REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de Technologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière :Electotechnique
Spécialité : Réseaux Electriques

Amélioration de l'énergie électrique d'un réseaux basse tension par le système de filtrage actif connecté par une source photovoltaïque commandé par intelligence artificielle

---

Présenté par :

Mme SAFAR BOUNI Samira

Proposé et Dirigé par :

Dr GACEMI Abderrezak

Dr MORSLI Abdelkader

Promotion juin 2019

Remerciements

Le plus grand Merci revient à ***Allah*** *qui lui seul m'a guidé dans le bon sens durant ma vie et qui m'a aidé à réaliser ce modeste travail.*

Je tiens à remercier mon promoteur ***''Dr. GACEMI Abderrazek '****, Docteur à* ***l'université*** *D_R. YAHIA Fares de Médéa ainsi mon Co-promoteur* ***Dr.MORSLI Aek*** *pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continu tout le long de la réalisation de ce travail et qui n'ont pas cessé de me donner leur conseils et leur directives, et d'avoir la gentillesse de lire et corriger ce travail.*

.

J'exprimes mes profondes gratitudes à ***mes parents*** *pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont en duré.*

Mes sincères remerciements aux ***messieurs les membres du jury*** *pour l'honneur qu'ils me fait en participant au jugement de ce travail.*

Je remercie également ***tous les enseignants de département génie électrique*** *de l'université D_R. YAHIA Fares de Médéa qui ont participé à ma formation* ***Mlle BOUKIRAT Samia,Dr MEDJEBER***

Enfin je tient à exprimer mes reconnaissances à ***tous mes amis et collèges*** *pour tout le soutien moral et matériel* ***Mr MELLATI Med ,Mme MOUZAOUI Faiza.***

SAFAR BOUNI Samira

.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

***A mes parents ainsi mon mari et mes enfants** qui ont sacrifié leur vie pour ma réussite, et pour leurs encouragements et leur patiences pendant toute la durée de mes études.*

A mes sœurs ,et frères.

A mes tantes, mes oncles

A toute la famille SAFAR BOUNI.

Sans oublier tous mes enseignants qui ont contribué et participé à ma formation, en particulier :

Dr.MORSLI

Dr.MEDJEBER.

Dr.DINE

Dr .ABDI

Mlle BOUKIRAT

A toute mes amis et mes collègues .

A l'ensemble des étudiants de ma promotion, particulièrement ceux d'électrotechnique.

A tous ceux que j'aime, qui m'aiment et tous ceux que m'ont connu.

A tous ceux qui m'ont aidé pour réaliser ce mémoire.

Samira

Résumé

ملخص

الهدف من عملنا هو دراسة تنفيذ خوارزميات التعويض باستخدام مرشح نشط متوازي مع هيكل الجهد ، من أجل تخفيف التيارات التوافقية الناتجة عن الأحمال غير الخطية في الشبكات الكهربائية المشوهة.

يقدم هذا العمل طريقة لتقليل معدل التشوه التوافقي (THD) للنهج الحالي للمصدر وغيره من الطرق لتحسين عامل القدرة بواسطة مرشح طاقة نشط متوازي. لهذا ، سوف أقدم بنية من العاكس من مستويين من ناحية ، وتقنيات التحكم المختلفة بين الكلاسيكية والذكية من ناحية أخرى. للقيام بذلك ، تم إنشاء محاكاة مصغرة للنموذج الأولي للسيطرة على FAP بواسطة طرق P-Q و RN مدعومة من مصدر PV.تسمح لنا نتائج المحاكاة بفهم أهمية زيادة مستوى العاكس واستراتيجية التحكم المستخدمة لتحسين THD وعامل القدرة في نفس الوقت.تم إجراء المحاكاة تحت برنامج Matlab-Simulink 2013 مع SimPowerSystem بإصدار 8.1.0.604.

الكلمات المفتاحية

خوارزميات التعويض ,نشط متوازي , مرشح,الجهد,التيارات التوافقية ,الشبكات الكهربائية ,معدل التشوه التوافقي ,عامل القدرة ,وتقنيات التحكم ,محاكاة مصغرة .

Résumé :

Le but de notre travail est l'étude de la mise en œuvre des algorithmes de compensation à l'aide de filtre actif parallèle à structure de tension, pour la mitigation les courants harmoniques générés par les charges non linéaires dans les réseaux électriques distordus. Ce travail présente une approche pour diminuer le taux de distorsion d'harmoniques (THD) du courant de source et d'autre approche pour améliorer le facteur de puissance par un filtre actif parallèle de puissance. Pour cela, je vais présenter d'une structure d'onduleur de deux niveaux d'une part, et les différentes techniques de commande entre classiques et intelligentes d'une autre part. Pour se faire, une simulation de prototype miniature d'une commande d'un FAP par les méthodes P-Q et RN alimenté par source PV a été établie .Les résultats de simulation nous permettent quelle importance d'augmenter le niveau de l'onduleur d'une part et la stratégie de commande utilisé d'autre part pour l'amélioration du THD et le facteur de puissance en même temps.La simulation a été réalisée sous logiciel Matlab-Simulink 2013 avec SimPowerSystème d'une version de 8.1.0.604.

Résumé

Mots clés :

Algorithmes, filtre actif parallèle , tension, courants harmoniques, charges, linéaires, réseaux électriques, taux de distorsion, facteur de puissance ,onduleur,commande,simulation,prototype miniature ,FAP,méthodes P-Q et RN ,PV,source ,THD .

Abstact:

The objective of our work is the study of the implementation of compensation algorithms using parallel active filter with voltage structure, for the mitigation of harmonic currents generated by nonlinear loads in distorted electrical networks. This work presents an approach to reduce the harmonic distortion rate (THD) of the source current and other approaches to improve the power factor by a parallel active power filter. For this, I will present a structure of inverter of two levels on the one hand, and the different control techniques between classical and intelligent on the other hand. To do this, a miniature prototype simulation of a control of a FAP by the P-Q and RN methods powered by PV source has been established.The simulation results allow us to understand the importance of increasing the level of the inverter and the control strategy used for the improvement of the THD and the power factor at the same time.The simulation was performed under Matlab-Simulink 2013 software with SimPowerSystem with a version of 8.1.0.604.

Key words:

algorithms ,parallel active filter ,voltage,electrical networks,distortion rate ,harmonic,THD,source,power factor ,control,technique, miniature prototype,simulation ,FAP,P-Q and RN methods ,PV ,results .

Sommaire

Chapitre I l'état de l'art : pollutions du réseau électrique et leurs solutions

I.1. Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2. Les harmoniques ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.1. Définition ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de la fréquence fondamentale. **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.2. Inters-harmoniques ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.3. Infra-harmoniques ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.4. Composante harmonique individuelle (ou composante harmonique de rang h) : **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.5. Distorsion harmonique totale (THD) ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.2.5.1. THD en courant ou en tension ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.3. Qualité de l'énergie électrique ..... **Erreur ! Signet non défini.**

- La fréquence ; ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- l'amplitude des trois tensions ; ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- la forme d'onde ..... **Erreur ! Signet non défini.**
- le déséquilibre. ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.4. Origine des harmoniques et perturbation sur le réseau électrique **Erreur ! Signet non défini.**

I.4.1. Perturbations induites par les charges non-linéaires «courant et tension harmoniques» **Erreur ! Signet non d**

I.4.2. Circulation des courants harmoniques dans les réseaux ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5. Normes imposées sur le THD ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.1. Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement **Erreur ! Signet non dé**

I.5.2. Limites sur l'émission harmonique des équipements ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.5.3. Guide pour la mesure des harmoniques ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.6. Solutions de base pour atténuer les harmoniques ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.1. Positionner les charges polluantes en amont du réseau ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.2. Regrouper les charges polluantes ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.3. Séparer les sources ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.4. Utiliser des transformateurs à couplages particuliers ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.6.5. Placer des inductances dans l'installation ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.7. Filtrage des harmoniques ..... **Erreur ! Signet non défini.**

I.7.1. Filtre passif ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Sommaire

I.7.1.1. Applications typiques ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.7.1.2 Principe de fonctionnement ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.7.2. Filtre actif (ou compensateur actif) ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.7.2.1. Applications typiques ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.7.2.2. Principe de fonctionnement ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.7.3. Filtre hybride ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.7.3.1. Applications typiques ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.7.3.2. Principe de fonctionnement ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.8. Critères de choix ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.8.1. Le filtre passif ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.8.2. Le compensateur actif ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.8.3. Le filtre hybride ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.9. Etat de l'art des filtres actifs parallèles ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.10. Solution de dépollution des réseaux électriques ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.10.1. Solutions traditionnelles ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.10.2. Solutions modernes ..... **Erreur ! Signet non défini.**
I.11. Conclusion ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre II Le système photovoltaïque

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.

Chapitre III Commande d'un FAP par les méthodes P-Q et RN alimenté par source PV

III.1. Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.2. Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.3. Généralités sur les MLI triphasées ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III. 4.Stratégies de commande classique ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.5.Méthode des puissances instantanées active et réactive (PQ) . **Erreur ! Signet non défini.**
III.5.1. Modélisation de la méthode PQ ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.6. Commande par régulateur Proportionnel-Intégral avec la méthode PQ (PQ-PI)**Erreur ! Signet non d**

Sommaire

III.6.1 Régulateur PI du courant de filtre avec la commande MLI à porteuse triangulaire **Erreur ! Signet non défin**

III.6.2 Schéma de principe de la commande..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7. Réseau de neurone :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.1. Le neurone biologie :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.2 Le corps cellulaire ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.3. Les dendrites..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.4 L'axone ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.5 Le neurone artificiel :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.6. Les composants d'un réseau de neurone :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.7. Les différentes structures des réseaux de neurones :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.7.1. Réseau de neurones multicouches :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.7.2. Réseau à connexions locales :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.7.3. Réseau à connexions récurrentes :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.7.4. Réseau à connexions complètes :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.8. Les fonctions d'activations :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.9. Les techniques d'apprentissage :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.9.1. Apprentissage supervisé..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.7.9.2. Apprentissage non supervisé :..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.8.Conclusion ..... **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre IV Résultats de simulation et interprétations

IV.1. Introduction ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2. La simulation du système de FAP ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.1 Résultats de simulation..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.1.1 Avec une source continue E=840 V ..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.2.1.2 Avec une source photovoltaïque V_{dc}=840 V..... **Erreur ! Signet non défini.**

IV.3 Conclusion..... **Erreur ! Signet non défini.**

Liste des figures

Chapitre I : Etat de l'art.

Figure I.1 : Harmoniques (a) et interharmoniques (b)……..……2

Figure I.2 : Représentation des inters et infra harmoniques…….…….3

Figure I.3 : Exemples de formes d'onde de courant déformé monophasées (en haut) et triphasées (en bas)…….…….3

Figure I.4 : Exemple d'un courant contenant des harmoniques et décomposition en rangs harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9…….…….…….5

Figure I.5 : Schéma unifilaire représentant l'impédance du circuit d'alimentation vue par l'harmonique de rang h…….…….…….…….……..7

Figure I.6-a : Schéma d'une installation alimentant une charge non-linéaire, pour laquelle seuls les phénomènes liés à la fréquence 50 Hz (fréquence fondamentale) sont pris en considération…….…….…….……....…8

Figure I.6b : Schéma de la même installation, pour laquelle seuls les phénomènes liés à la fréquence de l'harmonique de rang h sont pris en compte……..……8

Figure. **I.7 :** Circulation des courants harmoniques dans un réseau…….……...…9

Figure I.8 : Alimentation le plus en amont possible des charges non-linéaires (schéma conseillé)…….…….…….…….……...11

Figure I.9: Regroupement des charges non-linéaires et alimentation le plus en amont possible (schéma conseillé)…….…….…….……..…12

Figure I.10 : Alimentation des charges polluantes par transformateur séparé……12

Figure I. 11 : L'utilisation d'un transformateur Dyd stoppe la propagation des harmoniques de rangs 5 et 7 vers l'amont du réseau…….…….…….…….……..…13

Figure I.12 : Principe d'utilisation d'un filtre passif…….…...…14

Figure I. 13: Principe d'utilisation d'un filtre actif…….…….……15

Figure I. 14 : Principe d'utilisation d'un filtre hybride……..…16

Chapitre II : Le système photovoltaïque.

Figure II.1: Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général…….21

Figure II.2 : Schéma électrique de principe de fonctionnement photovoltaïque……..22

Figure II.3 : Structure d'une cellule solaire…….……...23

Figure II.4 : Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque……..….24

Figure II.5 : Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque……..……..27

Figure II.6 :L'influence de l'éclairement sur la caractéristique *I=f(V)*……..……28

Figure II.7 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V)……...…….…..28

Figure II.8 : L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V)…….……...…….29

Figure II.9 : L'influence de la température sur la caractéristique P=f(V)……...…….…29

Figure II.10 : Association de N modules solaires en série…….…..…..30

Figure II.11 : Association de N_p modules solaires en parallèle……..30

Figure II.12 : Association mixte N_s x N_p modules solaires…….……..…31

Figure II.13 : Panneau photovoltaïque…….……32

FigureII.14 : Schéma électrique du convertisseur boost. …….……..…33

Figure II.15 : Schéma équivalent du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert…..……33

Figure II.16-a : Schéma équivalent du hacheur survolteur, pour K est fermé……33

Figure II.16-b : Schéma équivalent du hacheur survolteur, pour K est ouvert……..……34

Figure II.17 : Allure des variables dynamiques……..……35

Figure II. 18 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur…….…38

Figure II. 19 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur……..……39

Figure II.20 : Caractéristique de la tension et des courants……...……40.

Figure II.21 Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un Convertisseur Buck [16]…….……..……41

Figure II.22 Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur……..…..41

Figure II.23 Caractéristique de la tension et du courant du buck-boost…….……42

Figure II.24 Schéma synoptique d'un système de poursuite du point de puissance maximale……..…….43

Figure II.25 Classification des méthodes MPPT…….……..…..44

Figure II.26 Organigramme de l'algorithme MPPT P&O…….…….45

Figure II.27 Principe de la recherche du PPM selon la méthode P&O……..46

Figure II.28 Divergence de l'algorithme PO en cas de changements brusque des conditions de travail……..…..……..48

Chapitre III: Commande d'un FAP par les méthodes P-Q et RN alimenté par source PV.

