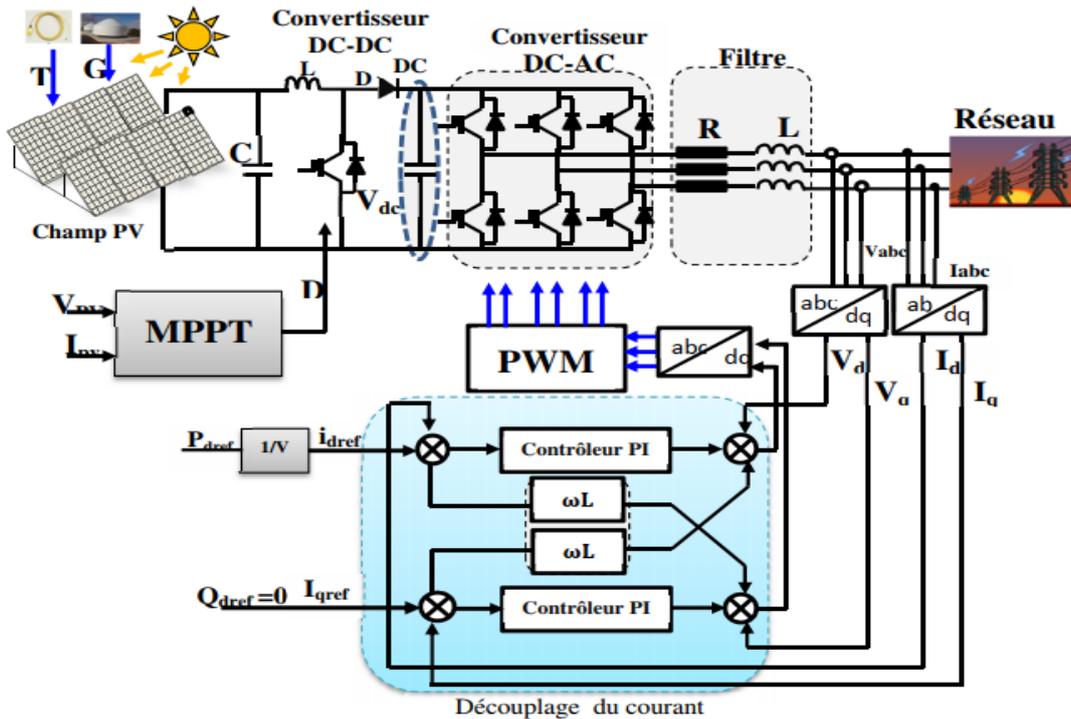


Figure (I.11): Schéma de la commande entre l'onduleur et le réseau [08]

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par donner une brève description de l'état d'art de la production mondiale d'électricité en général et celle d'origine renouvelable. Après, nous avons présenté le potentiel solaire en Algérie et l'importance du programme ambitieux des énergies renouvelables pour couvrir une partie de la demande nationale en électricité. L'objectif est d'atteindre d'ici 2030 un taux d'intégration supérieur à 40% de la production électrique. Dans la dernière partie; nous avons présenté les classifications des systèmes photovoltaïques. Les modes d'exploitation De ces systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être divisés en deux catégories : autonome et raccordé au réseau.

Chapitre II :
Développement d'une
commande d'onduleur
PV basée sur le mode
glissant

3.

II.1. Introduction

En général, les techniques de commande sont demandées dans le but de résoudre le problème des variations paramétriques, avec une erreur statique nulle, une réponse rapide, donc un système de contrôle stable et robuste. Parmi ces techniques, on trouve la commande par mode de glissement connue par sa simplicité et sa robustesse. Cette dernière a été inventée pour la première fois en Union Soviétique (Emelyanov, 1950). Par la suite, des travaux ont été repris ailleurs, soit pour compléter l'étude théorique, soit pour étudier quelques applications possibles.

Au début des années 80, la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement est devenue très intéressante et attractive, elle est considérée comme l'une des approches les plus simples pour la commande des systèmes ayant un modèle imprécis grâce aux avantages qu'elle présente (robustesse vis-à-vis des paramètres variables, une très haute précision, une bonne stabilité, un temps de réponse très faible).

Dans ce chapitre nous allons étudier la commande par mode glissant (Sliding Mode) des convertisseurs DC/AC. Cette commande est utilisée pour le contrôle du système linéaire et non linéaire. Nous commencerons par un aperçu sur la surface de glissement, puis les développements nécessaires à la commande par mode glissant. Ces dernières se concentrent sur l'évaluation de cette technique sur les onduleurs.

II.2.1. Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour produire plus de puissance, plusieurs cellules sont assemblées pour former un module. Les cellules individuelles sont généralement connectées dans une chaîne en série (typiquement 36 ou 72) pour atteindre la tension de sortie désirée [09]. L'interconnexion de modules entre eux - en série - permet d'augmenter la tension générée pour un même courant et leur interconnexion - en parallèle - permet d'augmenter le courant délivré pour une même tension, mais pour obtenir une puissance plus grande, les modules sont connectés en série et en parallèle, ceci définit la notion de champ photovoltaïque.

II.2.1.1. Modélisation de la cellule PV

Le comportement d'une cellule PV constituée d'une jonction PN à base de silicium peut être décrit par l'équation suivante [10-11]:

$$I = I_{ph} + I_d + I_p \quad (II.1)$$

$$I = I_{sc} \left(\frac{G}{1000} \right) - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I.R_s}{nV_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_p} \quad (II.2)$$

Avec :

I : Le courant fourni par la cellule.

I_{ph} : Le photo-courant dépendant de l'éclairement (G). Ce courant correspond également au courant de court-circuit.

I_d : Le courant traversant la diode.

I_p : Le courant dérivé par la résistance parallèle.

I_0 : Le courant de saturation inverse d'une diode.

I_{sc} : Courant de court-circuit de la cellule.

G : Eclairement.

R_p : Résistance parallèle de la cellule

R_s : Résistance série de la cellule

V_T : La tension thermique.

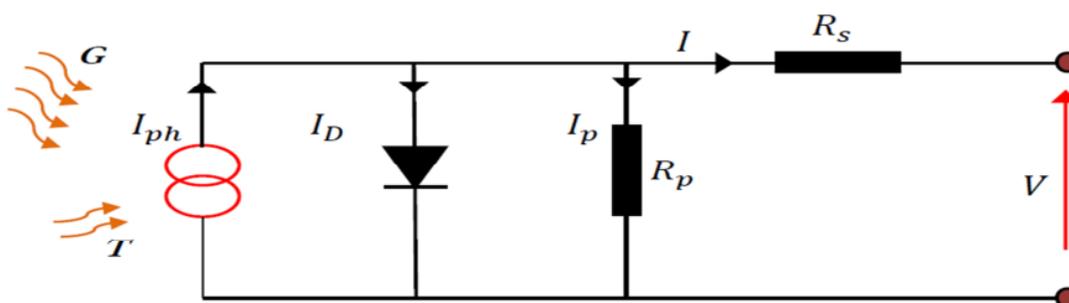
Où :

e : charge d'électron (1.602×10^{-19}),

K : constante de Boltzmann (1.381×10^{-23}),

n : Facteur de non idéalité de la jonction comprise entre 1 et 2 dans la pratique.

T : La température ambiante effective de la cellule en kelvin.



Figure(II.1).Schéma équivalent de cellule PV [09]

II.3.la commande par Mode Glissant

La commande par mode glissant (Sliding Mode Control, SMC) est un contrôle de type non linéaire qui a été introduit pour le contrôle des systèmes à structure variable (comme le convertisseur) et il se base sur le concept de changement de structure du contrôleur avec l'état du système afin d'obtenir une réponse désirée, la commande par mode glissant est donc du type tout ou rien.

Dans ce type de régulation, l'état du système définit la position de l'organe de commande. L'idée est de diviser l'espace d'état par une frontière de décision appelée surface de glissement. L'objectif est d'arriver à l'état de référence, une fois que l'état du système atteint la surface de glissement Figure (II.2).

Premièrement, pour atteindre cet objectif, il faut assurer l'attractivité de la surface de glissement. En d'autre terme il faut que l'état du système dans n'importe quelle position de l'espace d'état se dirige vers la surface de glissement.

Deuxièmement, une fois la surface atteinte, il faut assurer le glissement le long de cette surface et la stabilité du système, pour rejoindre la référence. Pour cela, il faut trouver la condition sous laquelle la dynamique du système glisse sur la surface vers l'état de référence désiré, Figure (II.2).

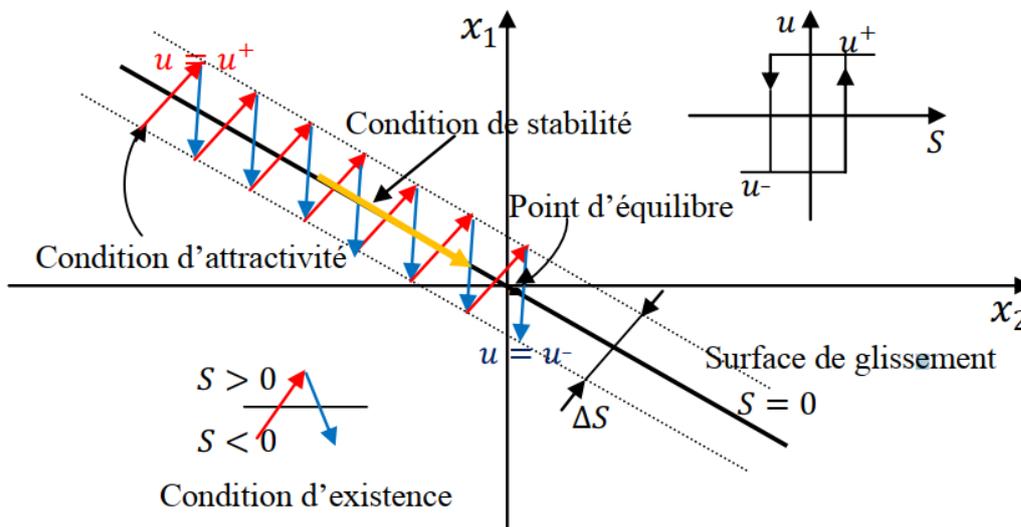


Figure (II.2) : surface de mode glissant.

La commande par Mode Glissant (SMC) est une commande à structure variable pouvant changer de structure et commutant entre deux valeurs suivant une logique de commutation bien spécifique $S(x)$. Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci (figure II.2).

II.3.1. Principe

La commande par mode glissant est une commande robuste basée sur le concept de changement de structure du contrôleur avec l'état du système afin d'obtenir la réponse désirée. Le contrôleur par mode glissant se base sur l'hypothèse d'une hystérésis nulle sur la surface de glissement $S(x, t)=0$ et donc sur une fréquence de commutation variable et théoriquement infinie. Il est clair que, du point de vue pratique, il n'est pas possible de vérifier cette hypothèse. En raison des limitations technologiques liées à l'utilisation de fréquences de commutation élevées, il est préférable de limiter cette fréquence.

L'idée est de diviser l'espace d'état par une frontière de décision appelée : « surface de glissement ». Cette surface délimite deux sous-espaces correspondant à deux états possibles de l'organe de commande Figure (II.2). La stabilisation sur la surface de glissement est obtenue à l'aide

d'une commutation à chaque franchissement de la frontière de décision .Ce principe de commande repose donc essentiellement sur l'utilisation d'une commande discontinue afin de maintenir l'évolution du système sur une surface de glissement judicieusement choisie. La synthèse doit donc viser à rendre la surface de glissement attractive (condition d'attractivité) depuis tout point de l'espace d'état. Une fois la surface atteinte, il faut assurer le glissement le long de cette surface (condition de glissement) et la stabilité du système (condition de stabilité). En d'autres termes, il faut trouver la condition pour laquelle la dynamique du système glisse sur la surface vers le point d'équilibre désiré (Figure (II.2)). Sur la surface, la dynamique du système est indépendante de celle du processus initial, ce qui implique que ce type de contrôle entre dans le domaine des commandes robustes. Ces notions de stabilité sont démontrées en tenant compte du principe de stabilité suivant le critère de LYAPUNOV (théorème 1).

Pour chaque interrupteur, la commande est effectuée par un comparateur à hystérésis. Le sens de l'hystérésis doit être choisi de manière à ce que le changement d'état ramène la trajectoire à l'intérieur de la fourchette. Ainsi, on peut être amené à choisir :

$$u = \begin{cases} 1 & \text{si } S(x) > +\frac{1}{2} \Delta S \\ 0 & \text{si } S(x) < -\frac{1}{2} \Delta S \end{cases} \quad (\text{II. 3})$$

Théorème 1 :

Soit $V(x)$ une fonction différentiable de R_n dans R_n , dite fonction de LYAPUNOV, qui satisfait les conditions suivantes [12] :

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ V(x) > 0 \forall x \neq 0 \\ V'(x) < 0 \forall x \neq 0 \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Si ces trois conditions sont satisfaites, $x = 0$ est un point d'équilibre stable. Si la dernière condition devient $\dot{V}(x) < 0$ pour, le point $x = 0$ est asymptotiquement stable.