Figure III.1 : Bras d'une phase d'un onduleur de tension : (a) Deux niveaux (b) , Trois niveaux et (c) N niveaux……..…….…….51

Figure III.2 : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux…….…….……..51

Figure III.3 : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux avec deux bus continus…..52

Figure III.4: Stratégie triangle-sinusoïdale de M LI (m =6, r = 0,8)…….……55

Figure III.5 : La tension simple va et son spectre de l'onduleur triphasé à deux niveaux commandé par la stratégie triangle-sinusoïdal pour m=6 avec r=0.8 et f=50Hz……55

Figure III.6 : Schéma synoptique de commande indirecte du filtre actif triphasé……..55

Figure III.7 : Schémade principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives de p et q…….…….…….……...…..……..58

Figure III.8 :*Algorithme p-q d'extraction des courants harmoniques*……58

Figure III.9 : Signal MLI à porteuse triangulaire du régulateur PI de courant de filtre actif parallèle de la phase (a)…….…...59

Figure III.10 : Schéma de principe du filtrage actif parallèle à deux niveaux commandé par PQ-PI……..……..…60

Figure III.11 : Le modèle d'un neurone biologique……61

Figure III.12 : Neurone Artificiel……...……62

Figure III.13 : Réseau de neurones multicouches…….……..63

Figure III.14:Réseau à connexions locales……...……..64

Figure III.15 : Réseau à connexions récurrentes……64

Figure III.16:Réseau à connexions complètes……...….65

Figure III.17: Quelque fonction d'activations……..……...65

Chapitre IV: Résultats de simulation et interprétations

Figure IV.1 : Schéma de principe du système de filtrage actif parallèle……..…..…67

Figure IV2 : Comparaison entre les deux techniques de commande du FAP, PI et RN avec E ……..70

Figure IV.3 : Comparaison entre les deux techniques de commande du FAP, PI et RN avec PV…….……..……..……..……..……..……..……..……..…72

Figure IV.4 : Tensions du panneau PV (V_{PV}) et du convertisseur DC-DC (V_{dc})……..…. 72

Figure IV.5 : Rapport cyclique D…….……..……..……...….73

Figure IV.6 : Impulsion G délivrée par MLI…….……..……...73

Figure IV.7 : Puissance P_{PV}…….……..……..……..……..74

Symboles et abréviation

THD : Taux de Distorsion Harmonique

RMS :**R**oot Mean Square (**R**acine-**M**oyenne-**C**arré)

F_{dis} :Facteur de distorsion

F_c : Facteur de crête

F_p : Facteur de puissance

S : Puissance apparente [VA]
P : Puissance active [W]

Q : Puissance réactive [VAR]

D : Puissance de déformation [VAD]

U_h : tension harmonique

Z_h : impédance harmonique

I_h : courant harmonique

CEI : Commission Electroniques International

GTO : thyristor à extinction par la gâchette (Gate Turn-Off Thyristor) IGBT : transistor bipolaire à grille isolée (Insulated Gate Bipolar Transistor) FAP : Filtre Actif Parallèle

FAS : Filtre Actif Série

UPQC : Unified Power Quality Conditioner

THDi : Taux de distorsion harmonique « intensité »
THDu : Taux de distorsion harmonique « tension »

DSP : Processeur de signal numérique (Digital signal processor)

HVDC : Courant continu haute tension (High-voltage direct current)
KVA : Kilo Volt Ampère

MVA : Méga Volt Ampère

NPC : Neutre point-serré (Neutral-Point Clamped)
IGCT : (Integrated Gate-Commutated Thyristors)

Y_0 : valeur de la composante continue généralement nulle et considérée comme telle ci-après,

Y_h : valeur efficace de l'harmonique de rang h,

ω : vitesse angulaire de la fréquence fondamentale,

ϕ_h : phase de la composante harmonique à t = 0.

THD : taux harmonique distorsion

CEI : Commission ElectrotechniqueInternationale

IEC :International Electrotechnical Commission

CENELEC : Comité Européende Normalisation Electrotechnique

UTE : Union Techniquede l'Electricité.

CEF : Comité Electrotechnique Français

CE :Communauté Européenne.

RMS= **R**oot Mean Square (**R**acine-**M**oyenne-**C**arré): Racine carrée de la valeur Moyenne **du signal** au carré.

L'électronique de puissance est un domaine relativement nouveau et en pleine développement . l'évolution technologique importante a impliqué une utilisation accrue des dispositifs d'électronique de puissance moderne dans diverses applications comme la commande électrique des moteurs, les alimentations de secours de puissance, le chauffage par induction électrique, les applications dédiées la traction électrique, la compensation des harmoniques, etc. Ce large succès a mobilisé les scientifiques académiques d'une part et d'autre part les industriels qui ont apporté des améliorations précieuses dans la technologie des interrupteurs de puissance à base de semi-conducteurs et à leurs commandes. Ces avancées ont permis une large diffusion à tout niveau de puissance et dans de très nombreux secteurs d'activités

Cependant, cette multiplication de charges non linéaires, surtout les redresseurs fortement utilisés en tête des systèmes de conversion de puissance entrainent une dégradation significative de la qualité de l'énergie. Ainsi le réseau d'interconnexion est dit pollué par la génération de composantes harmoniques et de puissance réactive. Dans les systèmes triphasés, ils peuvent causer des déséquilibres en entrainant des courants excessifs au niveau du neutre. Ces courants excessifs, les harmoniques injectés, la présence de puissance réactive, les déséquilibres et autres problèmes générés par ce type de charge conduit à un affaiblissement du rendement global du système et du facteur de puissance. Ils sont aussi la cause des perturbations au niveau des consommateurs et d'interférences dans les réseaux de communication de proximité.

La croissance importante de la pollution harmonique a conduit les chercheurs en électronique de puissances et en automatique à développer et à mettre au point des solutions plus efficaces et flexibles capables de répondre aux exigences ayant trait à la qualité de l'énergie électrique.

De nombreuses solutions de filtres actifs pour la dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs parallèle ou, série et les combinaisons parallèle-série actifs (appelés aussi Unified Power Quality Conditioner-UPQC). Dans le cas où les courants de source sont non linéaires, le filtre actif parallèle de puissance (Shunt Actif Power Filter-SAPF) est considéré comme la meilleure solution pour la réduction des courants harmoniques dans les applications de faible à moyenne puissance. Le filtrage actif est plus avantageux où une réponse rapide est nécessaire en présence de charges dynamiques .

Le filtre actif parallèle de puissance (FAP) peut être utilisé pour compenser les courants harmoniques et déséquilibrés de même que la puissance réactive. Le compensateur série peut compenser à la fois les tensions harmoniques et déséquilibrées, et les creux de tension.

Ayant pour tâche principale d'améliorer la qualité de la source et de réaliser son facteur de puissance unitaire, les onduleurs de source de tension (voltage source inverter – VSI - en anglais) triphasés occupent une place de choix dans de nombreuses applications connectées au réseau telles que les filtres actifs, les systèmes d'alimentation sans coupure et les systèmes distribués utilisant des sources d'énergie renouvelable. (par exemple, photovoltaïque)

Le filtre actif parallèle est connecté dans un point commun entre la source du système d'alimentation et le système de charge qui présente la source des courants polluants circulant dans les lignes du système d'alimentation. Cette insertion est réalisée via un filtre passe-bas tel que les filtres L, LC ou LCL

Le filtre actif est un onduleur de tension ou de courant qui injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci conduisant ainsi à des courants sinusoïdaux courant côté réseau. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants harmoniques produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [1].

Pour atteindre notre objectif de filtrage, ce mémoire est divisé en quatre chapitres:

Le premier chapitre est spécialisé à un état de l'art sur la pollution harmonique du réseau électrique et leurs solutions, les origines ainsi les conséquences de la pollution et les normes imposes sur le THD, les solutions classiques et modernes.

Dans le deuxième chapitre de ce mémoire, nous choisissons une source photovoltaique ainsi que son utilisation d'un convertisseur DC-DC un hacheur boost .

Le troisième chapitre de cette thèse présente un filtre actif parallèle FAP à structure de tension à deux niveaux, nous citons le point de raccordement ainsi le rôle avec structure de FAP et modélisations circuit de puissance d'un filtre actif à structure tension, et la liaison entre l'onduleur de tension et le réseau, l'onduleur de tension triphasé a deux niveaux les stratégies

de commandes en tension (puissance instantanée P-Q)avec alimentation par source énergie renouvelable comme photovoltaïque.

J'utiliserai une méthode d'identification des harmoniques, c'est la méthode des puissances instantanées active et réactive PQ associée avec le SVPWM puis avec le régulateur PI (PQ-PI). En suite une étude comparative avec les résultats de simulation obtenus par PQ-PI avec la commande à intelligence artificiel qui est le reseau neuronne, cette technique nous permettent de constater clairement l'efficacité et la robustesse des méthodes modernes par rapport aux méthodes classiques.

Le dernier chapitre une simulation a été faite de mon système de filtrage par méthode de puissance instantanée P-Q avant et après filtrage et le système alimenté par une source photovoltaïque En fin je compares les résultats de simulation obtenus par PQ-PI avec la commande du reseau neuronne. Enfin je terminerai par une conclusion génerale en discutant les résultats obtenus et les perspectives à entreprendre dans les futures travaux.

Chapitre (I)

Etat de l'art

I.1. Introduction

L'utilisation croissante dans les appareils industriels ou domestiques de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ces convertisseurs statiques apportent une souplesse d'utilisation, des fonctionnalités supplémentaires, une augmentation de la fiabilité, le tout avec un rendement élevé. De plus, avec la généralisation de leur utilisation les coûts de ces modules d'électronique de puissance ne cessent de baisser. L'inconvénient de ces dispositifs c'est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes des tensions d'alimentation.

Dans ce cas, l'évolution des courants n'est pas liée directement aux variations sinusoïdales des tensions. Ces courants périodiques mais non sinusoïdaux circulent au travers des impédances des réseaux et donnent naissance à des tensions non sinusoïdales et des dés équilibres qui viennent se superposer à la tension initiale au point de raccordement. Ils peuvent générer aussi une consommation de puissance réactive. Ces perturbations périodiques régulières sont désignées comme des perturbations harmoniques [1Fer].

La pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau, elle est actuellement la préoccupation de plusieurs groupes de recherche activant dans le domaine de l'amélioration de la qualité d'énergie électrique à cause du nombre important de charges non-linéaires connecté au réseau électrique. Ces charges non-linéaires provoquent une distorsion dans le courant, et donc dans la tension, Ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ces harmoniques.

Dans ce chapitre, nous abordons de la source des harmoniques, ainsi les types et l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et, nous présentons les solutions classiquement et modernes mises en œuvre pour dépolluer les réseaux électriques.

I.2. Les harmoniques

I.2.1. Définition

Un harmonique est une composante sinusoïdale d'une onde périodique ou d'une quantité possédant une fréquence qui est multiple entier de la fréquence fondamentale.

I.2.2. Inters-harmoniques

Les inters-harmoniques sont des signaux de fréquence non multiple de la fréquence fondamentale.

L'apparition des interharmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande [Oul-05b].

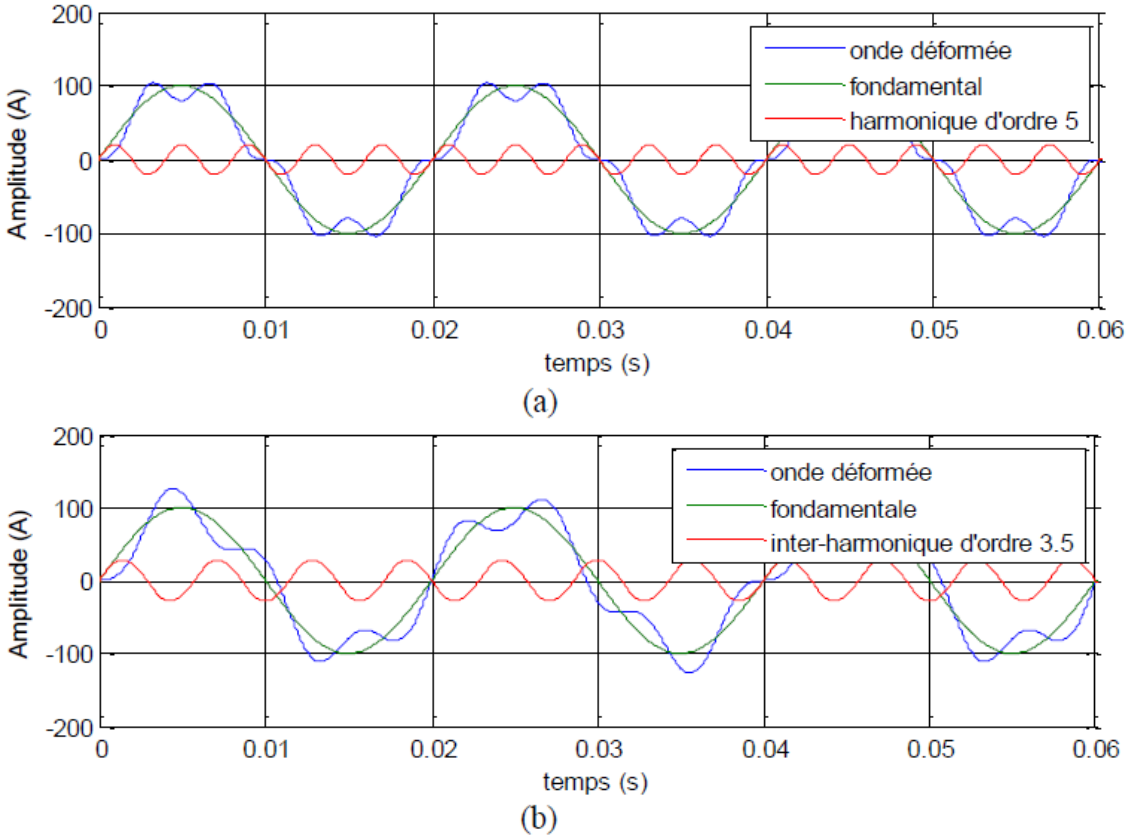


Figure I.1 : Harmoniques (a) et interharmoniques (b).

I.2.3. Infra-harmoniques

Les infra-harmoniques sont des signaux de fréquence inférieure à celle du fondamentale.

En général, le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est compris entre100-2500 Hz, soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 50**.** Et l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence**.** Voir la Figure (I.2)**.**

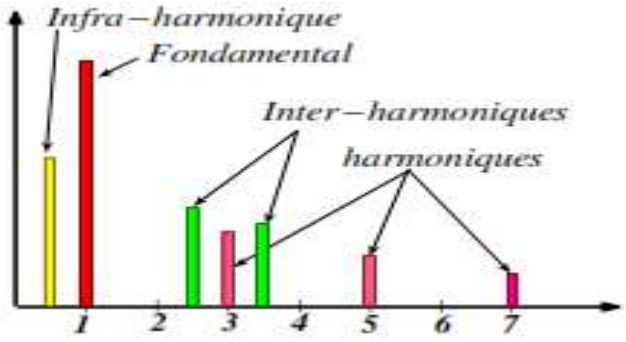


Figure I.2 : Représentation des inters et infra harmoniques.

La présence d'harmoniques dans les systèmes électriques signifie que le courant et la tension sont déformés et s'écartent de formes d'ondes sinusoïdales.

Les courants harmoniques sont causés par des charges non linéaires connectées au système de distribution. Une charge est dite non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme d'onde que la tension d'alimentation. La circulation de courants harmoniques dans les impédances du réseau crée ensuite des harmoniques de tension, qui déforment la tension d'alimentation, voir la (Figure I.3) où sont représentées des ondes de courant typiques pour des charges non linéaires.

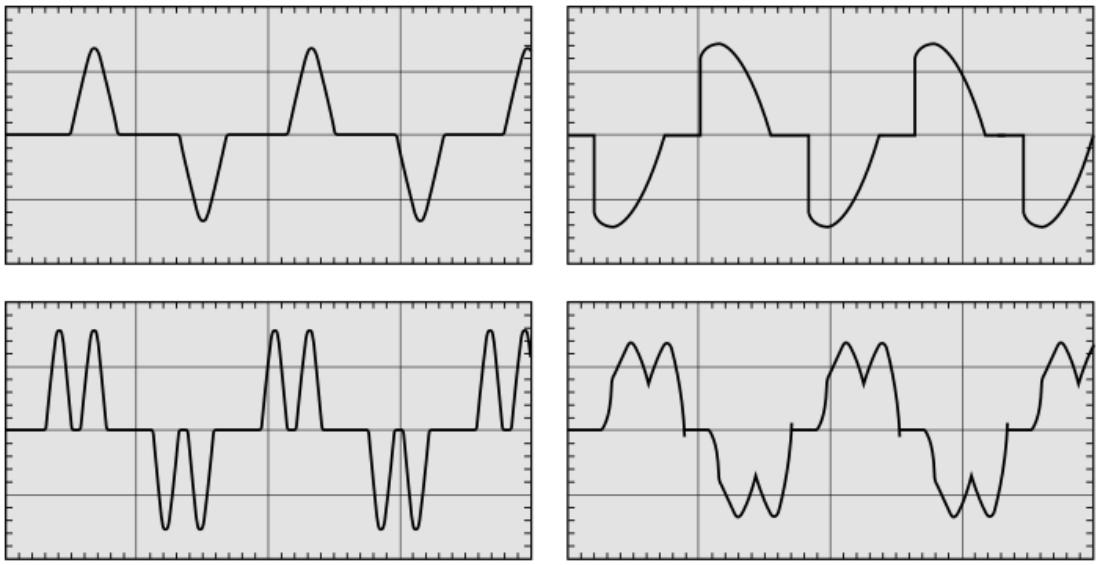


Figure I.3 : Exemples de formes d'onde de courant déformé monophasées (en haut) et triphasées (en bas).

Le théorème de Fourier indique que toutes les fonctions périodiques non sinusoïdales peuvent être représentées comme la somme des termes (i.e. une série) constituée de :

- Un terme sinusoïdal à la fréquence fondamentale ;
- des termes sinusoïdaux (harmoniques) dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale ;

- une composante continue, le cas échéant.

L'harmonique de rang h (communément appelé "harmonique h") d'un signal est la composante sinusoïdale dont la fréquence est h fois la fréquence fondamentale.

L'équation de la décomposition harmonique d'une fonction périodique y(t) est présentée ci-dessous :

$$Y(t)=\mathbf{y_0}+\sqrt{2}(\mathbf{y_1}\sin(\omega t-\boldsymbol{\varphi}_1)+\mathbf{y_2}\sin(2\omega t-\boldsymbol{\varphi}_2)+\ldots+\mathbf{y_n}+\mathbf{y_h}\sin(h\omega t-\boldsymbol{\varphi}_h)) \quad (I.1)$$

Qui peut s'écrire sous forme de somme :

$$\mathbf{y(t)}=\mathbf{Y_0}+\sum_{\mathbf{h=1}}^{\mathbf{h=\infty}}\mathbf{y_h}\sqrt{2}\sin(h\omega t-\boldsymbol{\varphi}_h) \quad (I.2)$$

où :

$\mathbf{Y_0}$: valeur de la composante continue généralement nulle et considérée comme telle ci-après ;

$\mathbf{Y_h}$: valeur efficace de l'harmonique de rang h ;

$\boldsymbol{\omega}$: vitesse angulaire de la fréquence fondamentale $(2\pi.f_1=2\pi/T)$;

$\boldsymbol{\varphi_h}$: phase de la composante harmonique à t = 0 ;

h : rang de l'harmonique.

La Figure (I.3) représente un exemple d'une onde de courant affectée par la distorsion harmonique sur un système de distribution électrique à 50 Hz. Le signal déformé est la somme de composantes harmoniques superposées :

- La valeur de la fréquence fondamentale (ou harmonique de rang 1) est de 50 Hz ;
- l'harmonique de rang 3 a une fréquence de 150 Hz :
- l'harmonique de rang 5 a une fréquence de 250 Hz ;
- etc.

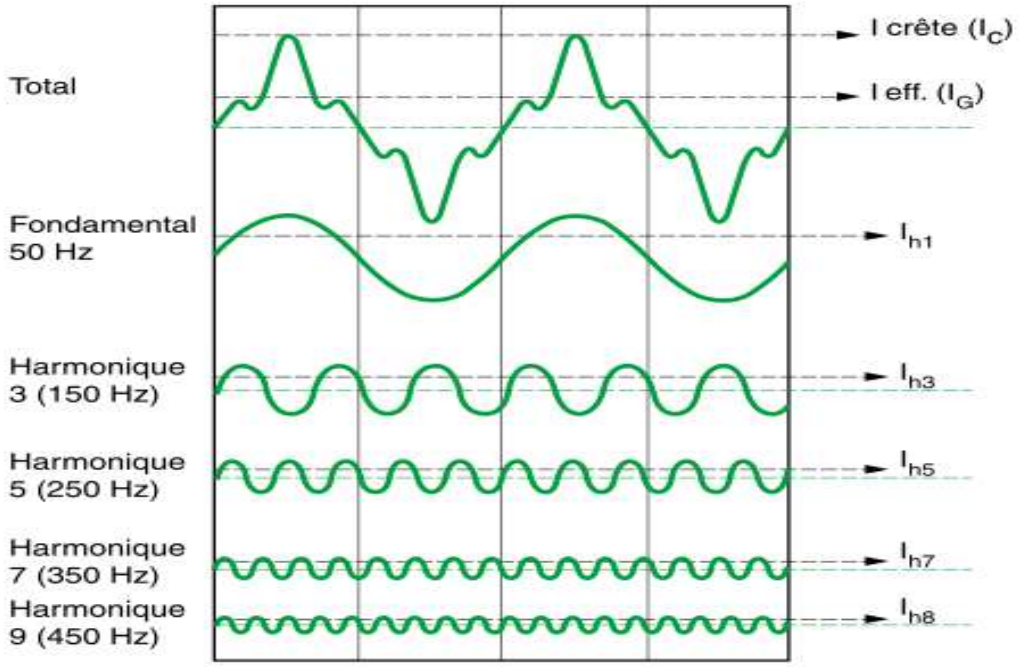


Figure I.4 : Exemple d'un courant contenant des harmoniques et décomposition en rangs harmoniques de rang 1 (fondamental), 3, 5, 7 et 9.

I.2.4. Composante harmonique individuelle (ou composante harmonique de rang h) :

La composante harmonique individuelle est définie comme étant le pourcentage d'harmoniques de rang h par rapport à la composante fondamentale.

Notamment :

$$\mathbf{Uh = 100\frac{Uh}{U1}}$$ Pour les harmoniques de tension (I.3)

$$\mathbf{Ih = 100\frac{Ih}{I1}}$$ Pour les harmoniques de courant (I.4)

I.2.5. Distorsion harmonique totale (THD)

La distorsion harmonique totale (THD) est un indicateur de la distorsion d'un signal. Il est largement utilisé en génie électrique et dans la gestion des harmoniques en particulier.

Pour un signal Y, le THD est défini comme suit :

$$\mathbf{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H}\left(\frac{Yh}{Y1}\right)^2} = \frac{\sqrt{Y2^2+Y3^2+\cdots+YH^2}}{Y1} \quad \text{(I.5)}$$

THD : est le rapport entre la valeur efficace de toutes les composantes harmoniques du signal Y, ramenée à la composante fondamentale Y1.

H : est généralement pris égal à 50, mais peut être limité dans la plupart des cas à 25.

A noter que THD peut être supérieur à 1 et est généralement exprimé en pourcentage.

I.2.5.1. THD en courant ou en tension

Pour les harmoniques de courant l'équation est :

$$\mathbf{THDi} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Ih}{I1}\right)^2} \qquad \text{(I.6)}$$

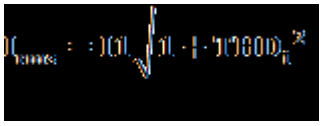
En introduisant la valeur efficace du courant :

$$\mathbf{Irms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h=H} Ih^2} \qquad \text{(I.7)}$$

Nous obtenons la relation suivante :

$$\mathbf{THDi} = \sqrt{\left(\frac{Irms}{I1}\right)^2 - 1'} \qquad \text{(I.8)}$$

Equivalent à :

 (I.9)

Exemple :

Pour THDi = 40%, nous obtenons :

$$\mathbf{Irms} = \mathbf{I1}\sqrt{\mathbf{1} + \mathbf{(0.4)^2}} = \mathbf{I1}\sqrt{\mathbf{1} + \mathbf{0.16}} \approx \mathbf{I1} * \mathbf{1.08} \qquad \text{(I.10)}$$

Pour les harmoniques de tension, l'équation est :

$$\mathbf{THDu} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h=H} \left(\frac{Uh}{U1}\right)^2} \qquad \text{(I.11)}$$

I.3. Qualité de l'énergie électrique

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- La fréquence ;
- l'amplitude des trois tensions ;
- la forme d'onde
- le déséquilibre.

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique .

I.4. Origine des harmoniques et perturbation sur le réseau électrique

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Les harmoniques sont le fait d'une charge non-linéaire (le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente).

Exemples de charges non-linéaires :

- Les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs) ;
- les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu,
- les onduleurs ;
- les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, etc.) ;
- les appareils domestiques (TV, fours micro-ondes, éclairage néon, etc.) ;
- certains équipements avec saturation magnétique (transformateurs).

I.4.1. Perturbations induites par les charges non-linéaires «courant et tension harmoniques»

L'alimentation de charges non-linéaires génère des courants harmoniques, circulant dans le réseau. La tension harmonique est due à la circulation du courant harmonique dans les impédances des circuits d'alimentation (ensemble transformateur et réseau, dans le cas de la Figure (I.5).

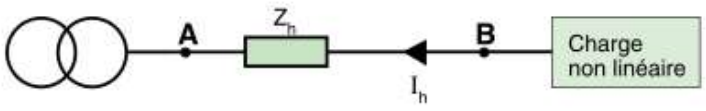


Figure I.5 : Schéma unifilaire représentant l'impédance du circuit d'alimentation vue par l'harmonique de rang h.

L'impédance inductive d'un conducteur augmente en fonction de la fréquence du courant qui le parcourt. A chaque courant harmonique de rang h correspond donc une impédance de circuit d'alimentation Z_h.

Le courant harmonique de rang h va créer à travers l'impédance Z_h une tension harmonique U_h, avec $U_h = Z_h \times I_h$, par simple application de la loi d'Ohm. La tension en B est donc déformée. Tout appareil alimenté à partir du point B recevra alors une tension perturbée.

Cette déformation sera d'autant plus forte que les impédances du réseau sont importantes, pour un courant harmonique donné.

I.4.2. Circulation des courants harmoniques dans les réseaux

Tout se passe comme si les charges non-linéaires réinjectaient un courant harmonique dans le réseau en direction de la source.

Les Figures (I.6-a) et (I.6-b) présentent la vue d'une installation polluée par les harmoniques considérant tout d'abord l'installation parcourue par le courant de fréquence 50 Hz (voir Figure I.6-a), auquel se superpose l'installation parcourue par le courant harmonique de rang h (voir Figure I.6-b).

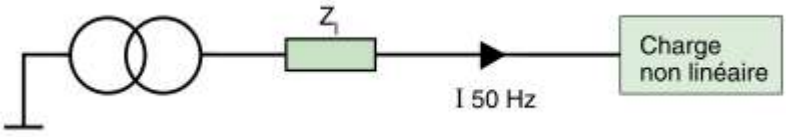


Figure I.6-a : Schéma d'une installation alimentant une charge non-linéaire, pour laquelle seuls les phénomènes liés à la fréquence 50 Hz (fréquence fondamentale) sont pris en considération.

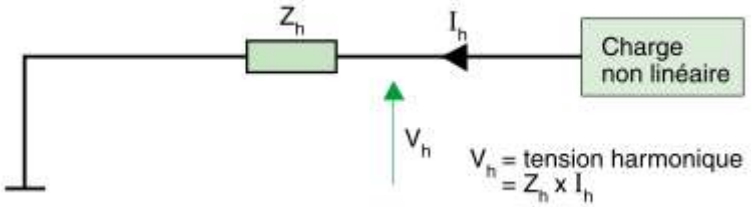


Figure I.6b : Schéma de la même installation, pour laquelle seuls les phénomènes liés à la fréquence de l'harmonique de rang h sont pris en compte.

L'alimentation de cette charge non-linéaire génère dans le réseau la circulation du courant I_{50Hz} (représenté sur la Figure I.6-a), auquel s'ajoute chacun des courants harmoniques I_h (représenté sur la Figure I.6-b) correspondant à chaque harmonique de rang h.