Dans le cas de la commande par mode glissant, cette fonction de LYAPUNOV est déduite à l'aide d'une pseudo-sortie qui est la surface de glissement $S(x, t) = 0$.

III.3.2. Objectif de la commande par mode glissant

L'objectif de la commande par mode glissant se résume en deux points essentiels :

- ❖ Synthétiser une surface $S(x,t)$ telle que toutes les trajectoires du système obéissent à un comportement désiré de poursuite, régulation et stabilité .

❖ Déterminer une loi de commande (commutation) $U(x,t)$ qui est capable d'attirer toutes les trajectoires d'état vers la surface de glissement et les maintenir sur cette surface .

II.3.3. Choix de la surface de glissement

La surface $S(x)$ représente le comportement dynamique désiré du système. SLOTINE propose une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable vers sa valeur désirée [13] :

$$S(x) = \left(\frac{\partial}{\partial t} + \lambda_x \right)^{r-1} e(x) \quad (\text{II.5})$$

Où:

$e(x)$: Écart de la variable à régler, $e(x) = x - x_{\text{ref}}$

λ_x : Constante positive qui interprète la bande passante du contrôle désiré.

r : Degré relatif, égal au nombre de fois qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande.

$S(x) = 0$: est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $e(x) = 0$.

II.3.4. Condition d'existence du glissement

La condition d'existence du régime glissant $S(x, t) = 0$ se traduit par [14] :

$$\lim_{S \rightarrow 0} S \cdot S' < 0$$

Ces conditions sont déduites du théorème (1) en appliquant le critère de stabilité de LYAPUNOV dans un voisinage de la surface de glissement et en prenant $V(x) = \frac{S^2}{2}$

comme fonction candidate de LYAPUNOV. Dans ce cas, la dérivée de la fonction de LYAPUNOV \dot{V} est égale à $S \cdot S'$.

Les conditions de LYAPUNOV énoncées dans le théorème 1 sont vérifiées si S et \dot{S} sont de signes opposés. A noter que ces dernières conditions deviennent des conditions suffisantes pour assurer l'attractivité de la surface si elles sont valables sur tout l'espace d'état et non seulement dans une région proche de la surface de glissement.

II.3.5. Méthode de la commande équivalente

La courbe en zig-zag entre u_- et u_+ illustrée dans la figure (II.4) est la trajectoire d'état réelle (pratique) du système. Elle entoure la droite $S = 0$ qui est la trajectoire d'état idéale (théorique) ou de référence. Il est possible de subdiviser le déplacement de la trajectoire réelle en deux composantes ; une composante à haute fréquence et une composante à basse fréquence. La composante à haute fréquence est une trajectoire discontinue qui alterne entre u_- et u_+ , alors que la composante basse fréquence forme une trajectoire continue qui se déplace le long de la surface de glissement. Négligeant la composante de commutation rapide souvent filtrée, la trajectoire d'état sera alors déterminée par la composante de commutation lente. C'est ce qu'on appelle la commande équivalente, qu'on peut interpréter comme la valeur moyenne que prend la grandeur de commande lors de la commutation rapide entre u_- et u_+ comme représenté schématiquement à la figure (II.4).

La commande équivalente rend la surface de commutation invariante dans le temps $S = 0$ [50].

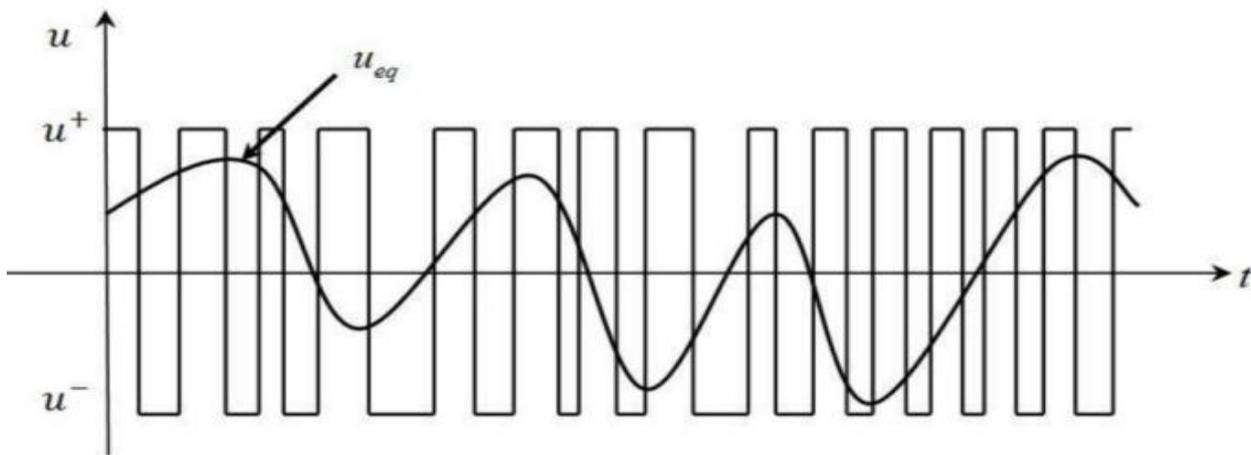


Figure (II.3) : Commande équivalente comme valeur moyenne de commutation entre u_- et u_+ .

Considérons à titre d'exemple le système régi par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t) \cdot u \quad (II.6)$$

Admettons que le régime de glissement existe sur la surface de commutation $S(x,t) = 0$, sa dérivée est donnée par:

$$S' = \frac{dS(x,t)}{dt} = \frac{1}{dt} \left(\frac{\partial S}{\partial x} dx + \frac{\partial S}{\partial t} dt \right) = \frac{\partial S}{\partial x} x' + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (II.7)$$

Soit ∇S le gradient de S , alors :

$$S' = \nabla S \cdot x' = \nabla S \cdot f(x, t) + \nabla S \cdot g(x)u + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (II.8)$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car sa primitive est égale à zéro). Cette condition permet de déterminer la commande équivalente pour maintenir la trajectoire d'état sur cette surface. Il faut donc résoudre :

$$\nabla S \cdot f(x, t) + \nabla S \cdot g(x, t)u_{eq} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (II.9)$$

Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq} = -[\nabla S. g(x, t)]^{-1}. \left[\nabla S. f(x, t) + \frac{\partial S}{\partial t} \right] \quad (\text{II.10})$$

Où, nous pouvons l'exprimer de la façon suivante:

$$u_{eq} = -\frac{\langle \nabla S, f(x, t) \rangle}{\langle \nabla S, g(x, t) \rangle} \quad (\text{II.11})$$

Où $\langle \dots \rangle$ désigne le produit scalaire.

Il est alors possible d'exprimer la dynamique du système sur la surface de glissement par :

$$x' = f(x, t) - g(x, t). [\nabla S. g(x, t)]^{-1}. \left[\nabla S. f(x, t) + \frac{\partial S(x)}{\partial t} \right] \quad (\text{II.12})$$

La commande par mode glissant se compose de deux termes, une commande discontinue en fonction du signe de la surface de glissement u_n et une commande dite équivalente u_{eq} caractérisant la dynamique du système sur la surface de glissement.

$$u = u_{eq} + u_n \quad (\text{II.13})$$

$U_{eq}(t)$: correspond à la composante équivalente.

$U_n(t)$: correspond à la composante non linéaire.

Remarque :

u_n Correspond à la composante non linéaire. Elle est déterminée pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et satisfaire la condition de convergence.

$$S(x).S'(x) < 0$$

Calcul de u_{eq}

La composante équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne modulée.

Elle est calculée à partir de :

$$S(x) = 0 \Rightarrow S'(x) = 0 \quad (\text{II.14})$$

De (II.6), (II.7) et (II.13) on peut écrire :

$$S'(x) = \frac{\partial S}{\partial x} (f(x, t) + g(x, t). u_{eq}) + \frac{\partial S}{\partial x} (g(x, t). u_n) + \frac{\partial S}{\partial t} \quad (\text{II.15})$$

En utilisant la condition du mode de glissement, l'expression (II.15) devient :

$$S'(x) = \frac{\partial S}{\partial x} (g(x, t). u_n) \quad (\text{II.16})$$

Le problème revient à trouver u_n tel que :

$$S'(x).S(x) = S(x). \frac{\partial S}{\partial x}(g(x, t)). u_n < 0 \quad (\text{II.17})$$

La solution la plus simple vérifiant cette condition est donnée par la fonction signe «*sign*» illustrée à la figure (II.5).

$$u_n = k. \text{sign}(S(x)) \quad (\text{II.18})$$

$$u_n = k. \text{sign}(S(x))$$

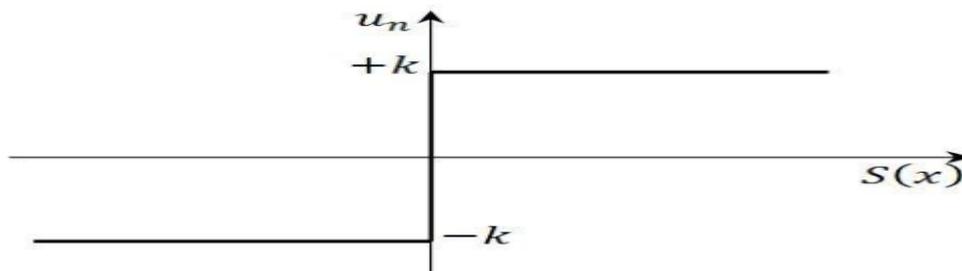


Figure (II.4) Représentation de la fonction signe

En remplaçant l'expression (II.18) dans (II.17), on obtient :

$$S'(x).S(x) = S(x). \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t). k. \text{sign}(S(x)) < 0 \quad (\text{II.19})$$

Où le facteur $\frac{\partial S}{\partial x} g(x, t)$ est toujours négatif pour la classe de système que nous considérons.

Le gain k est choisi positif pour satisfaire la condition (II.19). Le choix de ce gain est très influent car, s'il est très petit le temps de réponse sera très long et, s'il est choisi très grand, nous aurons de fortes oscillations au niveau de l'organe de commande. Ces oscillations peuvent exciter les dynamiques négligées (phénomène de Chattering), ou même détériorer l'organe de commande [14].

II.4. Domaine d'application du réglage par mode glissant

La technique du réglage par mode glissant a connu des développements importants dans tous les domaines de la commande. Dans le domaine des commandes hydrauliques ou pneumatiques, il existe des valves fonctionnant par tout ou rien qui ne possèdent que deux états stables : complètement ouvertes ou complètement fermées. Ces valves admettent des fréquences de commutation de quelques 10Hz.

Les entraînements électriques pour des machines outils ou des robots, entraînements qui nécessitent, soit un réglage de la vitesse de rotation, soit un réglage de position. Dans ce cas, le comportement dynamique à haute performance et la possibilité de limiter facilement certaines grandeurs (comme le courant et la vitesse de rotation) sont des avantages incontestables en faveur du réglage par mode glissant. Il faut mentionner que dans certains domaines tels que les processus chimiques et métallurgies, où il y'a des réglages qui font appel à des régulateurs à deux positions, le procédé par mode glissant peut apporter plusieurs avantages [15].

II.5. Les avantages de la commande par mode glissant

Cette commande présente les caractéristiques suivantes [15] :

□□❖□ La réponse du système est insensible et robuste aux variations de certains paramètres et aux effets troubles de la charge, et perturbations ;

❖ Il suffit de connaître une borne pour de la grandeur de perturbation intervenant sur le système à régler, ce qui simplifie le réglage ;

❖ Le choix de la surface de commutation est assez libre ;

❖ La commande est adoucie par la présence de la commande équivalente, celle-ci peut être supprimée au prix d'une augmentation de la grandeur de perturbation intervenant sur le système à régler.

II.6. Application de la commande par mode de glissement au convertisseur DC-AC

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande.