Considérant toujours le modèle des charges réinjectant un courant harmonique dans le réseau, la Figure (I.7) représente la circulation des courants harmoniques dans un réseau.

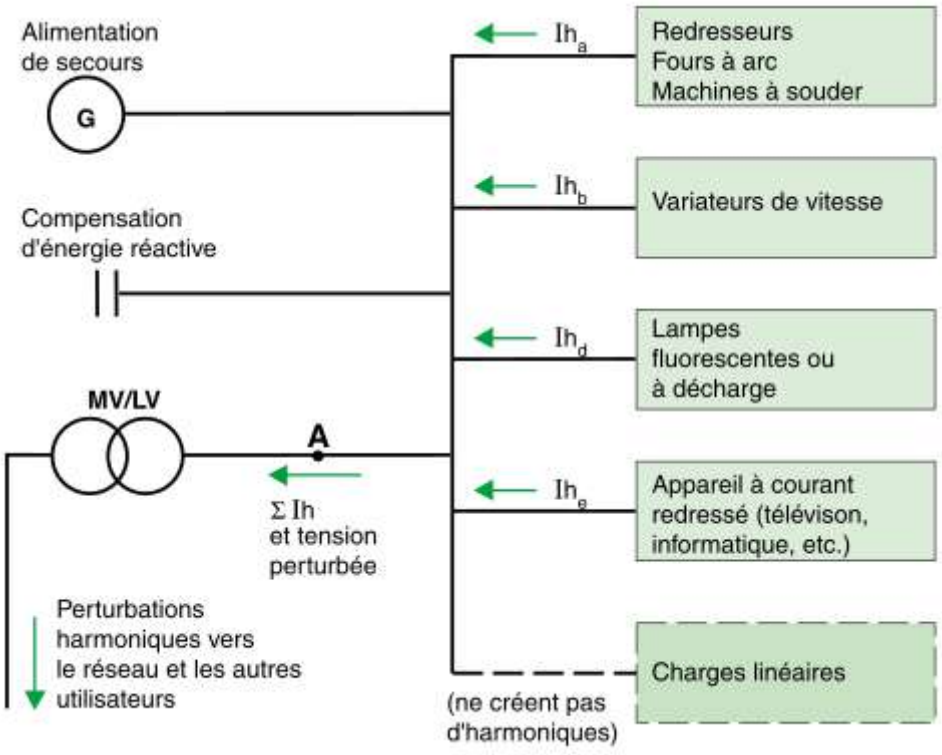


Figure. **I.7 :** Circulation des courants harmoniques dans un réseau.

A remarquer sur cette figure que si certaines charges créent dans le réseau des courants harmoniques, d'autres charges peuvent absorber ces courants.

I.5. Normes imposées sur le THD

Les consommateurs ainsi que les distributeurs de l'énergie électrique sont conscients de l'importance d'une réglementation standard unique pour les problèmes de la pollution harmonique. Une telle réglementation universelle n'existe pas encore, cependant des organismes comme IEC (Commission Électrotechnique Internationale) en Europe [1], [6] et IEEE en Amérique [7], élaborent des normes efficaces qui peuvent être regroupées en trois catégories:

I.5.1. Niveaux de compatibilité harmonique en amont du point commun de raccordement

-IEEE519-1992

-IEC 61000-2-2

-IEC 61000-3-6

I.5.2. Limites sur l'émission harmonique des équipements

-IEC 61000-3-2 (appareilsdemoinsde16A par phase)

-IEC 61000-3-4 (appareilsdeplusde16 A par phase)

I.5.3. Guide pour la mesure des harmoniques

CEI61000-3-2 : cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des matériels individuels raccordés aux réseaux publics pour les appareils consommant moins de16 A par phase.

Tableau I.4 : CEI61000-3-2:Limites d'émission de courants harmoniques des appareils basse tension de courant inférieur à16A et de classe A.

Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
2	1,08
3	2,30
4	0,43
5	1,14
6	0,30
7	0,77
8 h 40	0,23*8/h
9	0,40
11	0,33
13	0,21
15 h 39	0,15*15/h

Le Tableau (I.4) indique les limites d'émission pour ces appareils faisant partie de la classe A, c'est-à-dire autres que les outils portatifs, appareils d'éclairage et appareils ayant un courant d'entrée à forme d'onde spéciale dont la puissance active est inférieure à600W.

CEI61000-3-4 **:** Cette norme spécifie les limites pour les émissions de courant harmonique des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à16A et jusqu'à75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales entre230V (monophasée) et 600V (triphasé).

Tableau I.5 : CEI61000-3-4:Limitation des émissions de courants rarmoniques

Rang harmonique	Courant harmonique en % du fondamental
3	21,6
5	10,7
7	7,2
9	3,8
11	3,1
13	2,0
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21	0,6
23	0,9
25	0,8
27	0,6
29	0,7
31	0,7
33	0,6
pair	0,6 ou 8/h

I.6. Solutions de base pour atténuer les harmoniques

Pour limiter la propagation des harmoniques dans le réseau, des dispositions peuvent être prises et sont à observer en particulier dans le cas d'une nouvelle installation.

I.6.1. Positionner les charges polluantes en amont du réseau

La perturbation harmonique globale croît lorsque la puissance de court-circuit diminue. En dehors de toute considération économique, il est donc préférable de connecter les charges polluantes le plus en amont possible (voir Figure I.7).

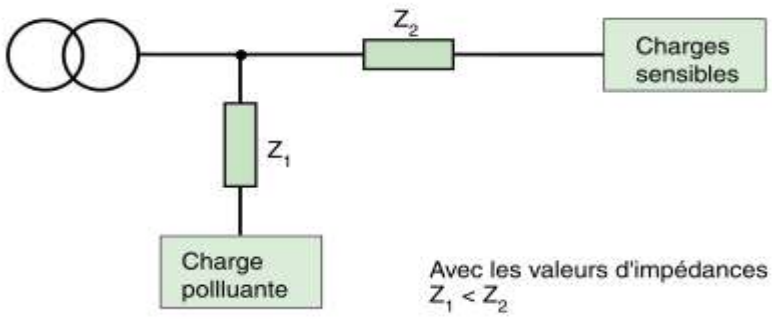


Figure I.8 : Alimentation le plus en amont possible des charges non-linéaires (schéma conseillé).

I.6.2. Regrouper les charges polluantes

Pour établir un schéma unifilaire, il convient de séparer les équipements perturbateurs des autres (voir Figure I.9) en pratique, alimenter les charges polluantes et non polluantes par des jeux de barres différents.

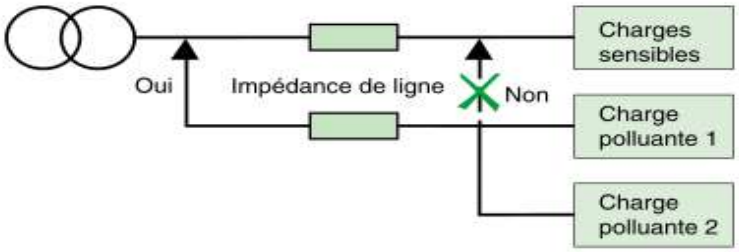


Figure I.9 : Regroupement des charges non-linéaires et alimentation le plus en amont possible (schéma conseillé)

I.6.3. Séparer les sources

Dans la lutte contre les harmoniques, une amélioration supplémentaire est obtenue en réalisant une alimentation par transformateur séparé, selon le schéma de principe suivant (voir Figure I.10).

L'inconvénient de cette solution est l'augmentation du coût de l'installation.

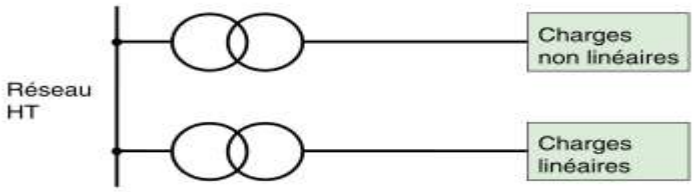


Figure I.10 : Alimentation des charges polluantes par transformateur séparé.

I.6.4. Utiliser des transformateurs à couplages particuliers

L'effet de couplage de transformateurs permet la suppression de certains rangs d'harmoniques. En fonction des types de couplages différents rangs d'harmoniques sont arrêtés :

- Un couplage Dyd arrête les harmoniques de rangs 5 et 7 (voir Figure I.10) ;
- un couplage Dy arrête les harmoniques de rang 3 ;
- un couplage DZ 5 arrête les harmoniques de rang 5.

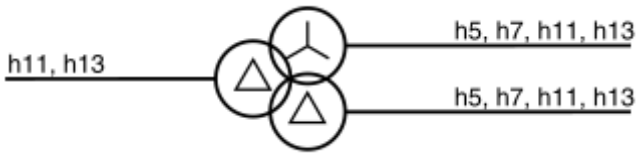


Figure I. 11 : L'utilisation d'un transformateur Dyd stoppe la propagation des harmoniques de rangs 5 et 7 vers l'amont du réseau.

I.6.5. Placer des inductances dans l'installation

Dans le cas d'alimentation de variateurs de vitesse, il est possible de lisser le courant en mettant en place des inductances de ligne. Et l'augmentation de l'impédance du circuit d'alimentation limite le courant harmonique.

La mise en place de selfs anti-harmoniques sur les batteries de condensateurs augmente l'impédance de l'ensemble self et condensateur pour les harmoniques de rangs élevés. Cela évite le phénomène de résonance et protège les condensateurs.

I.7. Filtrage des harmoniques

Dans le cas où les actions préventives ci-dessus sont insuffisantes, il est nécessaire d'équiper l'installation polluée de dispositif de filtrage.

Il existe trois types de filtres :

- Le filtre passif ;
- le filtre actif ;
- le filtre hybride.

I.7.1.Filtre passif

I.7.1.1. Applications typiques

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

I.7.1.2 Principe de fonctionnement

Un circuit LC accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, est placé en parallèle sur le générateur d'harmoniques (voir Figure I.11). Ce circuit de dérivation absorbe les harmoniques et évite que ceux-ci ne circulent dans l'alimentation.

En général, le filtre passif est accordé sur un rang d'harmonique proche de l'harmonique à éliminer. Plusieurs branches de filtres en parallèle peuvent être utilisées lorsque l'on souhaite une réduction forte du taux de distorsion sur plusieurs rangs.

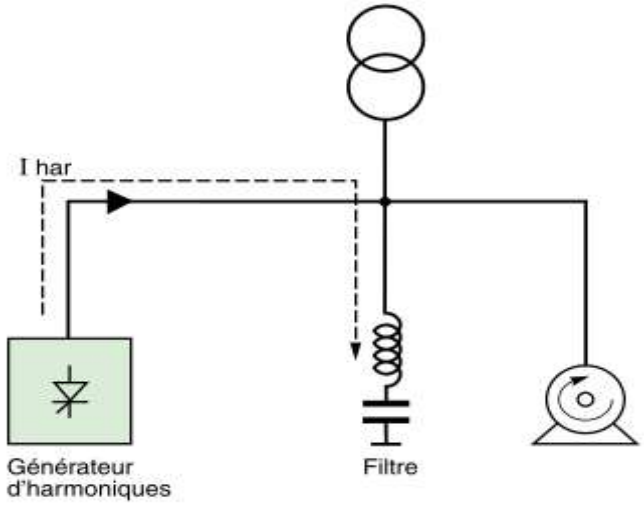


Figure I.12 : Principe d'utilisation d'un filtre passif.

I.7.2. Filtre actif (ou compensateur actif)

I.7.2.1. Applications typiques

- Installations tertiaires avec générateurs d'harmoniques de puissance totale inférieure à 200 kVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, bureautique...).
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

I.7.2.2. Principe de fonctionnement

Ce sont des systèmes électroniques de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non-linéaire, visant à compenser soit les tensions harmoniques, soit les courants harmoniques générés par la charge. La Figure (I.12) donne un exemple de filtre actif parallèle compensant le courant harmonique (Ihar = -Iact).

Le filtre actif réinjecte en opposition de phase les harmoniques présents sur l'alimentation de la charge, de telle sorte que le courant de ligne Is soit sinusoïdal.

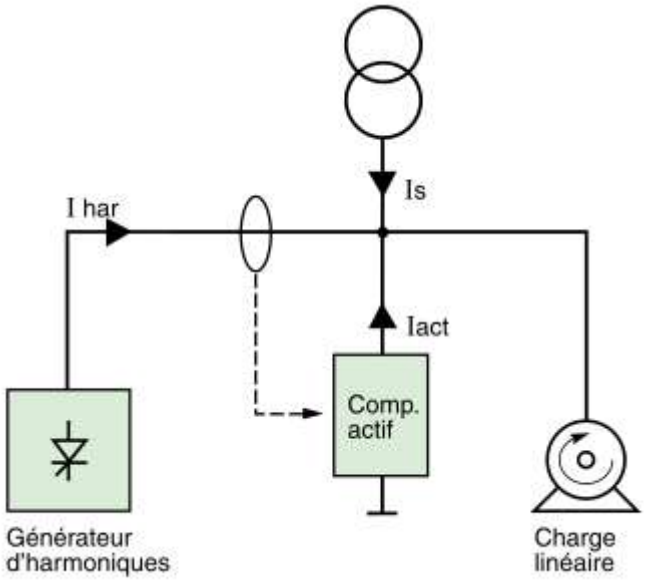


Figure I. 13: Principe d'utilisation d'un filtre actif

I.7.3. Filtre hybride

I.7.3.1. Applications typiques

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.
- Recherche de conformité à des limites strictes d'émission harmonique.

I.7.3.2. Principe de fonctionnement

Les deux types de dispositifs précédents peuvent être associés au sein d'un même équipement et constituer un filtre hybride voir Figure (I.13). Cette nouvelle solution de filtrage permet de cumuler les avantages des solutions existantes et de couvrir un large domaine de puissance et de performances.