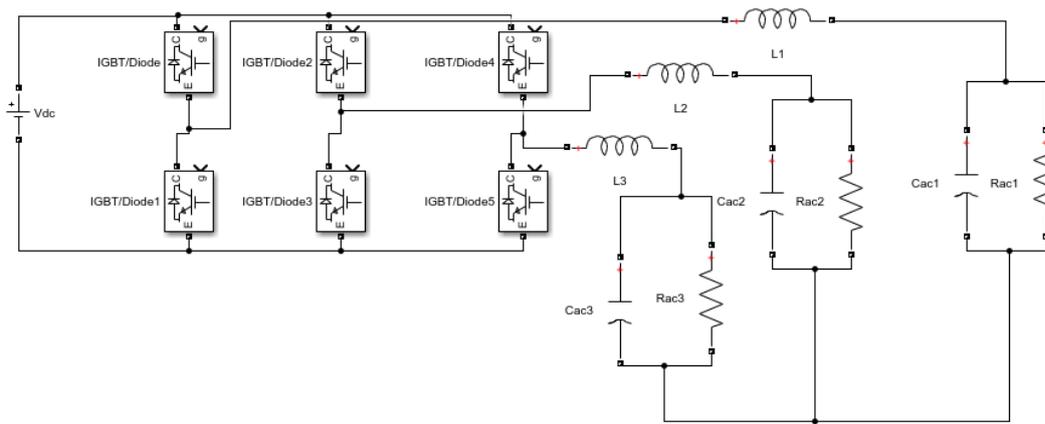


Figure (II.5). Modèle d'onduleur DC-AC

Certaines conditions idéales sont supposées pour dériver le modèle dynamique de l'onduleur

Selon la loi du courant de Kirchhoff (KCL) et la loi de tension de Kirchhoff (KVL), il peut être obtenu que :

$$\begin{cases} U_{ac1} = -L \frac{di_1}{dt} + V_{1M} + V_{MN} \\ U_{ac2} = -L \frac{di_2}{dt} + V_{2M} + V_{MN} \\ U_{ac3} = -L \frac{di_3}{dt} + V_{3M} + V_{MN} \end{cases} \quad (II.20)$$

VMN est la tension entre les points M et N.

En sommant les trois équations de (II.20), en tenant compte de l'absence de homopolaire dans les courants du système à trois fils, et en supposant que les tensions d'alimentation AC sont équilibrées, on peut obtenir:

$$V_{MN} = -\frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 V_{mM} \quad (II.21)$$

La fonction de commutation C_k indique l'état ON/OFF des dispositifs dans les deux jambes du pont IGBT. c_k est défini comme :

$$C_k = \begin{cases} 1, & \text{si } S_k \text{ est active et } S_{k+3} \text{ est desactive} \\ 0, & \text{si } S_k \text{ est desactive et } S_{k+3} \text{ est active} \end{cases}$$

Ou $k = 1, 2, 3$

Compte tenu de la relation $V_{kM} = C_k * V_{dc}$ alors (1) devient :

$$\begin{cases} U_{ac1} = -L \frac{di_1}{dt} + V_{dc} \left(C_1 - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 C_m \right) \\ U_{ac2} = -L \frac{di_2}{dt} + V_{dc} \left(C_2 - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 C_m \right) \\ U_{ac3} = -L \frac{di_3}{dt} + V_{dc} \left(C_3 - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 C_m \right) \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Alors la fonction d'état de commutation d_{nk} est définie comme :

$$d_{nk} = \left(C_k - \frac{1}{3} \sum_{m=1}^3 C_m \right) n \quad (\text{II.23})$$

Ce qui montre que d_{nk} dépend de la fonction de commutation C_k .

De plus, sur la base de (5) et pour les huit commutations autorisées états de l'IGBT, on peut obtenir que

$$\begin{bmatrix} d_{1k} \\ d_{2k} \\ d_{3k} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Équation (II.22) devient

$$\begin{cases} U_{ac1} = -L \frac{di_1}{dt} + V_{dc} d_{n1} \\ U_{ac2} = -L \frac{di_2}{dt} + V_{dc} d_{n2} \\ U_{ac3} = -L \frac{di_3}{dt} + V_{dc} d_{n3} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

De plus, définissez deux nouvelles variables

$$\begin{cases} x_1 = U_{ack} \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dot{U}_{ack} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Selon la loi du courant de Kirchhoff (KCL) et la loi de tension de Kirchhoff (KVL), il peut être obtenu que :

$$U_{ack} = -L \frac{di_k}{dt} + V_{dc} d_{nk} \quad (\text{II.27})$$

$$i_k = C_{ac} \frac{dU_{ack}}{dt} + \frac{U_{ack}}{R_{ac}} \quad (\text{II.28})$$

Remarque

$$L_1 = L_2 = L_3 = L$$

$$C_{ac1} = C_{ac2} = C_{ac3} = C_{ac}$$

$$R_{ac1} = R_{ac2} = R_{ac3} = R_{ac}$$

La dérivée de x_1 et x_2 par rapport au temps donne :

$$\dot{x}_2 = \dot{x}_1 = \dot{U}_{ack} = \frac{i_k}{C_{ac}} - \frac{U_{ack}}{C_{ac}R_{ac}} \quad (\text{II.29})$$

$$\ddot{x}_2 = \ddot{x}_1 = \ddot{U}_{ack} = \left(\frac{d \left(\frac{i_k}{C_{ac}} - \frac{U_{ack}}{C_{ac}R_{ac}} \right)}{dt} \right) \quad (\text{II.30})$$

$$\ddot{U}_{ack} = \frac{1}{C_{ac}} \frac{di_k}{dt} - \frac{1}{C_{ac}R_{ac}} \frac{dU_{ac}}{dt} \quad (\text{II.31})$$

$$\ddot{U}_{ack} = \frac{1}{LC_{ac}} [V_{dc} d_{nk} - U_{ack}] - \frac{1}{C_{ac}R_{ac}} \frac{dU_{ack}}{dt} \quad (\text{II.32})$$

$$\ddot{U}_{ack} = -\frac{1}{C_{ac}R_{ac}} \frac{dU_{ack}}{dt} - \frac{1}{LC_{ac}} U_{ack} + \frac{1}{LC_{ac}} V_{dc} d_{nk} \quad (\text{II.33})$$

Où U_{ack} et sa dérivée, ainsi que V_{dc} , peuvent être mesurés.

Considérant la survenue de perturbations externes inconnues dans les applications pratiques, le modèle dynamique de l'onduleur peut être écrit comme

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x) + g(x)u \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

Où

$$f(x) = -\frac{1}{C_{ac}R_{ac}} \frac{dU_{ack}}{dt} - \frac{1}{LC_{ac}} U_{ack} \quad (\text{II.35})$$

$$g(x) = \frac{1}{LC_{ac}} V_{dc} \quad (\text{II.36})$$

$$u = d_{nk} \quad (\text{II.37})$$

d est la perturbation externe inconnue et sa borne est supposée être donnée par $d < D$, D est une constante positive.

Une surface de glissement est conçue comme dans l'équation :

$$S(e) = Ke + e' \quad (\text{II.38})$$

Où U_{ackr} est la tension de référence du réseau $e = U_{ack} - U_{ackr}$ est l'erreur de suivi entre U_{ack} et U_{ackr} , et K est une constante positive.

$$S(e) = K(U_{ack} - U_{ackr}) + (\dot{U}_{ack} - \dot{U}_{ackr}) \quad (\text{II.39})$$

$$\dot{S}(e) = K(\dot{U}_{ack} - \dot{U}_{ackr}) + (\ddot{U}_{ack} - \ddot{U}_{ackr}) = 0 \quad (\text{II.40})$$

$$\dot{S}(e) = K\dot{U}_{ack} - K\dot{U}_{ackr} - \frac{1}{C_{ac}R_{ac}}\dot{U}_{ack} - \frac{1}{LC_{ac}}U_{ack} + \frac{1}{LC_{ac}}V_{dc}d_{nk} - \ddot{U}_{ackr} = 0 \quad (\text{II.41})$$

$$\dot{S}(e) = \dot{U}_{ack} \left(K - \frac{1}{C_{ac}R_{ac}} \right) - \frac{1}{LC_{ac}}U_{ack} - K\dot{U}_{ackr} - \ddot{U}_{ackr} + \frac{1}{LC_{ac}}V_{dc}d_{nk} = 0 \quad (\text{II.42})$$

$$d_{nk} = \frac{LC_{ac}}{V_{dc}} \left(-\dot{U}_{ack} \left(K - \frac{1}{C_{ac}R_{ac}} \right) + \frac{1}{LC_{ac}}U_{ack} + K\dot{U}_{ackr} + \ddot{U}_{ackr} \right) \quad (\text{II.43})$$

II.7. Conclusion:

Nous avons vu dans ce chapitre que la commande par mode de glissement est un mode de fonctionnement à structure variable, elle est caractérisée par la discontinuité de la commande. La commutation de la commande s'effectue en fonction des variables d'état, utilisées pour créer une surface dite de glissement, dont le but, est de forcer la dynamique du système de correspondre avec celle définie par l'équation de la surface. Quand l'état est maintenu sur cette surface, le système est dit en régime glissant.

Ainsi, tant que les conditions de glissement sont assurées, la dynamique du système reste insensible aux variations de paramètres du processus, aux erreurs de modélisation et à certaines perturbations.

Chapitre III :

Résultat

et

simulation

III.1. Introduction

Dans cette partie, nous allons simuler les circuits d'un convertisseur DC-AC (onduleur), la simulation est composée de deux étages de conversion en cascade, permettant un transfert adéquat de l'énergie extraite du générateur PV. Le premier étage dit « continu », se compose d'un convertisseur DC-DC boost qui élève la tension optimale du générateur à une tension convenable du bus continu; ce dispositif sert ainsi comme un adaptateur d'impédance. Le deuxième étage dit « alternatif », se compose à son tour, d'un onduleur de tension à deux niveaux, connecté au charge triphasée.

les résultats sont représentés par la commande du mode glissant où nous allons varier la puissance de l'éclairement solaire qui exprimée en (W/m^2). Nous allons simuler le circuit à l'aide du programme MATLAB/SIMULINK.

III.2. La simulation sur MATLAB :

En présente dans la figure 3.1 la simulation d'un onduleur et son environnement fonctionnel, c'est comme suit:

- D'une source de tension triphasée.
- Convertisseur DC-DC (boost).
- Modèle PV array.
- D'une charge non linéaire.
- D'onduleur, le quel est composé d'un onduleur de tension à trois bras à interrupteur réversible en courant et bi-commandable (IGBT avec des diodes antiparallèles).
- D'une commande de mode glissant.

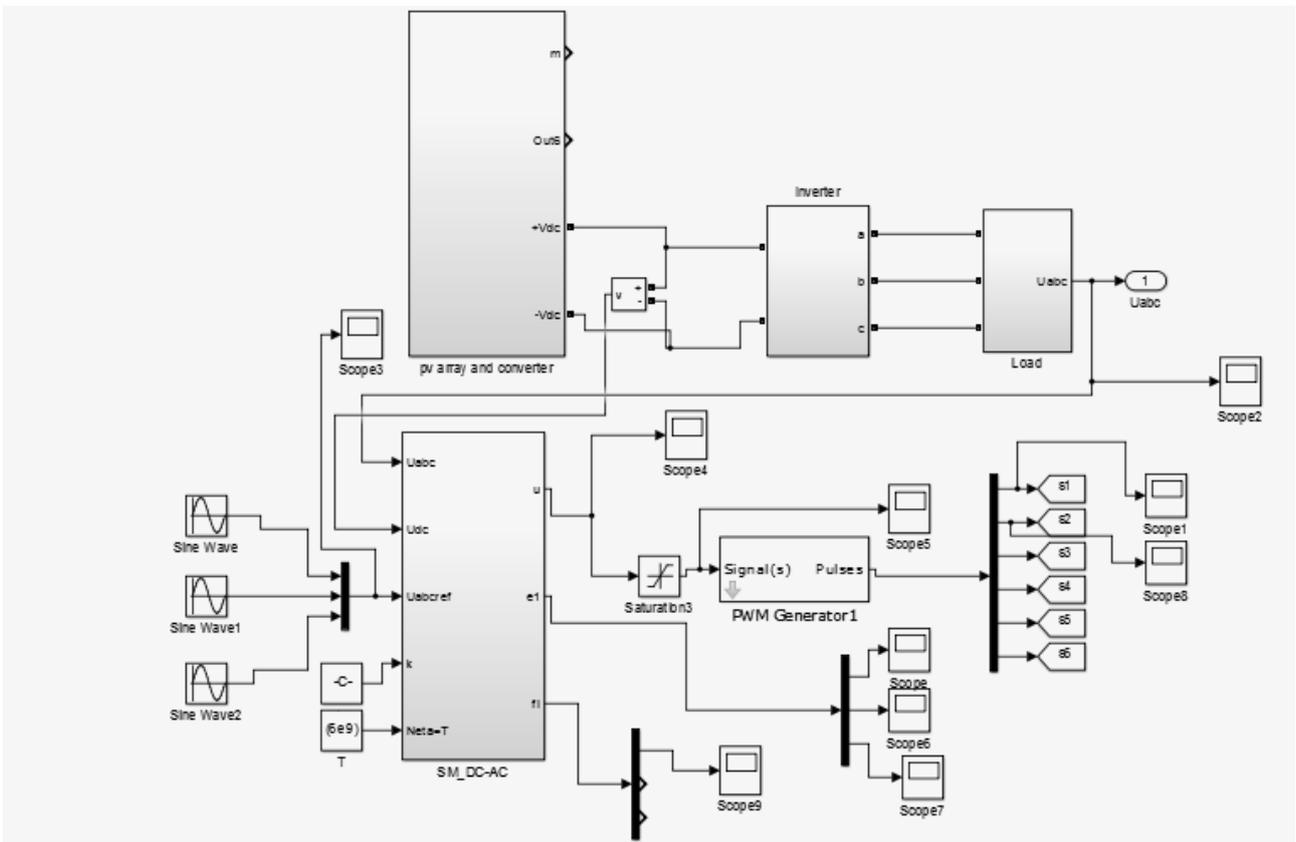


Figure (III.1): Schéma fonctionnel d'onduleur sur Simulink.