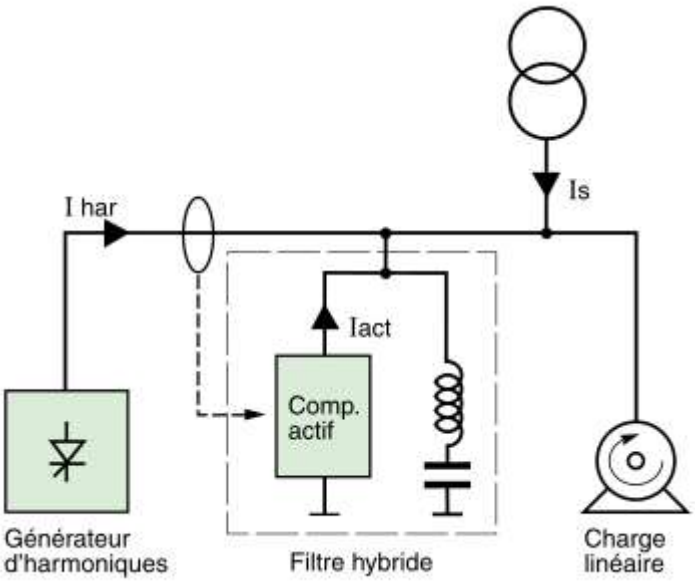


Figure I. 14 : Principe d'utilisation d'un filtre hybride.

I.8. Critères de choix

I.8.1. Le filtre passif

Permet à la fois la compensation d'énergie réactive et une grande capacité de filtrage en courant.

Le filtre passif réduit aussi les tensions harmoniques des installations dont la tension d'alimentation est polluée. Si la puissance réactive fournie est importante, il est conseillé de mettre hors tension le filtre passif pendant les périodes de faible charge.

L'étude de raccordement d'un filtre doit tenir compte de la présence éventuelle d'une batterie de compensation et peut conduire à sa suppression.

I.8.2. Le compensateur actif

Permet le filtrage des harmoniques sur une large bande de fréquence. Il s'adapte à n'importe quelle charge. Cependant, sa puissance harmonique est limitée.

I.8.3. Le filtre hybride

Réunit l'ensemble des performances des filtres passifs et actifs.

I.9. Etat de l'art des filtres actifs parallèles

Puisqu'ils constituent la structure maitresse de cette thèse, il s'avère important de dresser un bref historique sur l'évolution des filtres actifs parallèles avant de clôturer ce chapitre.

Dans les premières références [11] [12], les filtres actifs parallèles sont conçus à partir d'onduleurs à thyristors commandés en MLI [13]. Ces filtres ont été développés pour éliminer les harmoniques générés par les convertisseurs utilisés dans les systèmes de transmission de courant continu à haute tension (HVDC). Toutefois, à cette époque la technologie des interrupteurs d'électronique de puissance ne permettait pas un développement applicatif significatif.

Par la suite, des progrès importants ont été accomplis avec la commercialisation de composants d'électronique de puissance qui commutent des puissances de plus en plus importantes avec des fréquences de plus en plus élevées. Ainsi, en 1982, le premier FAP de 800kVA, composé d'un commutateur de courant à MLI et thyristors GTO, a été installé pour la compensation d'harmoniques [14], Plus tard, de nombreux onduleurs de puissance commandés en MLI ont été développés pour des applications de filtrage actif [15] [16]. En conséquence, les filtres actifs parallèles ont commencé à être commercialisés et installés à travers le monde et surtout au Japon, où en 1996, il y avait plus de cinq cents filtres actifs parallèles installés avec des puissances allant de 50kVA à 2MVA [17].

Les premiers dispositifs ne compensaient que les perturbations harmoniques de courant. Toutefois, les filtres actifs ont évolué et des prototypes avec des fonctionnalités plus nombreuses sont apparus. Les filtres actifs modernes, en plus de compenser et amortir les courants harmoniques, compensent les déséquilibres de courant, contrôlent la puissance réactive et le flicker.

Pour l'instant, tous les filtres actifs parallèles étaient installés par des consommateurs industriels. Néanmoins, l'installation par le distributeur d'énergie de ces dispositifs peut s'envisager. Dans ce cas, l'objectif principal est d'amortir la résonance entre les condensateurs de compensation de puissance réactive et l'inductance de la ligne plutôt que de réduire la distorsion harmonique de la tension sur un réseau de distribution [18].

Au cours de l'année 1997, la topologie multi niveaux a débuté aussi pour des applications de filtrage actif. La référence [19]. présente un filtre actif avec un onduleur clampé par le neutre et dans [20] l'auteur a présenté un filtre actif en utilisant des onduleurs en cascade de 11 niveaux. Les années qui ont suivi ont vu de nombreuses publications sur les filtres actifs multi niveaux avec différentes topologies : dans [21], l'auteur propose une topologie à capacité flottante avec commutation douce; la référence [22] utilise un convertisseur en cascade asymétrique, etc. Cependant, de nos jours, la plupart des filtres actifs parallèles utilisent des convertisseurs clampés par le neutre [23] [24] [25]. L'évolution

des dispositifs d'électronique de puissance vers des applications à chaque fois plus puissantes est palpable dans le domaine des filtres actifs, même si cela reste à moindre échelle qu'ailleurs. On constate de plus en plus, une évolution vers des tensions et des puissances plus élevées, y compris sans transformateur de couplage.

La première référence sur un filtre actif connecté à un réseau de moyenne tension date de 2001. La référence [26] propose la connexion d'un filtre actif shunt monophasé à l'extrémité d'une ligne de traction de 25kV dans le but de diminuer les harmoniques de tension aux rangs 3, 5 et 7 au point de connexion du filtre et de fournir de la puissance réactive pour maintenir la tension sur la ligne. Par la suite, [27] propose une étude similaire mais avec un convertisseur de topologie hybride à cinq niveaux. Un bras de ce convertisseur est composé d'un convertisseur clampé par le neutre qui utilise des IGBTs et l'autre bras est composé d'un convertisseur à deux niveaux conventionnel à IGCTs, Une contribution plus récente est consacrée à un filtre actif à base d'onduleurs en cascade connecté à un réseau de 4.16kV avec transformateur [28]. L'auteur constate qu'une combinaison des semi-conducteurs de puissance élevée et une inductance de filtre réduit en moyenne tension peut être une solution compétitive, au niveau du coût, par rapport aux filtres actifs conventionnels en basse tension. Néanmoins, à présent, les références liées aux filtres actifs de moyenne tension dans la littérature sont relativement limitées et on constate plutôt une évolution vers l'utilisation de filtres hybrides pour ce type d'application. En effet, ces filtres se présentent comme une solution très intéressante pour surmonter les limitations des filtres actifs, surtout en ce qui concerne la montée en tension.

D'un côté, dans [29], l'auteur propose l'utilisation d'un filtre actif hybride à base d'un onduleur multi niveaux à capacité flottante pour se connecter à un réseau de 20kV. L'onduleur se comporte comme un diviseur de tension dans le but de limiter la tension que doit supporter le filtre actif. D'un autre côté, dans [30], est décrit un filtre actif hybride biniveaux, constitué d'un filtre passif relié directement en série (sans transformateur) à un filtre actif, le tout directement connecté à un réseau de 3.3kV. Une étude similaire est réalisée dans [31] où le filtre est connecté à un réseau de 6.6kV mais dans ce cas le but du filtre est d'amortir les harmoniques de la ligne. Finalement, dans [32] l'auteur propose un filtre actif hybride sans transformateur avec topologie NPC qui se connecte à un réseau de distribution de 6kV/10kV [5].

I.10. Solution de dépollution des réseaux électriques

Pour avoir de bonne qualité d'énergie électrique, tout d'abord, il faut remédier les signaux perturbés à cause de la charge non linéaire par des solutions proposées, les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

I.10.1. Solutions traditionnelles

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens, elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs).

I.10.2. Solutions modernes

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution décharges et des réseaux électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

I.11. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Les normes imposées ont été également présentées. Elles fixent les limites de la génération d'harmoniques.

Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrements et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. Donc le filtre actif parallèle c'est meilleur solution pour lutte contre et plus adapter avec les charges évolutives.

Chapitre (II)

Le système Photovoltaïque

II.1. Introduction

Le système PV peut offrir le moyen le plus pratique et le plus économique pour avoir accès à l´électricité. Le système PV, qui utilise une source solaire qui est prévisible, est depuis longtemps plus économique que les générateurs à diesel ou à toutes autres alternatives. Ce système requière un service minimal, se prête bien pour les communautés éloignées et présente peu d´impact pour l´environnement. De plus, la technologie PV est bien implantée, ce qui permet la standardisation de ses pièces et de son système.

Le système PV permet de faire fonctionner adéquatement plusieurs appareils et équipements utilisant peu d´énergie et d´une grande valeur pour les infrastructures localisées à l´extérieur du réseau national. Ce dernier peut être la technologie la plus économique pour fournir le service d´électricité.

Le but de ce chapitre est l'étude des différentes composantes photovoltaïques pour nous permettre la modélisation mathématique de ces composantes afin de pouvoir simuler le système photovoltaïque dans sont ensemble .

II.2. Modélisation d'un système photovoltaïque

II.2.1. Définition

Le terme « photovoltaïque » vient du grec et qui signifie lumière, il est composé de deux parties : « photos » «lumière » et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont "bombardés" par les photons constituants la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être "arrachés": si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons "arrachés" créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique: c'est l'effet photovoltaïque [1].

II.2.2. Constitution

Bien que fondamental dans la chaîne que représente un système, le module photovoltaïque à lui seul ne peut pas grand chose : pour répondre à un besoin défini, il faut en fait associer étroitement ces modules à un système complet correspondant à une application bien spécifique.

Un système photovoltaïque sera donc constitué du générateur précédemment décrit, généralement associé à l'un ou plusieurs des éléments suivants :

- Un système d'orientation ou de suivi (rencontré assez rarement) ;
- une gestion électronique (stockage, mise en forme du courant, transfert de l'énergie) ;
- un stockage palliant la nature aléatoire de la source solaire ;
- un convertisseur DC/AC ;
- une charge en courant continu basse tension ou en courant alternatif standard.

La Figure (II.1) représente symboliquement les divers éléments du système le plus général. Dans la pratique, bien sûr, les systèmes utilisent les éléments appropriés au type de charge et aux conditions locales.

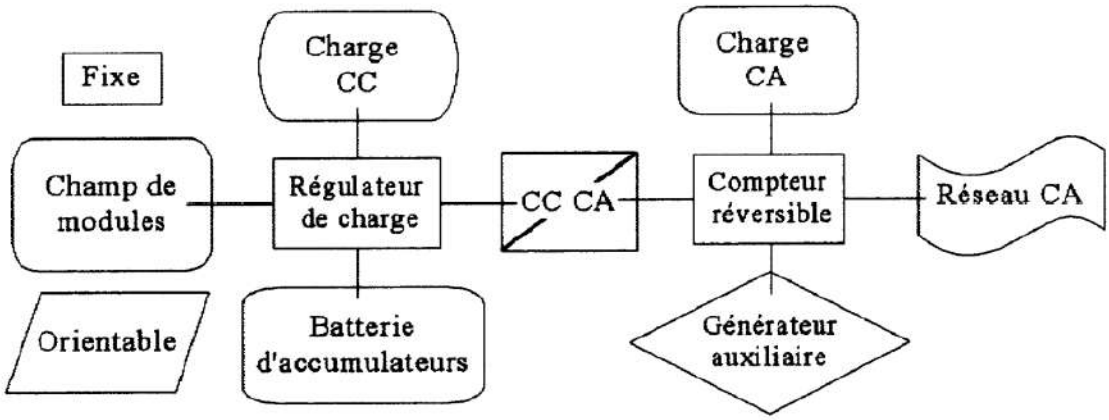


Figure II.1 : Schéma synoptique décrivant le système photovoltaïque le plus général.

Les systèmes PV les plus couramment utilisés sont de trois types :

a) Les systèmes PV avec stockage électrique (batterie d'accumulateurs électrochimiques). Ceux-ci alimentent des appareils d'utilisation :

- Soit directement en courant continu ;
- soit en courant alternatif par l'intermédiaire d'un convertisseur continu – alternatif (onduleur).

b) Les systèmes à couplage direct sans batterie (fonctionnement dit aussi "au fil du soleil"). Les appareils d'utilisation sont branchés soit directement sur le générateur solaire, soit, éventuellement, par l'intermédiaire d'un convertisseur continu - continu (adaptateur d'impédance).

c) Les systèmes connectés au réseau local par l'intermédiaire d'un onduleur piloté à la fréquence du réseau, le réseau servant de stockage.

II.2.3. Principe de fonctionnement

L'étude de systèmes photovoltaïques se ramène à l'étude de l'adaptation de la charge. On recherchera à optimiser le système pour avoir le meilleur rendement d'adaptation du système (rapport de l'énergie électrique fournie à l'utilisation à l'énergie électrique qu'aurait pu fournir le générateur fonctionnant toujours à son point de puissance maximum).

Une cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches .On trouve au centre de cette cellule, une couche avec porteurs de charges libres négative N en contact avec une autre couche avec porteurs de charges libre s positives P. De part et 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 verra 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.

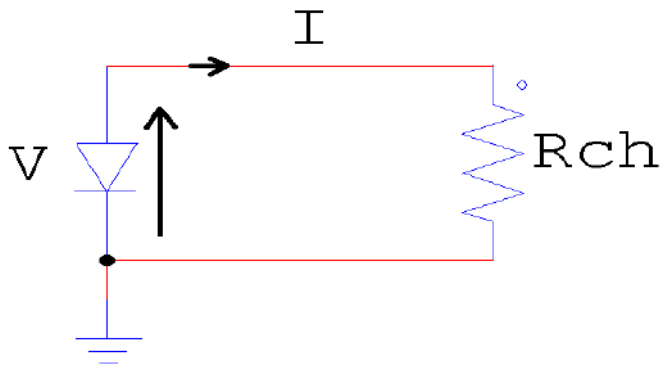


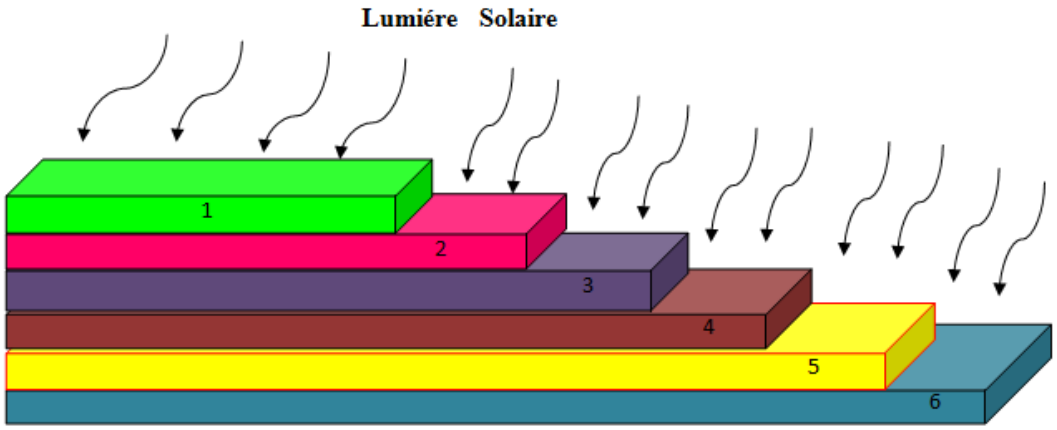
Figure II.2 : Schéma électrique de principe de fonctionnement photovoltaïque.

II.3. Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice ;
- d'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires ;
- d'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode ;
- les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.



1) Verre, 2) Revétement anti-reflrts, 3)Grille conductrice, 4) Semi-conducteur dopé N, 5) Semi-conducteur dopé P, 6) Conducteur.

Figure II.3 : Structure d'une cellule solaire.

II.3.1. Les différents types de cellules solaires

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Actuellement, il existe trois principaux types de cellules.

➲ **Les cellules monocristallines**

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'24% en laboratoire) cependant, elles coûtent trop chers dues à leur fabrication complexe.

➲ **Les cellules poly cristallines**

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible (de 11% à 15% voir jusqu'à19.8 en laboratoire).

➲ **Les cellules amorphes**

Elles ont un faible rendement (de 5% à 8% voir jusqu'13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

II.3.2. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

La Figure (II.4) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant Iph monté en parallèle avec une diode et deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma.

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique I=f(V) de la cellule [5]:

- La résistance série R_{ser} est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt R_{shu} est due à un courant de fuite au niveau de la jonction; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

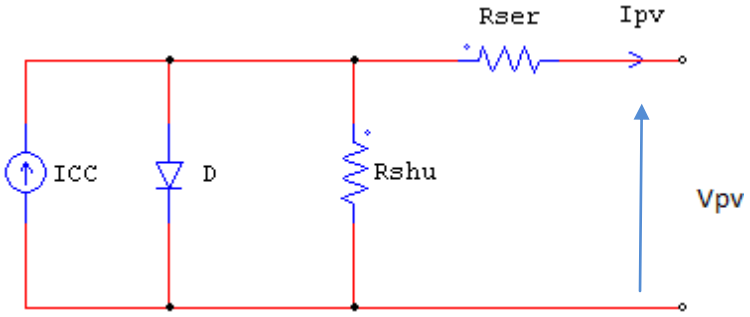


Figure II.4 : Schéma équivalent électrique de la cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par [5,6,7].

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat}\left[\frac{\left[\exp(V_{pv} + (I_{pv} \times R_{ser}))\right]}{nKT}\right] - \frac{V_{pv} + (I_{PV} \times R_{ser})}{R_{shu}} \qquad \text{(II.1)}$$

I_{sat} : le courant de saturation(A) ;

K : la constante de Boltzmann (1,381 10-23 J/K) ;

T : la température effective des cellules en Kelvin(K) ;

e : la charge de l'électron (e=1,6 10-19 C) ;

n : le facteur d'idéalité de la jonction (1< n<3) ;

I_{pv} : le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur ;

V_{pv} : la tension aux bornes de cette même cellule ;

I_{ph} : le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de (court circuit) ;

R_{shu} : la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction ;

R_{ser} : la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions [7].

II.3.3. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes:

II.3.3.1. Courant de court-circuit (Icc)

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photo-courant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation(I.1), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{e\left(I_{cc}\times R_{ser}\right)}{nKT}-1\right)\right]-\frac{\left(I_{cc}\times R_{ser}\right)}{R_{shu}} \quad \text{(II.2)}$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat}\left[\exp\left(\frac{e\left(I_{cc}\times R_{ser}\right)}{nKT}-1\right)\right]$ devant I_{ph}. L'expression approchée du courant de court-circuit est alors:

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{\left(1+\frac{R_{ser}}{R_{shu}}\right)} \quad \text{(II.3)}$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

II.3.3.2. Tension de circuit-ouvert (Vco)

C'est la tension V_{co} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{eV_{PV}}{nKT}\right) - 1\right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \qquad \text{(II.4)}$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieur à :

II.3.3.3. Rendement énergétique

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule P_{max} (I_{opt},V_{opt}) et la puissance solaire incidente. il est donné par :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{P_{inc}} \qquad \text{(II.5)}$$

Avec P_{inc} est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

II.3.3.4. Facteur de forme

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fille factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} (I_{opt}, V_{opt}) et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit-ouvert V_{co} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_{ser} et R_{shu}. Il est défini par :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{opt}V_{opt}}{I_{cc}V_{co}} \qquad \text{(II.6)}$$

II.4. Générateur photovoltaïque et ses performances

Le générateur photovoltaïque est un ensemble d'équipements mis en place pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de satisfaire les besoins en charge. En fonction de la puissance désirée, les modules peuvent être assemblés en panneaux pour constituer un "champ photovoltaïque". Relié au récepteur sans autre élément, le panneau solaire fonctionne

"au fil du soleil", c'est-à-dire que la puissance électrique fournie au récepteur est fonction de la puissance d'ensoleillement.

Elle est donc à son maximum lorsque le soleil est au zénith et nulle la nuit. Mais, très souvent, les besoins en électricité ne correspondent pas aux heures d'ensoleillement et nécessitent une intensité régulière (éclairage ou alimentation de réfrigérateurs, par exemple). On équipe alors le système de batteries d'accumulateurs qui permettent de stocker l'électricité et de la restituer en temps voulu [3].

Pour un certain nombre d'applications, le courant continu produit, par le générateur photovoltaïque, est convertit à l'aide d'un onduleur en courant alternatif.

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que: la puissance, le courant de court-circuit I_{cc} ou la tension en circuit ouvert V_{co}. Un générateur photovoltaïque est constitué d'un ou plusieurs modules PV en série et / ou en parallèle pour obtenir une puissance, un I_{cc} et un V_{co} désirés [3].

II.4.1. Caractéristique Courant-Tension

La figure (II.5) représente la courbe *I =f (V)* d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de 25 °C.

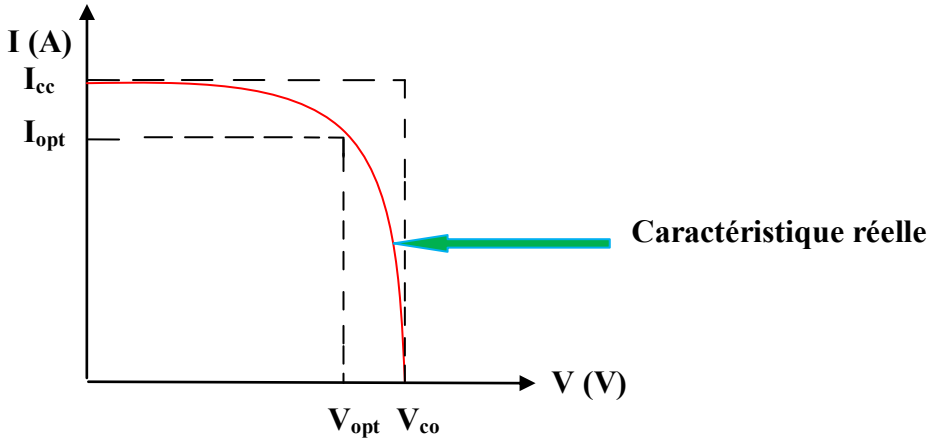


Figure II.5 : Caractéristique I =f (V) d'un module photovoltaïque.

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_m où la

puissance se trouve être maximale. il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

Il est important de noter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_m [3].

II.4.2. Influence de l'éclairement et la température sur les courbes I=f(V) et P=f(V)

La Figure (II.6) montre l'influence de l'éclairement sur la caractéristique I=f(V). A une température constante, on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. car le courant de court circuit est une fonction linéaire de l'éclairement alors que la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique [4,6,7,8].

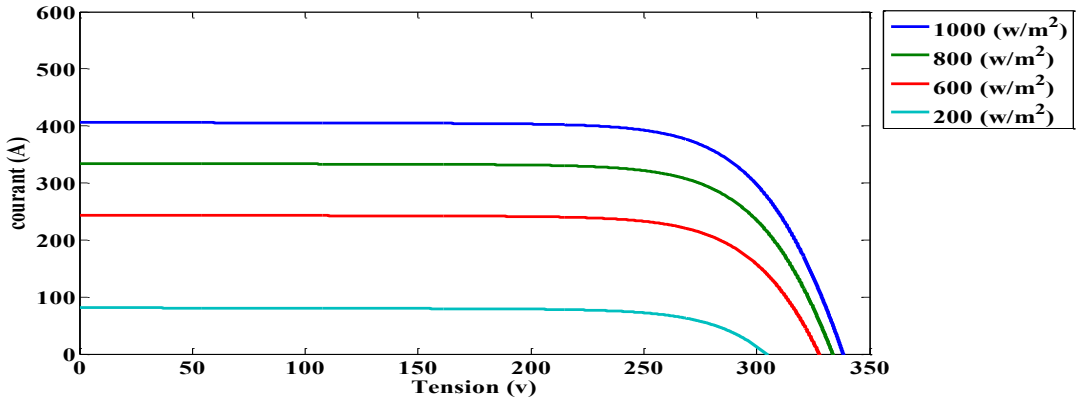


Figure II.6 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique *I=f(V)*.

La Figure (II.7) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V) [8].

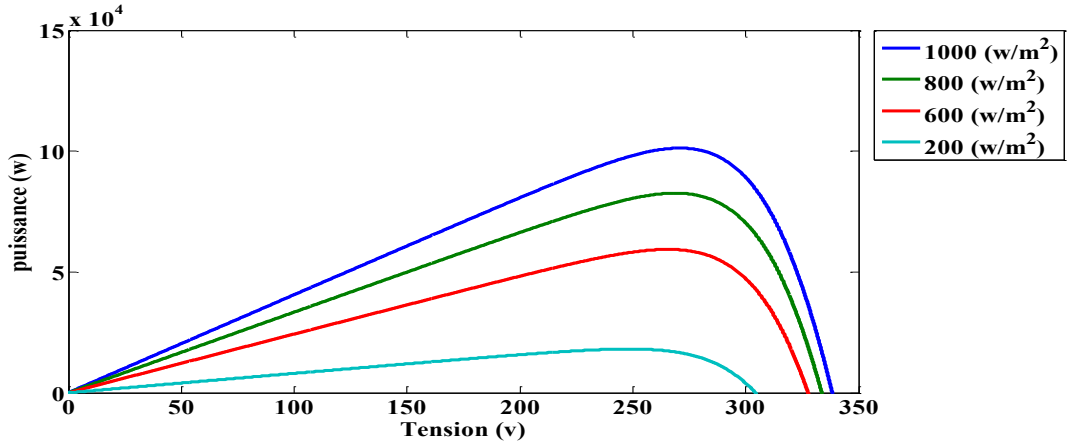


Figure II.7 : L'influence de l'éclairement sur la caractéristique P=f(V).

La Figure (II.8) montre l'influence de la température sur la caractéristique I=f(V). il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'une cellule solaire sur la caractéristique I=f(V).

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution [7].

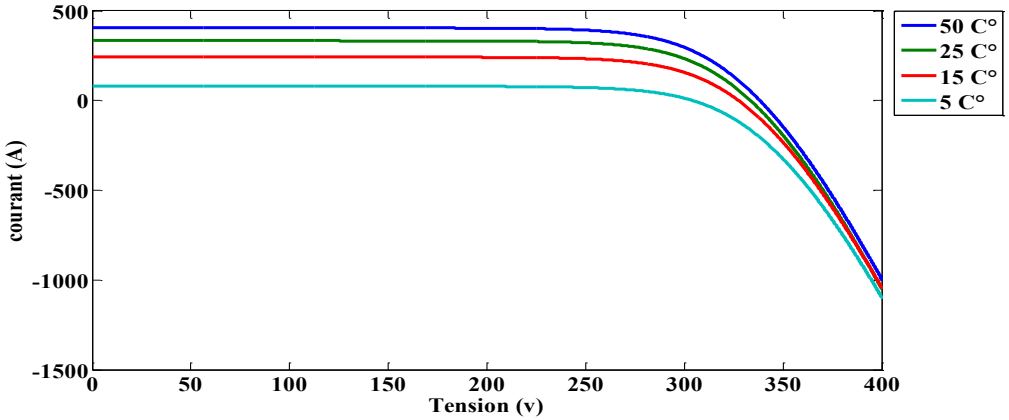


Figure II.8 : L'influence de la température sur la caractéristique I=f(V).

La Figure (II.9) illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique P=f(V) [7].

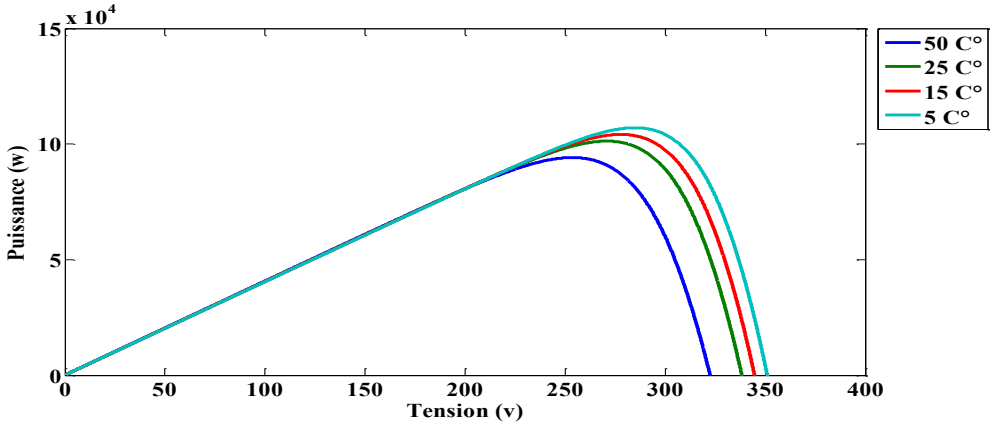


Figure II.9 : L'influence de la température sur la caractéristique P=f(V).