III.2.1. Le modèle PV avec convertisseur DC-DC :

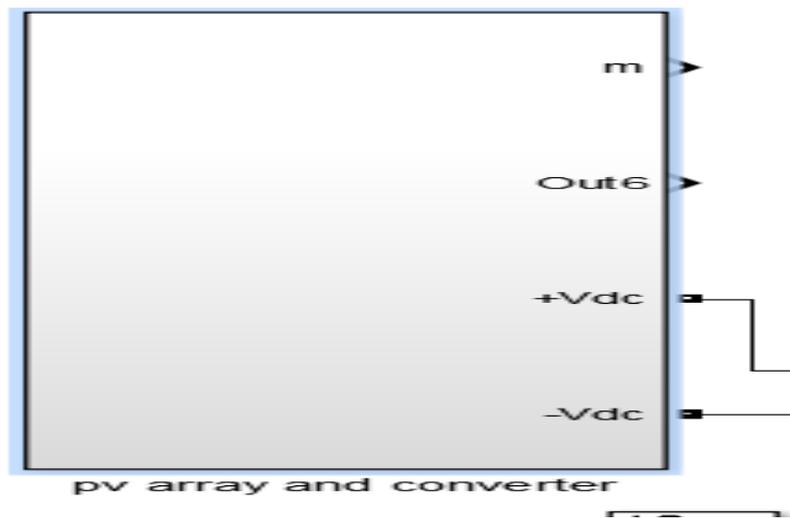


Figure (III.2): Schéma fonctionnel de model PV array avec convertisseur DC-DC sur Simulink.

III.2.2. La charge non linéaire :

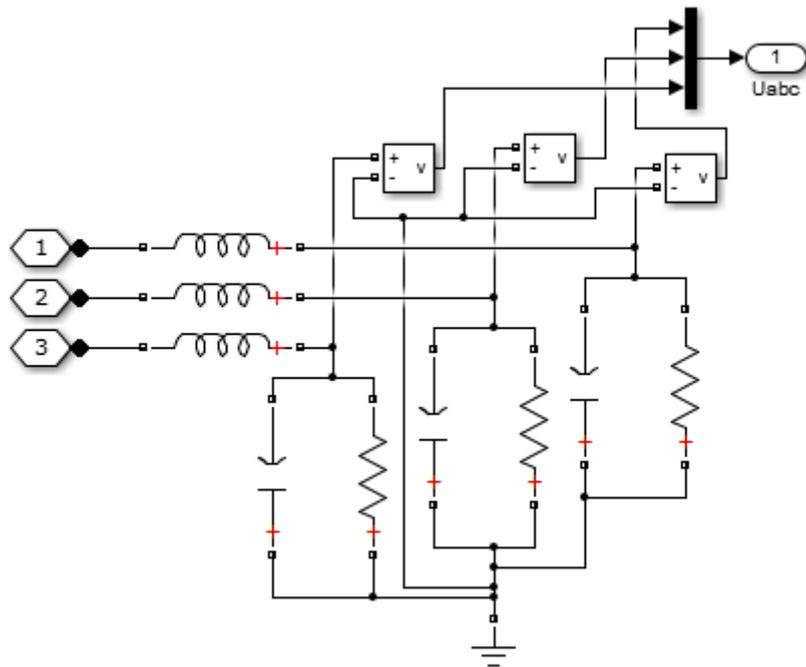


Figure (III.3): la charge non linéaire.

III.2.3.la commande de mode glissant :

La figure (3.4) présenté la commande par mode glissant en bloc dans Simulink.

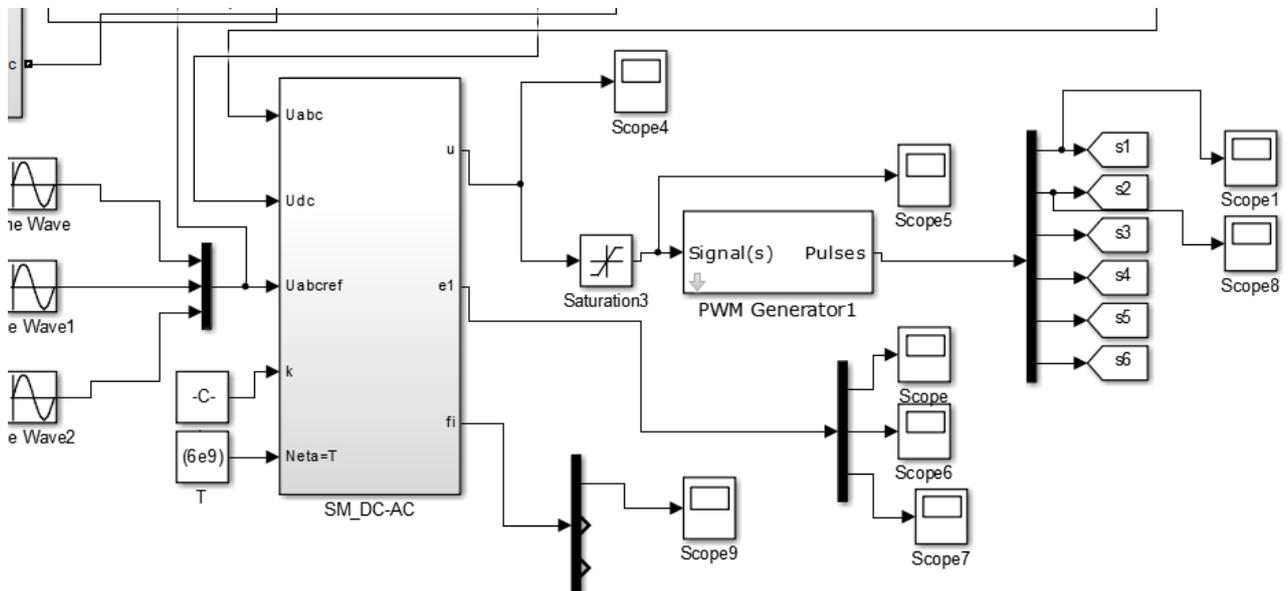


Figure (III.4): simulation de la commande mode glissant.

3.1. III.3. Analyse et simulation :

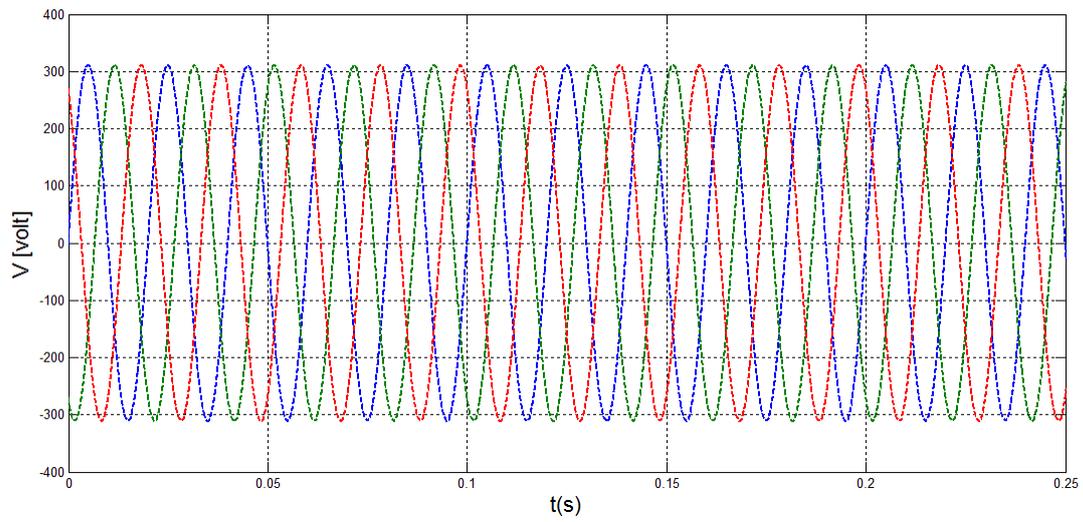


Figure (III.5): Résultats de simulation présenter la tension source (V abc source)

A $G = 900 \text{ W/m}^2$

La tension source (V abc source)

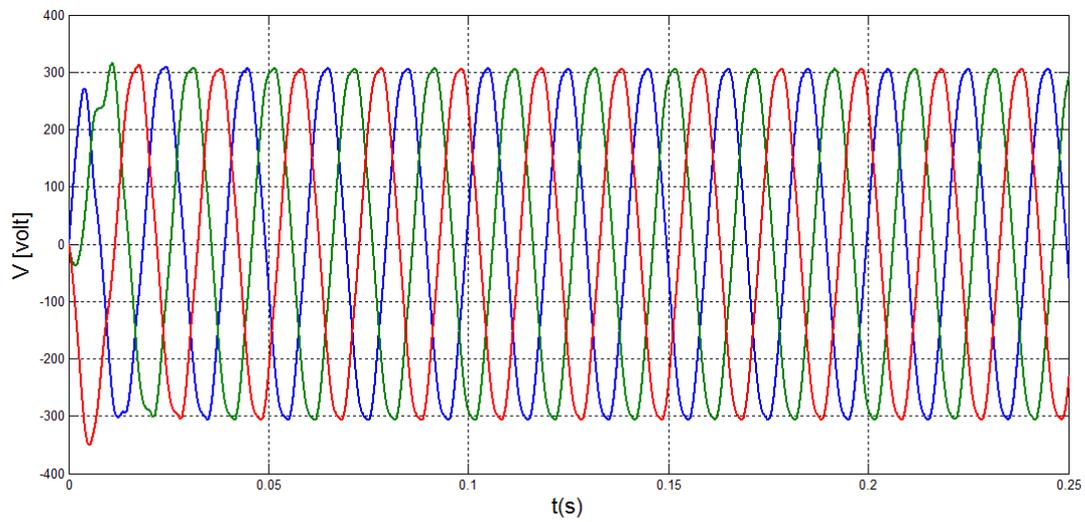
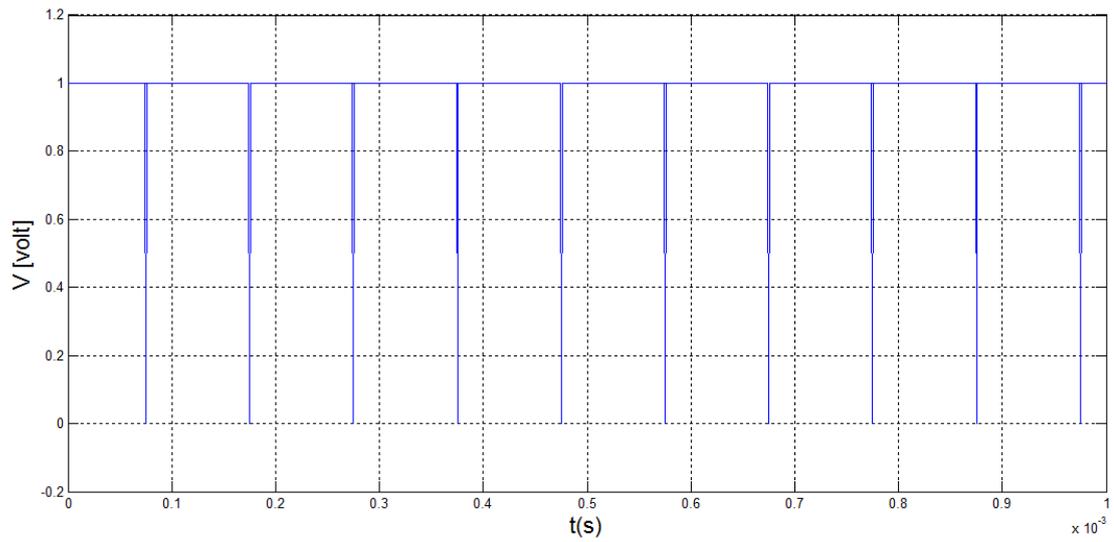


Figure (III.6): Résultats de simulation présenter la tension source (V abc source)

Signal de commande c1



Figure(III.7): Résultat de Signal de commande c1

Signal de commande c4

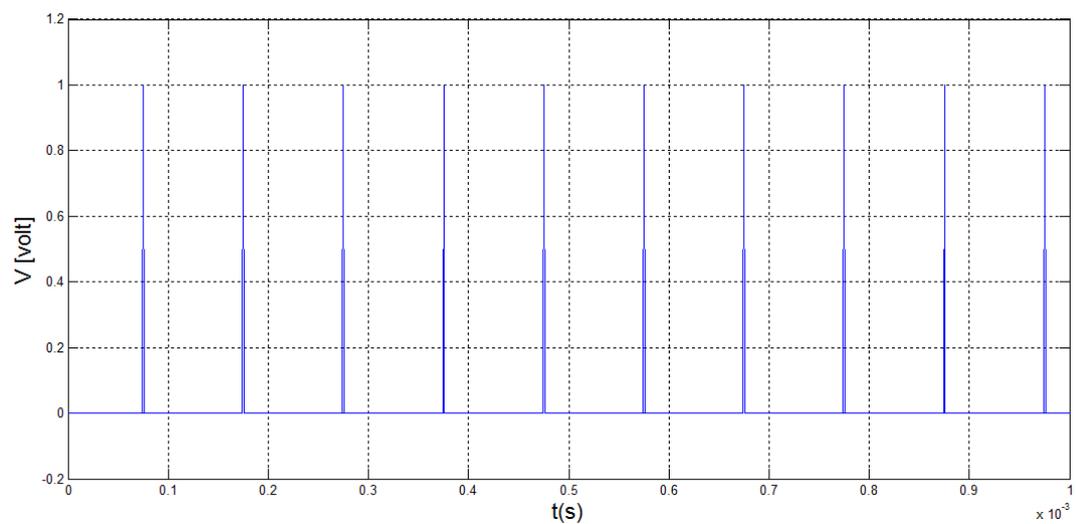
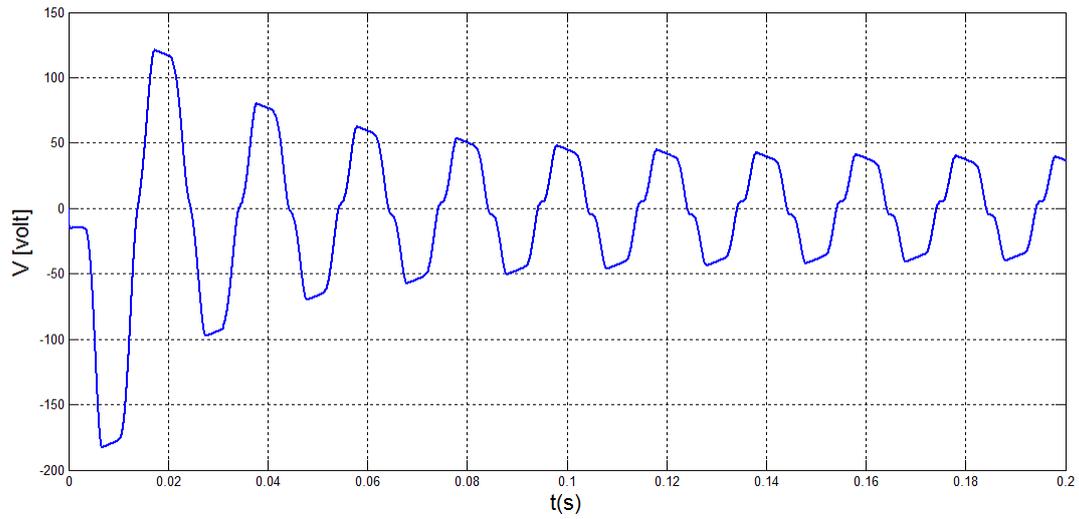


Figure (III.8): Résultat de Signal de commande c4

Calculer l'erreur uac-uacr dans les trois phases

Les figures (III.9). (III.10). et (III.11): sont représentés les allures de l'erreur $e = uac - uacr$ dans les trois phases a $G = 900 \text{ W/m}^2$

L'erreur dans première phase



Figure

(III.9): Résultat de l'erreur dans première phase uac1-uacr1

L'erreur dans deuxième phase

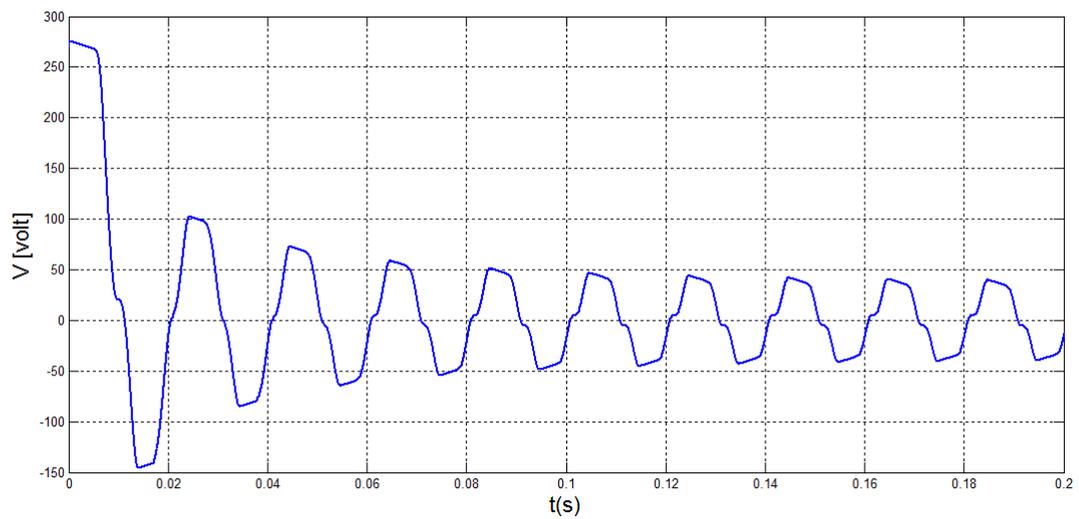


Figure (III.10): Résultat de l'erreur dans deuxième phase uac2-uacr2

L'erreur dans troisième phase

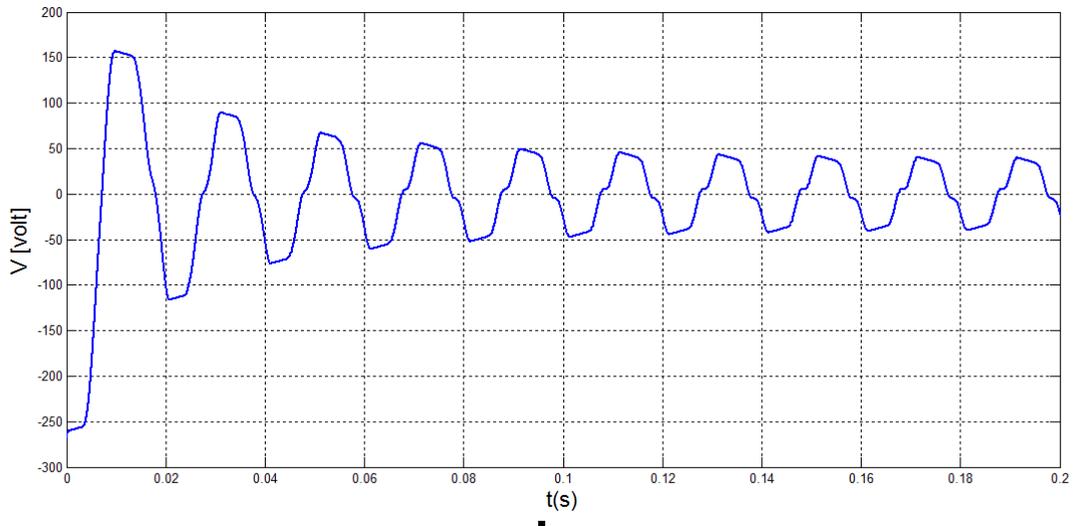
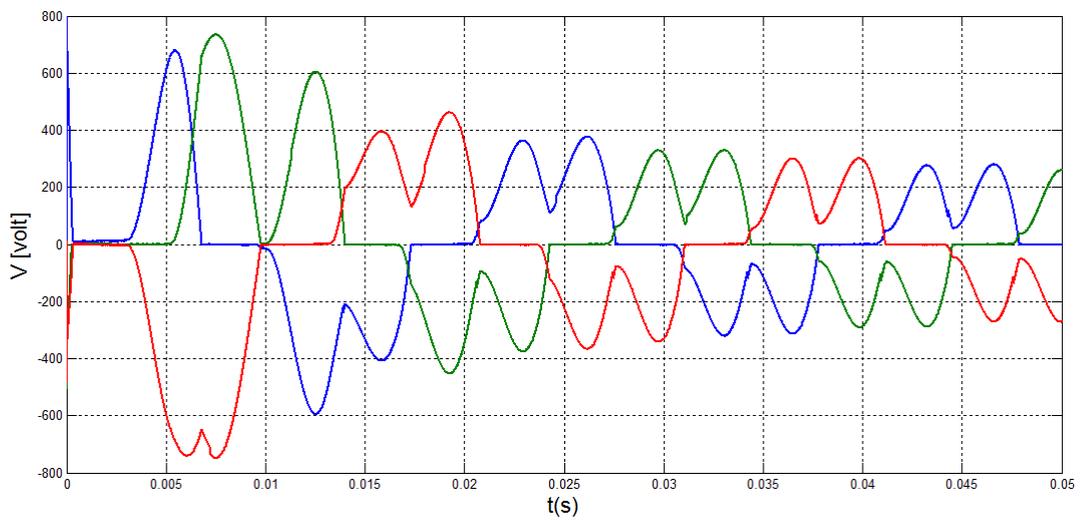


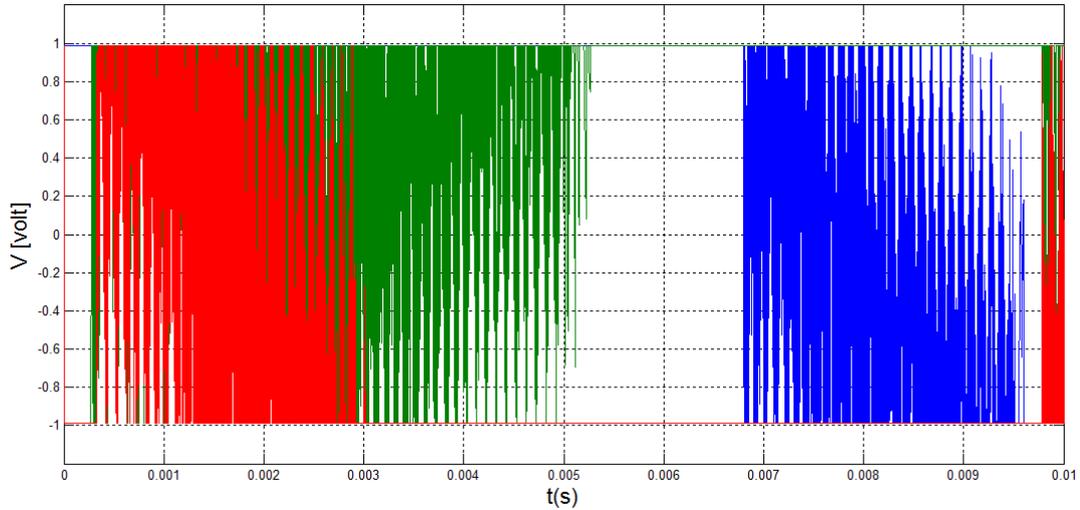
Figure (III.11): Résultat de l'erreur dans troisième phase uac3-uacr3

Les allures de signal de commande par mode glissant dans les trois phases



Figures (III.12): Les allures de signal de commande par mode glissant dans les trois phases

Les allures de signal de commande exécutable par mode glissant dans les trois phases



Figures (III.13): les allures de signal de commande exécutable par mode glissant dans les trois phases

Les figures (III.5) (III.6) (III.9) (III.10) et (III.11) montrent les performances du schéma SMC proposé, respectivement, où la ligne pointillée (u_{cr}) est la tension de référence et la ligne continue (u_c) est la tension de sortie. La stratégie SMC proposée permet d'obtenir une connexion au réseau fiable, l'erreur de poursuite de tension converge vers zéro et la stratégie proposée présente une forte robustesse aux variations de l'environnement.