II.4.3. Influence de l'association série des cellules PV

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins d'un volt [4]. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau). Un module de 8 cellules en série (type BP MSX 120) est suffisant pour obtenir une tension compatible avec la charge. Pour avoir plus de tension, il faut assembler N_s modules en série, par contre pour le courant généré, un nombre N_p de modules en parallèle permet d'en ajouter, les diodes de protection série et parallèles protègent le circuit contre le retour de courant. L'association en série des cellules délivre une tension égale à la somme des tensions individuelles et un courant égal à celui d'une seule cellule [4].

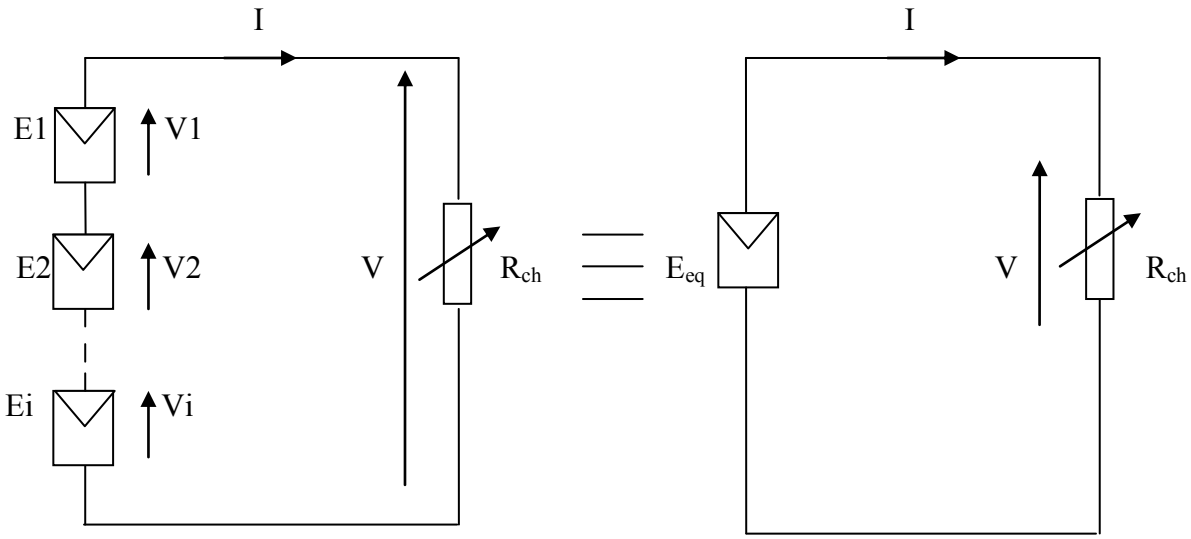


Figure II.10 : Association de N modules solaires en série.

II.4.4. Influence de l'association parallèle des cellules PV

L'association en parallèle des photopiles délivre un courant égal à la somme des courants individuels et une tension égale à celui d'une seule cellule.

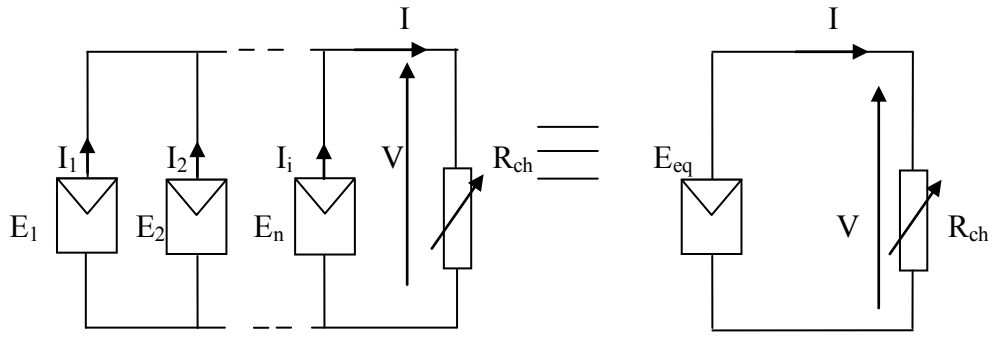


Figure II.11 : Association de N_p modules solaires en parallèle.

II .4.5. Influence de l'association mixte (Série +Parallèle) des cellules PV

Pour avoir une satisfaction en courant et en tension, on est obligé d'utiliser un groupement mixte, c'est-à-dire Série-Parallèle [9].

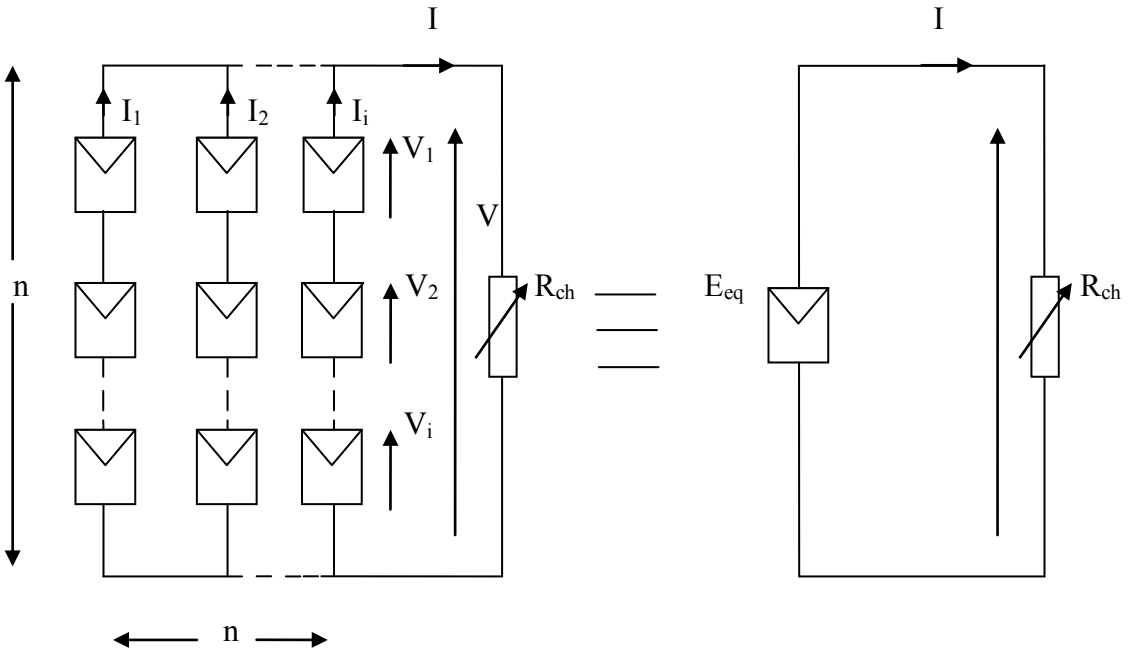


Figure II.12 : Association mixte N_s x N_p modules solaires.

II.5. Panneau photovoltaïque

Les panneaux PV ou les module sont formés de cellules d´un matériel semi-conducteur qui transforme les radiations provenant du soleil en électricité CD. Le panneau est recouvert d´un matériel transparent qui le protège de l´eau et est conçu pour que le montage soit facile. Les panneaux sont installés dans une localisation ensoleillée (l´ombre réduit la performance) sur une inclinaison avec un angle équivalent à la latitude du site mais ne doit pas avoir moins de 15 degrés pour faciliter l´échappement de la pluie de la poussière. Les panneaux faits de silicone monocristal et de poly cristal de silicone amorphe (fine pellicule) sont certifiés par un standard international et ont une garantie de plus de 25 ans et sont habituellement d´un choix sûr. Cependant, lorsque les compagnies se retirent du commerce ou si se multiplient les fusions et que les ventes se produisent, la durabilité pratique des garanties peut être alors remise en cause.



Figure II.13 : Panneau photovoltaïque.

Pour chaque panneau, on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boite de dérivation qui les regroupe, alors cette boite de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie.

II.5.1. Systèmes photovoltaïques avec stockage électro-chimique

Parmi les solutions disponibles, le stockage électro-chimique par batterie d'accumulateurs offre une bonne réversibilité entre la décharge et la recharge, les batteries au Plomb acide, offrant actuellement un des meilleurs compromis entre service rendu et coût d'exploitation.

II.5.2. Les convertisseurs DC-DC (les hacheurs)

L'énergie solaire est une source d'énergie dont la disponibilité varie considérablement dans la journée. Son utilisation de façon optimale nécessite la prise en compte des types de charges (batteries, lampes, etc.). Dans cette optique, quelques auteurs [14-19] utilisent un convertisseur boost afin de maximiser la production et l'utiliser de façon optimale. L'objectif de ce travail est de présenter une meilleure conception d'un convertisseur boost capable de rechercher la puissance maximale quelles que soient les variations de l'ensoleillement.

II.5.2.1. Modélisation du convertisseur survolteur

Le hacheur survolteur (Boost), le convertisseur boost ou hacheur parallèle connu par le nom d'élévateur de tension (step-up), est donné par la Figure (II.14), il est généralement utilisé dans la conversion d'une tension d'entrée basse en une tension de sortie haute, il se compose d'une source de tension d'entrée continue V_i, d'une inductance L, d'un interrupteur S, d'une diode, et deux condensateurs Cin et Cout. En premier temps [0, αT] le transistor est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, au fur et à mesure elle emmagasine

de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période, le transistor s'ouvre et l'inductance l s'oppose à la diminution du courant I ainsi elle génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge à travers la diode [13].

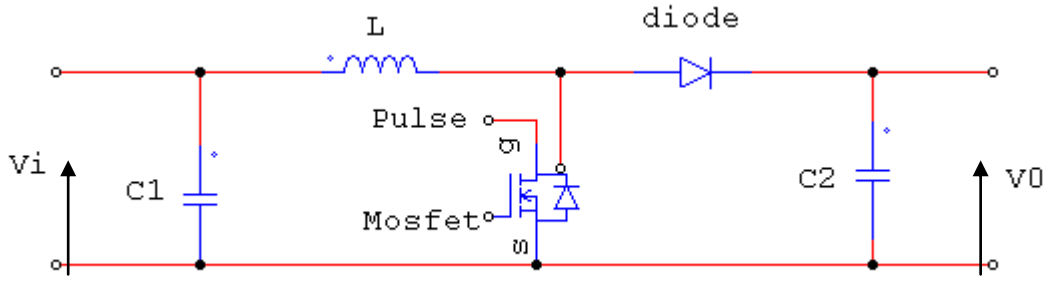


Figure II.14 : Schéma électrique du convertisseur boost.

A. Modèle mathématique équivalent

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur survolteur Figure (II.15) des deux phases de fonctionnement donne :

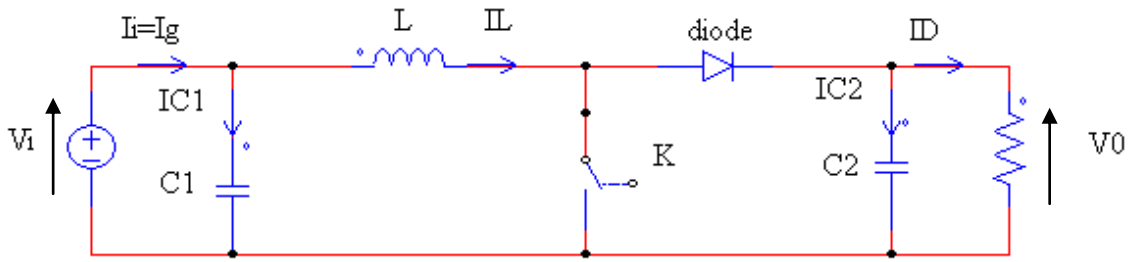


Figure II.15 : Schéma équivalent du hacheur survolteur, (a) : K fermé, (b) : ouvert.

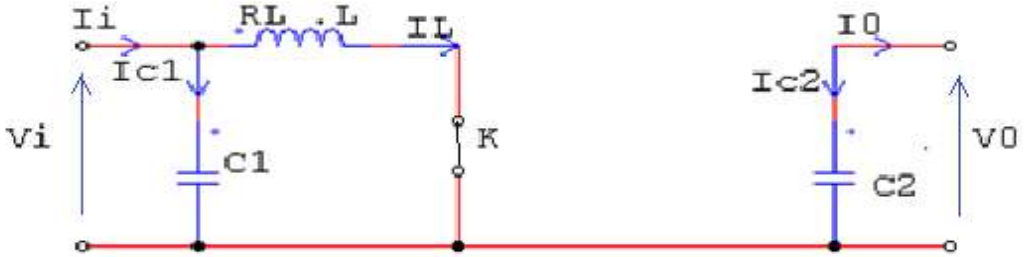


Figure II.16-a : Schéma équivalent du hacheur survolteur, pour K est fermé.

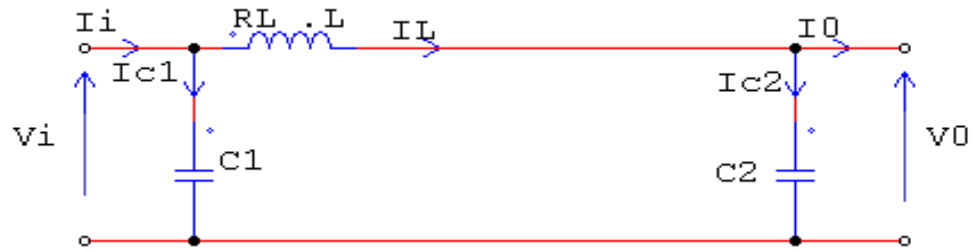


Figure II.16-b : Schéma équivalent du hacheur survolteur, pour K est ouvert.