A G = 1000 W/m²

La tension source (V abc source)

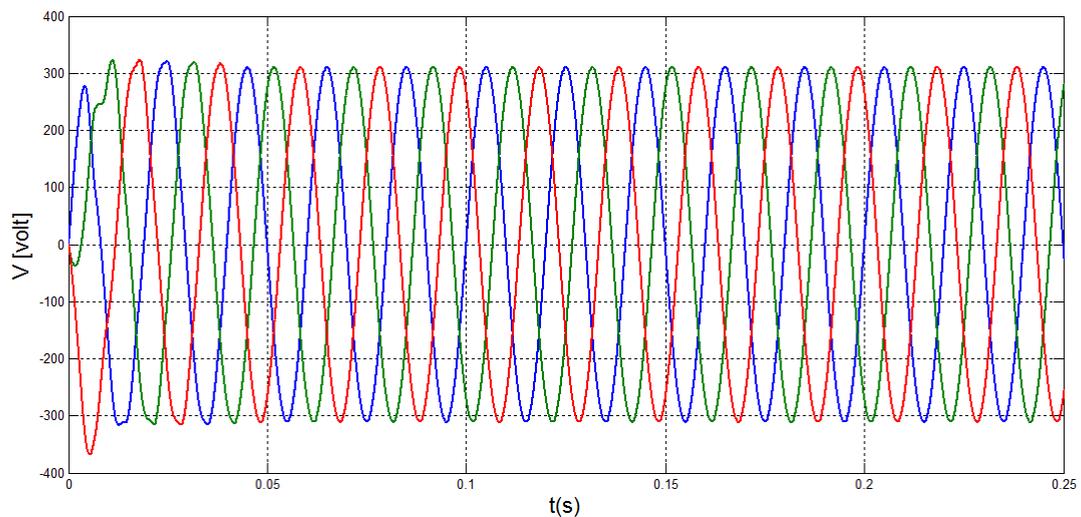
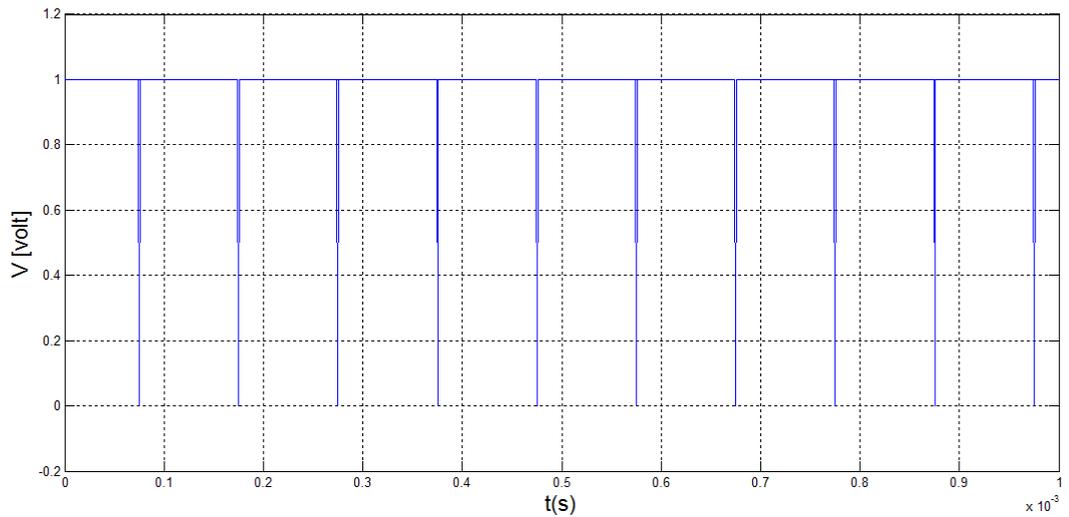


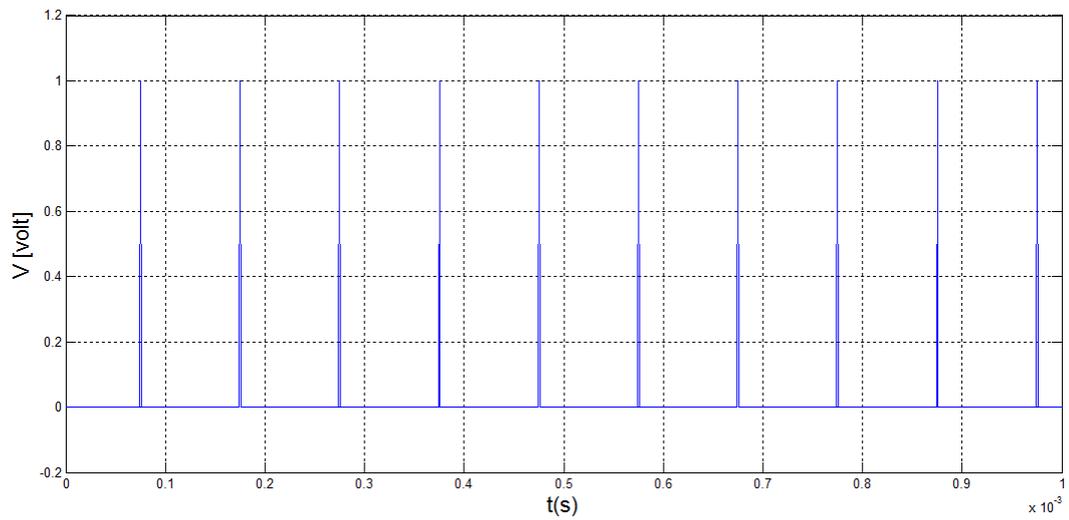
Figure (III.14): Résultats de simulation présenter la tension source (V abc source)

Signal de commande c1



Figure(III.15): Résultat de Signal de commande c1

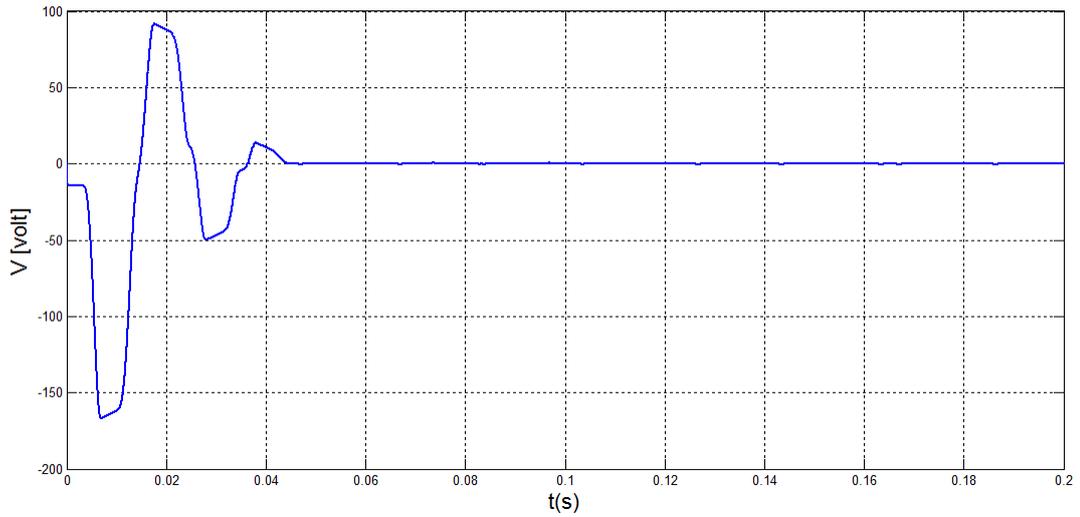
Signal de commande c4



Figure(III.16): Résultat de Signal de commande c4

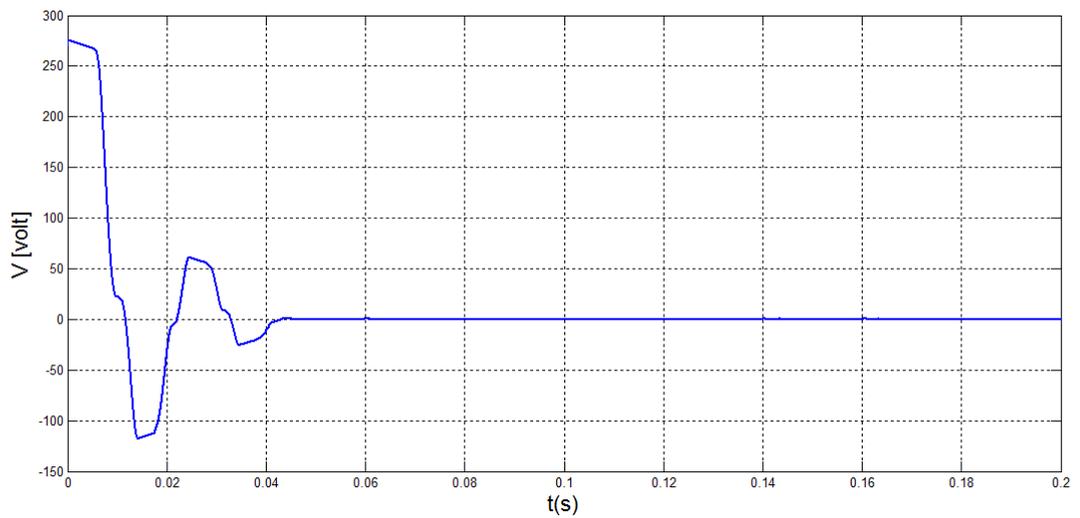
Les figures (III.17). (III.18). et (III.19): sont représentés les allures de l'erreur $e = u_{ac} - u_{acr}$ dans les trois phases a $G = 1000 \text{ W/m}^2$

L'erreur dans première phase



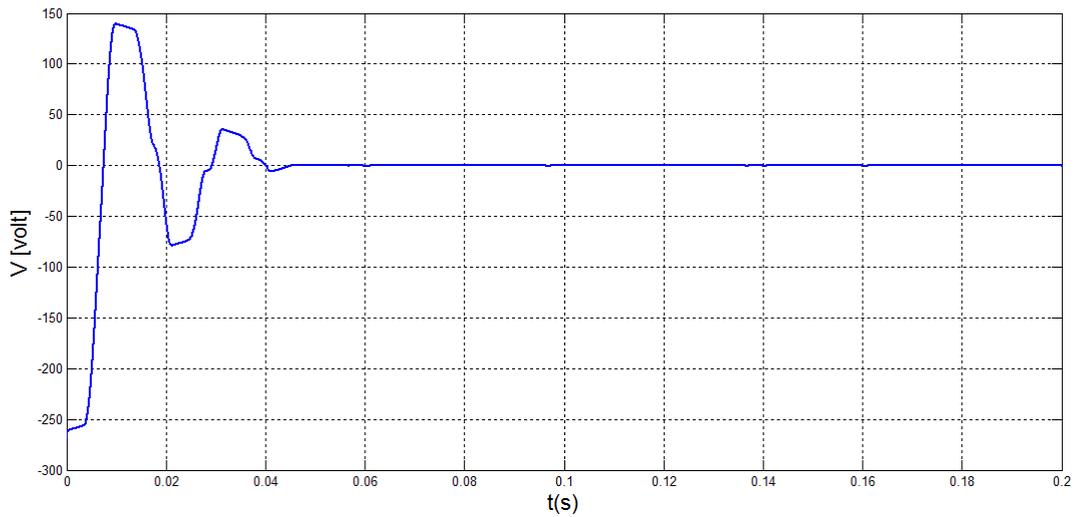
Figure(III.17): Résultat de l'erreur dans première phase uac1-uacr1

L'erreur dans deuxième phase



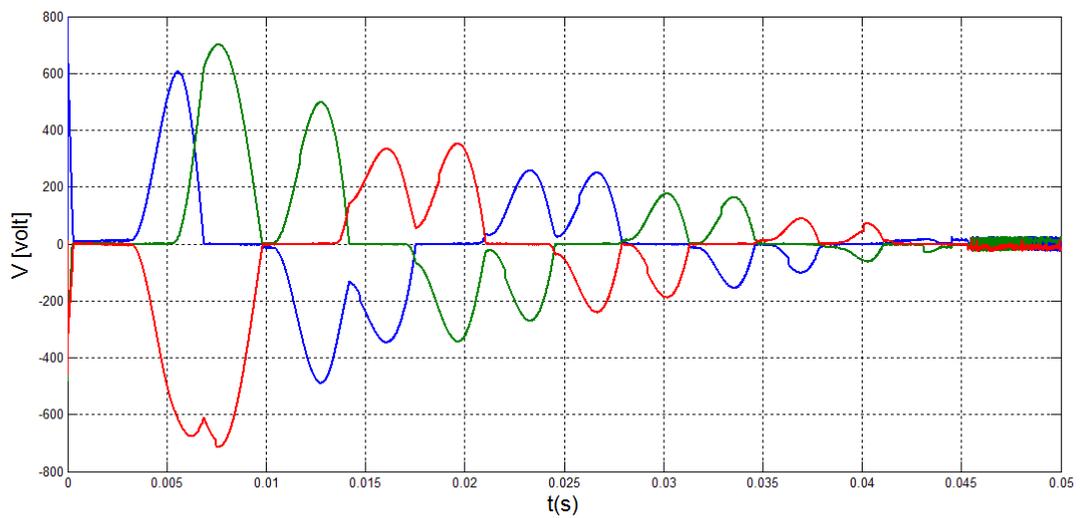
Figure(III.18): Résultat de l'erreur dans deuxième phase uac2-uacr2

L'erreur dans troisième phase



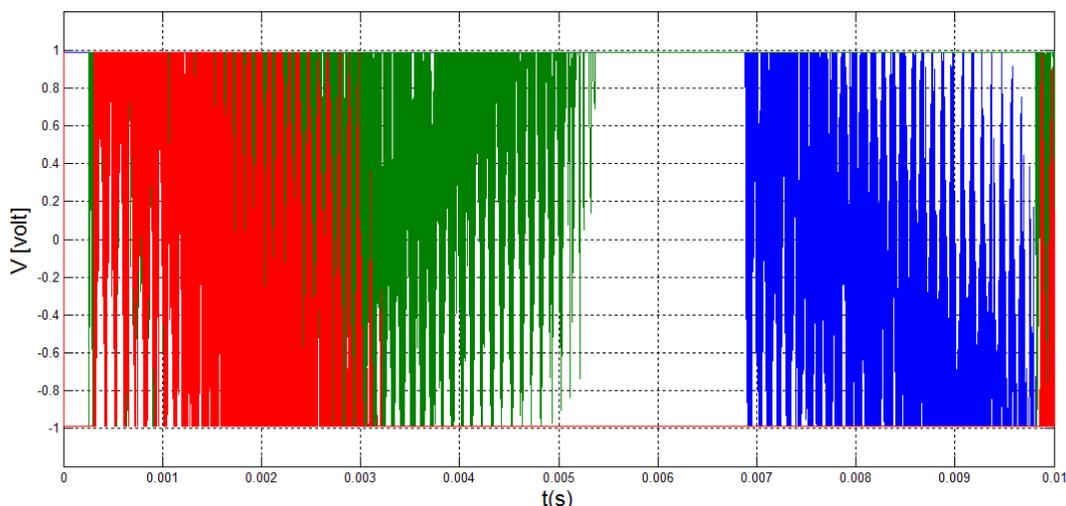
Figure(III.19): Résultat de l'erreur dans troisième phase $u_{ac3}-u_{acr3}$

Les allures de signal de commande par mode glissant dans les trois phases



Figures (III.20): Les allures de signal de commande par mode glissant dans les trois phases

Les allures de signal de commande exécutable par mode glissant dans les trois phases



Figures (III.21): les allures de signal de commande exécutable par mode glissant dans les trois phases

Les figures (III.5) (III.14) (III.17) (III.18) et (III.19) montrent les performances du schéma SMC proposé, respectivement, où la ligne pointillée (u_{acr}) est la tension de référence et la ligne continue (u_{ac}) est la tension de sortie. La stratégie SMC proposée permet d'obtenir une connexion au réseau fiable, l'erreur de poursuite de tension converge vers zéro et la stratégie proposée présente une forte robustesse aux variations de l'environnement.

A $G = 1100 \text{ W/m}^2$

La tension source (V abc source)

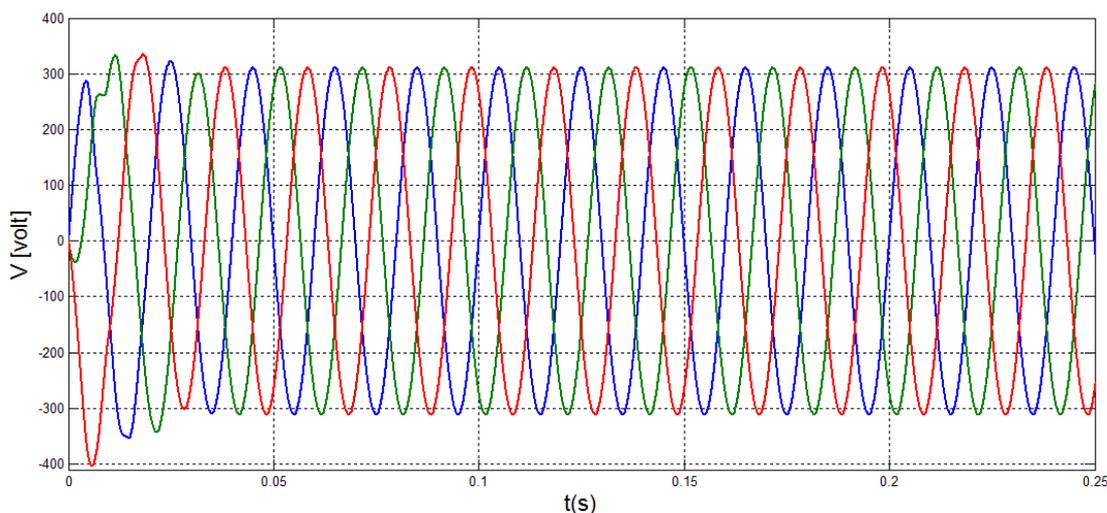
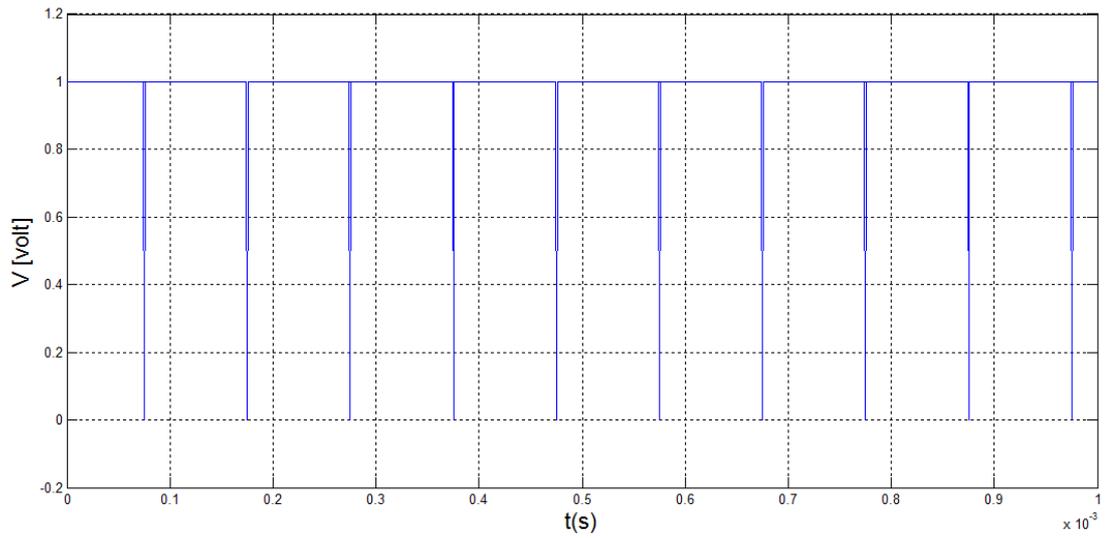


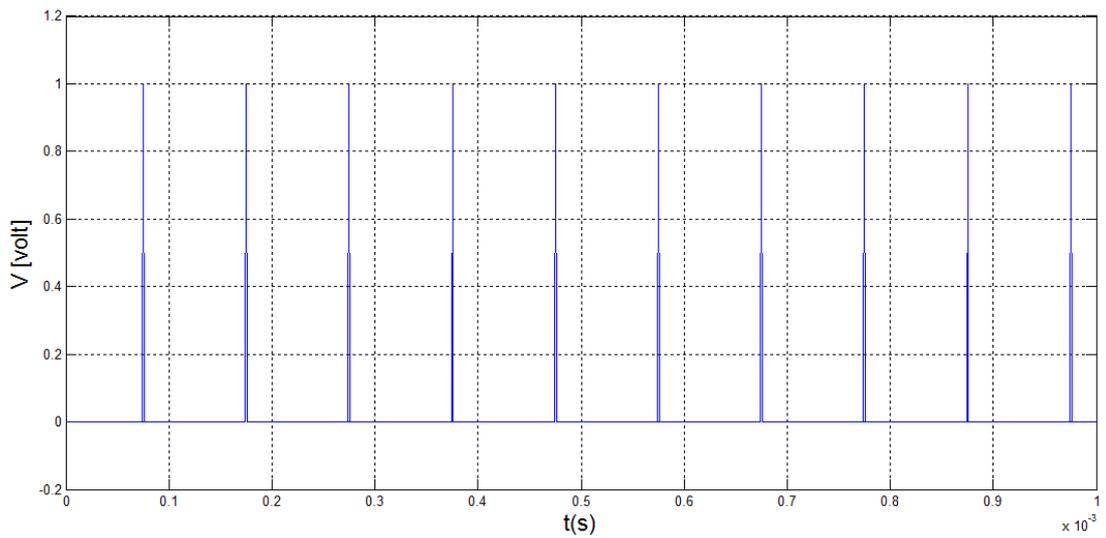
Figure (III.22): Résultats de simulation présenter la tension source (V abc source)

Signal de commande c1



Figure(III.23): Résultat de Signal de commande c1

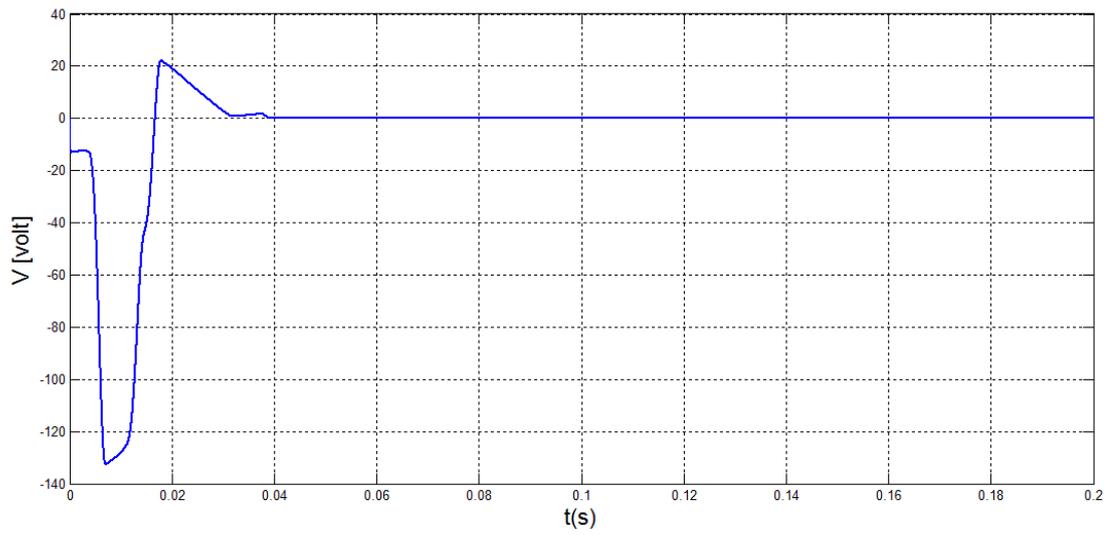
Signal de commande c4



Figure(III.24): Résultat de Signal de commande c4

Les figures (III.25). (III.26). et (III.27): sont représentés les allures de l'erreur $e = u_{ac} - u_{acr}$ dans les trois phases a $G = 1100 \text{ W/m}^2$

L'erreur dans première phase



Figure(III.25): Résultat de l'erreur dans première phase uac1-uacr1

L'erreur dans deuxième phase

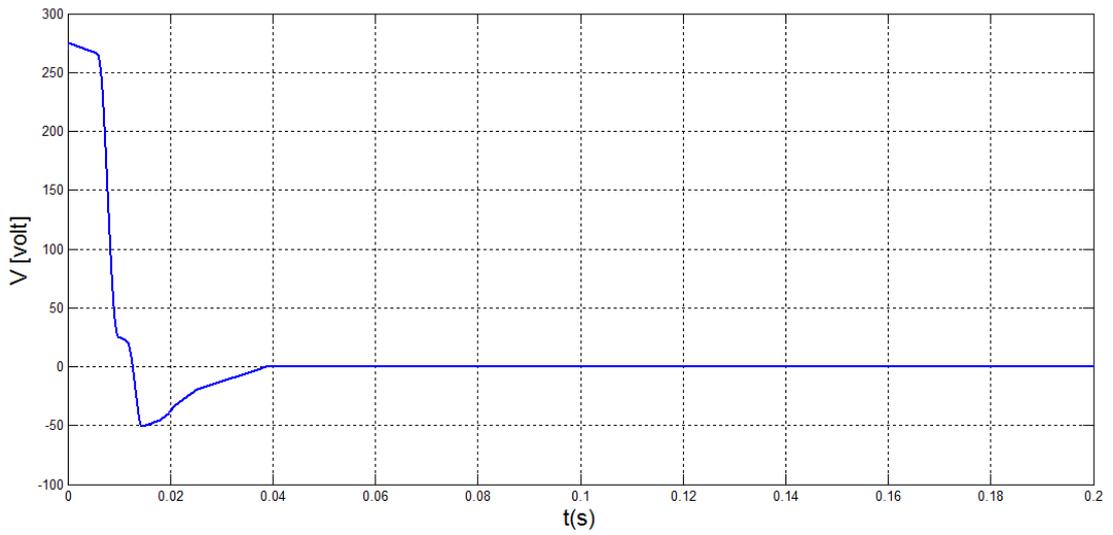


Figure (III.26): Résultat de l'erreur dans deuxième phase uac2-uacr2

L'erreur dans troisième phase

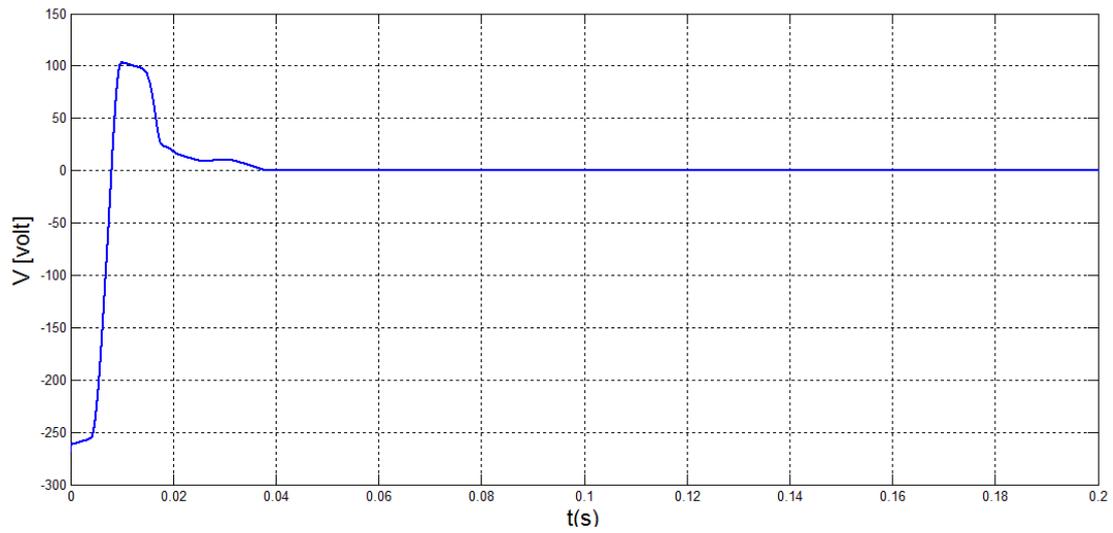
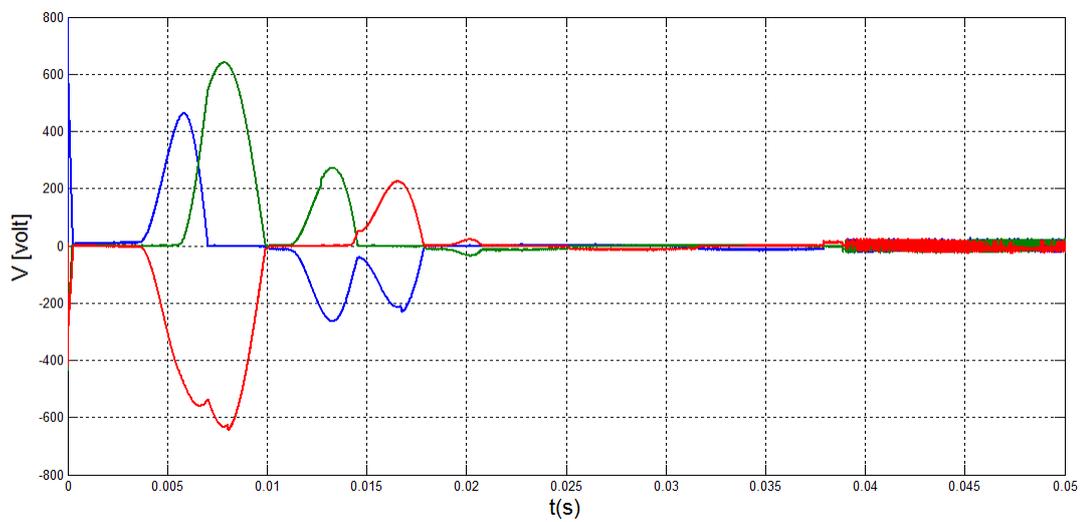


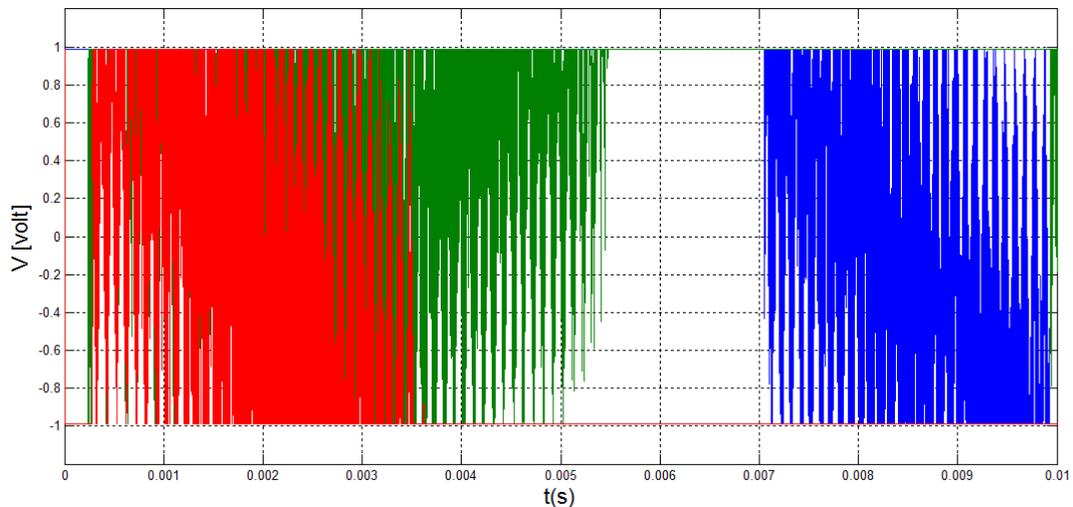
Figure (III.27): Résultat de l'erreur dans troisième phase uac3-uacr3

Les allures de signal de commande par mode glissant dans les trois phases



Figures (III.28): Les allures de signal de commande par mode glissant dans les trois phases

Les allures de signal de commande exécutable par mode glissant dans les trois phases



Figures (III.29): les allures de signal de commande exécutable par mode glissant dans les trois phases

Les figures (III.5) (III.22) (III.25) (III.26) et (III.27) montrent les performances du schéma SMC proposé, respectivement, où la ligne pointillée (u_{cr}) est la tension de référence et la ligne continue (u_c) est la tension de sortie. La stratégie SMC proposée permet d'obtenir une connexion au réseau fiable, l'erreur de poursuite de tension converge vers zéro et la stratégie proposée présente une forte robustesse aux variations de l'environnement.

III.4. Conclusion:

Dans ce chapitre on a proposé un schéma de mode glissant adaptatif intelligent pour que l'onduleur suive la tension de référence du réseau. Une stratégie SMC est présentée pour contrôler l'onduleur DC-AC, et le système est utilisé pour estimer la limite supérieure des non-linéarités du système inconnu. Le Global contrôle de mode glissant de terminal rapide est utilisé pour faire passer l'erreur de suivi dans l'onduleur à zéro dans un temps fini. Une étude de simulation est mise en œuvre pour montrer la faisabilité des stratégies proposées par rapport à la méthode SMC.

Conclusion Générale

Le travail qu'on a présenté porte sur l'analyse d'une modélisation et simulation du fonctionnement électrique d'un convertisseur DC-AC et d'appliqué une commande à structure variable qui est la commande par mode de glissement sur un convertisseur DC-AC dans un system photovoltaïque.

Nous avons établi en premier lieu une étude par présenter brièvement quelques statistiques sur la production et la croissance mondiale de l'énergie électrique ainsi que la croissance des différentes installations des centrales photovoltaïques qu'elles soient raccordées aux réseaux ou sur sites isolés, et nous détaillons aussi les étapes importantes d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables en Algérie.

Et puis on a présenté des rappels théoriques de base sur la configuration de la commande par mode de glissement (Sliding Mode), et ses conditions existence et la méthode théorique pour le calcul de la loi de commande, les domaines d'applications et les avantages, enfin on applique cette commande sur les convertisseurs DC-AC dans system PV et détermination des composantes de la commande, Cette commande est utilisée pour le contrôle du système linéaire et non linéaire.

Dans ce dernières chapitre nous avons présenté les résultats de simulation d'un convertisseur DC-AC dans un system PV présenté par le programme MATLAB/SIMULINK , et appliqué la commande par mode de glissement **avec la variation** la puissance de l'éclairement solaire , et puis faire des testes de robustesse sur le système, les résultats de la simulation ont démontré la robustesse de la commande à structure variable devant les perturbations extérieurs qu'a subie le système .

Alors, après le résultat obtenu on peut dire que la technique applique sur un convertisseur DC-AC de type mode glissant est :

Rapide (en termes de réponse)

Très précise (erreur statique presque nulle)

Ne présente pas des dépassements on régime dynamique

Robuste vis-à-vis les variations paramétrique

Références bibliographiques

- [1].S.Abouda, «contribution à la commande des systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage», thèse de doctorat, L'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 2015.
- [2]. Observ'ER, l'Observatoire des Energies Renouvelables, «La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde», Quinzième Inventaire Edition 2013.
<http://www.energies-renouvelables.org/accueil-observ-er.asp>.
- [3]. B.Hamza, «modelisation et commande d'une chaine de Conversion photovoltaïque», these doctorat 3ème cycle LMD, Université Hadj Lakhdar Batna , 2016.
- [4].A.Ysar ,M.M. Yasin « Distributed Generation Systems Based on Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell structures » Thèse de doctorat, Université de Catane Studios ècole Supèrieure di Catane 2012.
- [5]. A.Labouret, M.Villoz, Energie solaire photovoltaïque (Le manuel du professionnel), Edition DUNOD, août 2003, Paris(France).
- [6] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de Doctorat de l'ENS de Cachan (France), 09 décembre 2002.
- [7]. J.Royer, T.Djiako, E.Schiller, B.Sada SY, «Le pompage photovoltaïque: manuel e cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens», IEPF, Université d'Ottawa, EI ER, CREPA, 1998.,
- [08]. M.Rym, M.abdelkader. «Voltage oriented control applied to a grid connected photovoltaic system with maximum power point tracking technique». Am J ApplSci 2010;7:1168.
- [09].L.Mohamed Lakhdar , « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla», Thèse de Doctorat en Sciences, université de Batna, 2015.
- [10].Oi.Akihiro , « Design and simulation of photovoltaic water pumping system», Thèse de Doctorat, California Polytechnic State University San Luis Obispo, 2005.
- [11]. A. M. Zaki, S. I. Amer, M. Mostafa, « Maximum power point tracking for PV system using advanced neural networks technique», Electronics Research Institute (ERI), Dokki, Cairo, Egypt, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Volume 2, Issue 12, December 2012. Congress (IREC).
- [12] H.ALAA, "Modélisation électrothermique, commande et dimensionnement d'un système de stockage d'énergie par supercondensateurs avec prise en compte de son vieillissement : application à la récupération de l'énergie de freinage d'un trolleybus", Thèse de Doctorat de l'université de Lyon (France), 13 décembre 2010.
- [13] J.JACQUES E.SLOTINE, « Sliding controller design for non linear systems », *IJC*, vol. 2, 1984, pp 421- 434.
- [14] V.Ivanovich. _ Utkin “*Sliding modes in control and optimization*”, vol. 2, Springer Verlag Berlin, 1992.
- [15] : M. abde el Waheb et K.Youghourta, « COMMANDE PAR MODE DE GLISSEMENT D'UN CONVERTISSEUR DC/DC », *mémoire de master, Université A.MIRA - Bejaïa , 2013.*

ملخص

في هذه المذكرة ، ندرس النمذجة والتحكم في اتصال محول تيار متردد متصل في نظام كهروضوئي بشبكة الطاقة. يتكون النظام بأكمله من مولد كهربائي ضوئي ، وعاكس للجهد ، وتم إنشاء تنظيم والتحكم في المحول dc-ac من أجل استخراج الطاقة القصوى من المولد الكهروضوئي والحقن في الشبكة. تم تنفيذ عمل باستخدام برنامج المحاكاة Matlab / Simulink .

الكلمات المفتاحية: النظام الكهروضوئي ، التحكم في الوضع المنزلق ، محولات التيار المستمر / التيار المتردد

Résumé

Dans cette memoire , nous étudions la modélisation et la commande de la connexion d'un convertisseur dc-ac connecte dans système photovoltaïque au réseau électrique. L'ensemble du système est constitué d'un générateur photovoltaïque, onduleur de tension, Une régulation et une commande du convertisseur (DC-AC) est établit dans le but d'extraire le maximum de puissance d'un générateur photovoltaïque et de l'injecté au réseau. Les travaux de simulation ont été effectués sous le logiciel Matlab/Simulink.

Mots clés : Système photovoltaïque, Commande par mode glissant, Convertisseurs DC/AC.

Abstract

In this thesis, we study the modeling and control of the connection of a connected AC transformer in a grid-electric photovoltaic system. The whole system consists of a photovoltaic generator, a voltage inverter, and a regulation and control converter (DC-AC) is created in order to extract maximum power from the photovoltaic generator and inject into the grid. Simulations were carried out using Matlab/Simulink software.

Keywords: photovoltaic system, sliding mode control, DC and AC transformers.