Pour la première période αTs :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \dfrac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C_2 \dfrac{dV_0}{dt} = -I_0 \\ V_L = L \dfrac{dI_L}{dt} = V_i - R_L I_L \end{cases} \quad \text{(II.7)}$$

Pour la deuxième période (1-α) Ts :

$$\begin{cases} I_{C1} = C_1 \dfrac{dV_i}{dt} = I_i - I_L \\ I_{C2} = C_2 \dfrac{dV_0}{dt} = I_L - I_0 \\ V_L = L \dfrac{dI_L}{dt} = V_i - V_0 - R_L I_L \end{cases} \quad \text{(II.8)}$$

II.5.2.2. Modèle approximé du convertisseur Boost

Le convertisseur oscillant entre αTS et (1-α) TS avec une fréquence élevée, nous devons trouver une représentation dynamique approximée valable pour les deux intervalles de temps pour cela nous considérons que la variation des variables dynamiques C_I, V_L est de forme linéaire, en d'autres termes nous pouvons faire une approche de exponentielle par un segment ($e^{\varepsilon} \approx 1+\varepsilon \; si \; \varepsilon \ll 1$) et ainsi la dérivée de ces grandeurs sera constante. Cette approche nous permet de décomposer l'expression de la valeur moyenne de la dérivée de la variable dynamique x sur les deux laps de temps αTs et (1-α) Ts:

$$< \frac{dx}{dt} > Ts = \frac{dx}{dt_{(\alpha Ts)}} + \alpha Ts + \frac{dx}{dt_{(1-\alpha)Ts}} (1-\alpha) Ts \quad \text{(II.9)}$$

Où $<\frac{dx}{dt}>$ est la valeur moyenne de la dérivée de x sur une période Ts. Cette relation est valide si: $\frac{dx}{dt(\alpha Ts)}$ et $\frac{dx}{dt(1-\alpha)Ts}$ sont constants sur les périodes αTs et (1−α) Ts respectivement en d'autres termes cette approximation est valable si les périodes αTs et (1−α) Ts sont très faibles devant la constante de temps du circuit C_{1RG}, C_{2Z}, L/RL dans ce cas la forme exponentielle du courant qui parcourt la self et la tension aux bornes de la capacité est de forme linéaire comme le montre la Figure (II.17).

G :

Z :

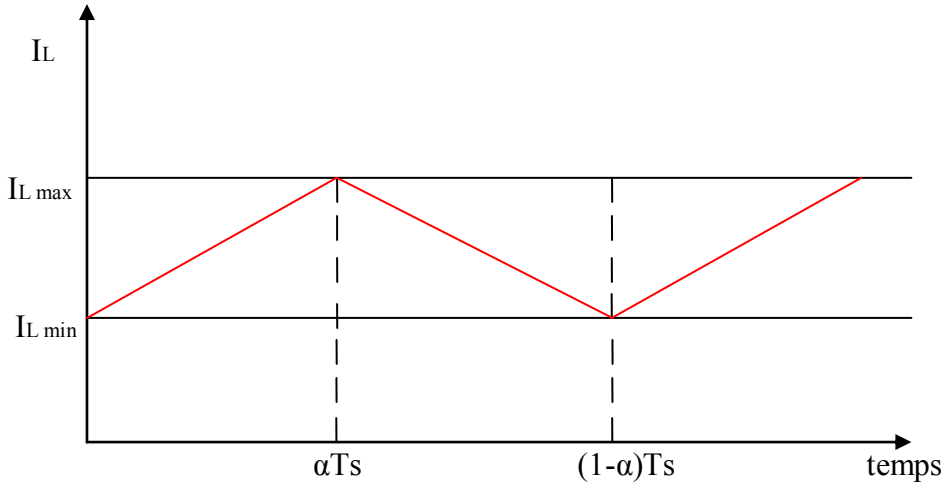


Figure II.17 : Allure des variables dynamiques.

En appliquant la relation (II.3) sur les systèmes d'équations (II.1) et (II.2) on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$I_{C1} = C1\frac{dV_g}{dt}\alpha T_s = (I_g - I_L)\alpha T_s + (1-\alpha)T_s(I_g - I_L) \quad \text{(II.10)}$$

$$I_{C2} = C_2\frac{dV_0}{dt}\alpha T_s = -\alpha T_s I_0 + (1-\alpha)T_S(I_L - I_0) \quad \text{(II.11)}$$

$$V_L = L\frac{dI_L}{dt}\alpha T_S = (V_g - R_L I_L)\alpha T_S + (1-\alpha)T_s(V_g - V_0 - R_L I_L) \quad \text{(II.12)}$$

En arrangeant les termes des équations précédentes, (pour qu'on puisse interconnecter le boost avec les autres blocs de simulation), on obtient la modélisation dynamique du convertisseur boost.

$$I_L = I_g - C_1\frac{dV_g}{dt} \quad \text{(II.13)}$$

$$I_0 = (1-\alpha)I_L - C_2\frac{dV_0}{dt} \quad \text{(II.14)}$$

$$V_g = (1-\alpha)V_0 + L\frac{dI_L}{dt} + R_L + I_L \quad \text{(II.15)}$$

Pour le dimensionnement des différents composants du circuit afin de diminuer les ondulations des courants et des tensions sans faire un sur dimensionnement ce qui accroîtrait le poids et le prix des circuits, un calcul de ces composants en fonction des ondulations voulues est nécessaire. Cette remarque est très importante pour le dimensionnement de l'inductance L afin de respecter le courant admissible par le transistor MOSFET S, où dans le cas pratique les ondulations du courant I_L sont plus importantes par rapport aux autres ondulations.

En appliquant la relation ($V_0 + L\frac{dIL}{dt}$) et par l'approximation des segments d'exponentielles par des droites, la pente du courant pendant la première période de fonctionnement est donnée par :

$$\frac{d_{I_L}}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_S - R_L I_L}{L} \quad \text{(II.16)}$$

à partir de la relation (II.9), la valeur crête à crête du courant I_L est :

$$I_{icc} = 2\Delta I_L = \frac{V_S - R_L I_L}{L}\alpha T_S \quad \text{(II.17)}$$

La valeur de l'inductance L à choisir pour certaine ondulation ΔIL est :

$$L \approx \frac{V_g - V_0 - R_L I_L}{2\Delta I_L} \quad \text{(II.18)}$$

Pour le calcul des capacités C_1et C_2 on a :

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{I_{C1}}{C_1} = \frac{I_0 - I_L}{C_1} \quad \text{(II.19)}$$

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{I_{C2}}{C_2} = \frac{-I_0}{C_2} \quad \text{(II.20)}$$

Les valeurs des ondulations crête à crête des tensions d'entrées et de sorties sont :

$$V_{C1CC} = 2\Delta V_{C1} = \frac{I_g - I_L}{C_1}\alpha T_s \quad \text{(II.21)}$$

$$V_{C2CC} + 2\Delta V_{C2} = \frac{-I_0}{C_2}\alpha T_s \tag{II.22}$$

Les valeurs des capacités C_1 et C_2 sont respectivement données par :

$$C_1 = \frac{I_g - I_L}{2\Delta V_{C1}}\alpha T_S \tag{II.23}$$

$$C_2 = \frac{-I_0}{2\Delta V_{C2}}\alpha T_S \tag{II.24}$$

II.5.2.3. Étude en régime continu

Le régime continu est obtenu en éliminant les dérivées des variables dynamiques, et en remplaçant ces signaux par leurs valeurs moyennes.

Le système d'équations (II.6), (II.7) et (II.8) donne :

$$I_L = I_g \tag{II.25}$$

$$I_0 = (1-\alpha)I_L \tag{II.26}$$

$$V_g = (1-\alpha)V_0 \tag{II.27}$$

Comme le présente la Figure (II.18), lorsque l'interrupteur du transistor S est sur la position on, le courant de l'inductance du hacheur augmente linéairement et à cet instant la diode D est bloquée off et lorsque S tourne sur la position off, l'énergie emmagasinée par l'inductance est dissipée dans le circuit RC bien que la diode D est passante. Les caractéristiques de tension et du courant de charge du convertisseur boost dans le cas de la conduction continue sont décrites par la figure (II.4), comme suit :

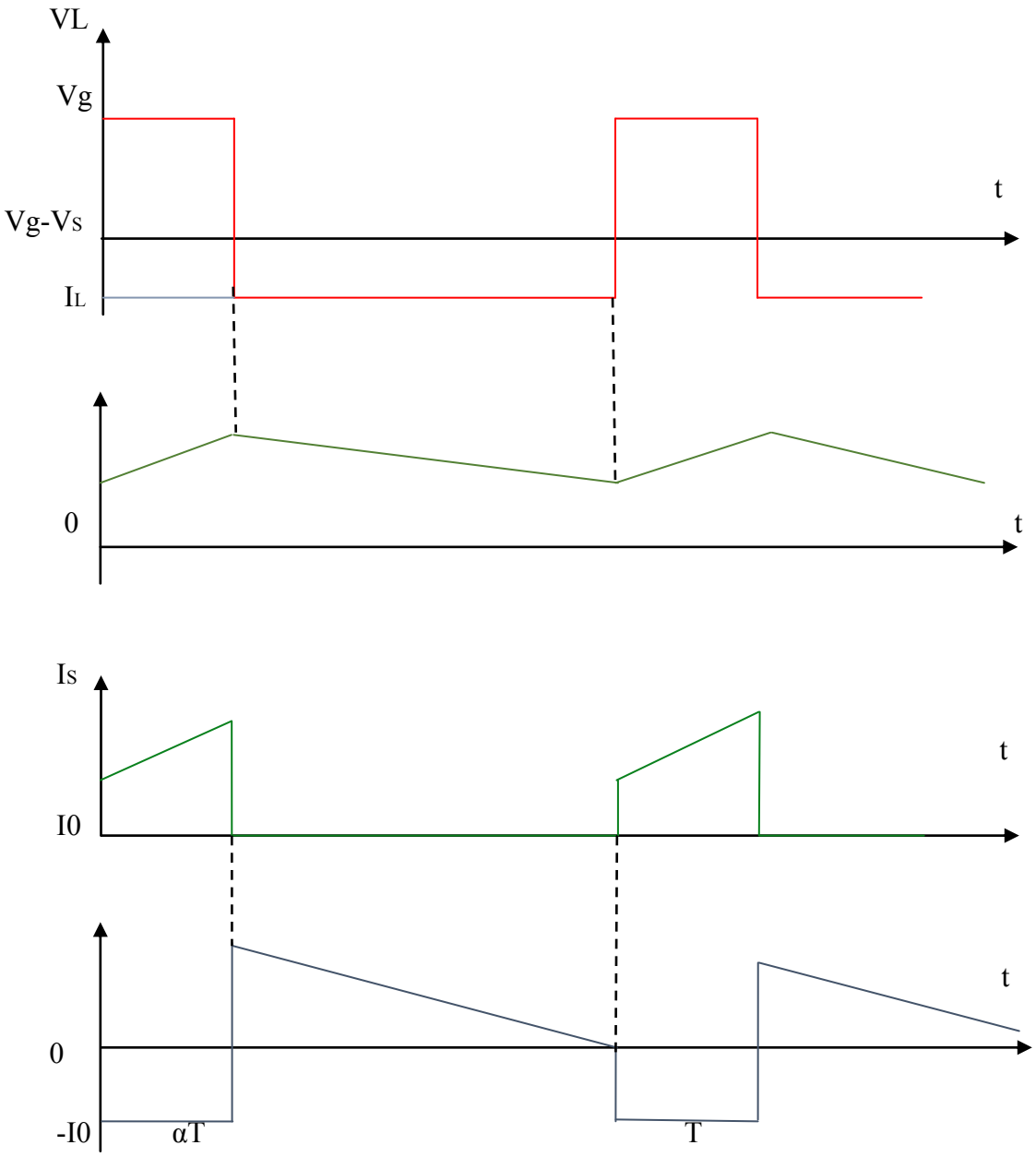


Figure II. 18 : Caractéristique de la tension et du courant du hacheur survolteur.

II.5.2.4. Modélisation du convertisseur dévolteur (Buck)

La figure (II.5) présente le convertisseur buck ou convertisseur dévolteur (abaisseur de tension) ou hacheur série. Son rôle principal est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure.

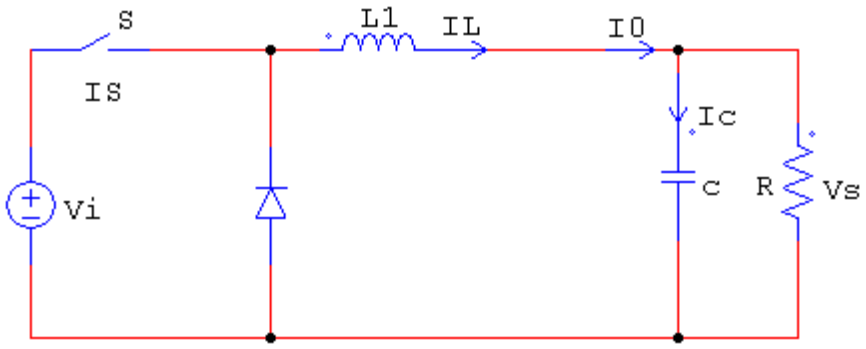


Figure II. 19 : Circuit électrique de base du hacheur dévolteur.

Les composantes clés sont l'inductance L, le commutateur transistor S, la diode D et le condensateur C. Celui-ci se charge par le commutateur S et qui maintient la tension à ces bornes jusqu'à l'ouverture de qui fait décharger son énergie à travers la diode sur la charge pour un cycle de période de fonctionnement. Le commutateur peut être un transistor MOSFET ou un IGBT qui peut se commuter sur deux positions, marche ou arrêt rapidement. La tension de la source doit être plus grande que la tension aux bornes de la charge. L'équation mathématique caractérisant le courant de l'inductance est donnée par l'équation suivante :

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{V_i - V_s}{L} \qquad \text{(II.28)}$$

I_L: le courant dans l'inductance. Le processus de commutation est décrit par la position de l'interrupteur S. Dans le premier laps de temps αT le transistor est dans un état de saturation, alors l'inductance L se charge d'énergie avec augmentation du courant. Dans le deuxième laps de temps (α-1) T, l'inductance L libère cette énergie à la charge avec une diminution de courant. En négligeant la chute de tension à travers la diode, le taux de changement du courant est donné par :

$$\frac{\delta I}{\delta t} = \frac{V_i}{L} \qquad \text{(II.29)}$$

lorsque le courant de l'inductance ne se décroit pas à zéro avant la commutation du transistor, le convertisseur fonctionne dans le mode de conduction continu, comme illustré sur la figure (II.5), et dans ce cas, si la tension de charge dépend seulement de la tension de source et du rapport cyclique α = Ton/T la tension aux bornes de la charge Vs= αVi. Dans le mode de

conduction discontinu le courant de l'inductance s'annule dans un cycle de commutation entre le transistor S et la diode. Dans ce cas, la tension de charge dépend d'une manière plus complexe du rapport cyclique et le courant de la charge, la figure (II.6) montre comment la tension de charge que varie avec le courant de charge. Les caractéristiques des courants et la tension représentant le fonctionnement du hacheur dévolteur sont données par la figure (II.6):

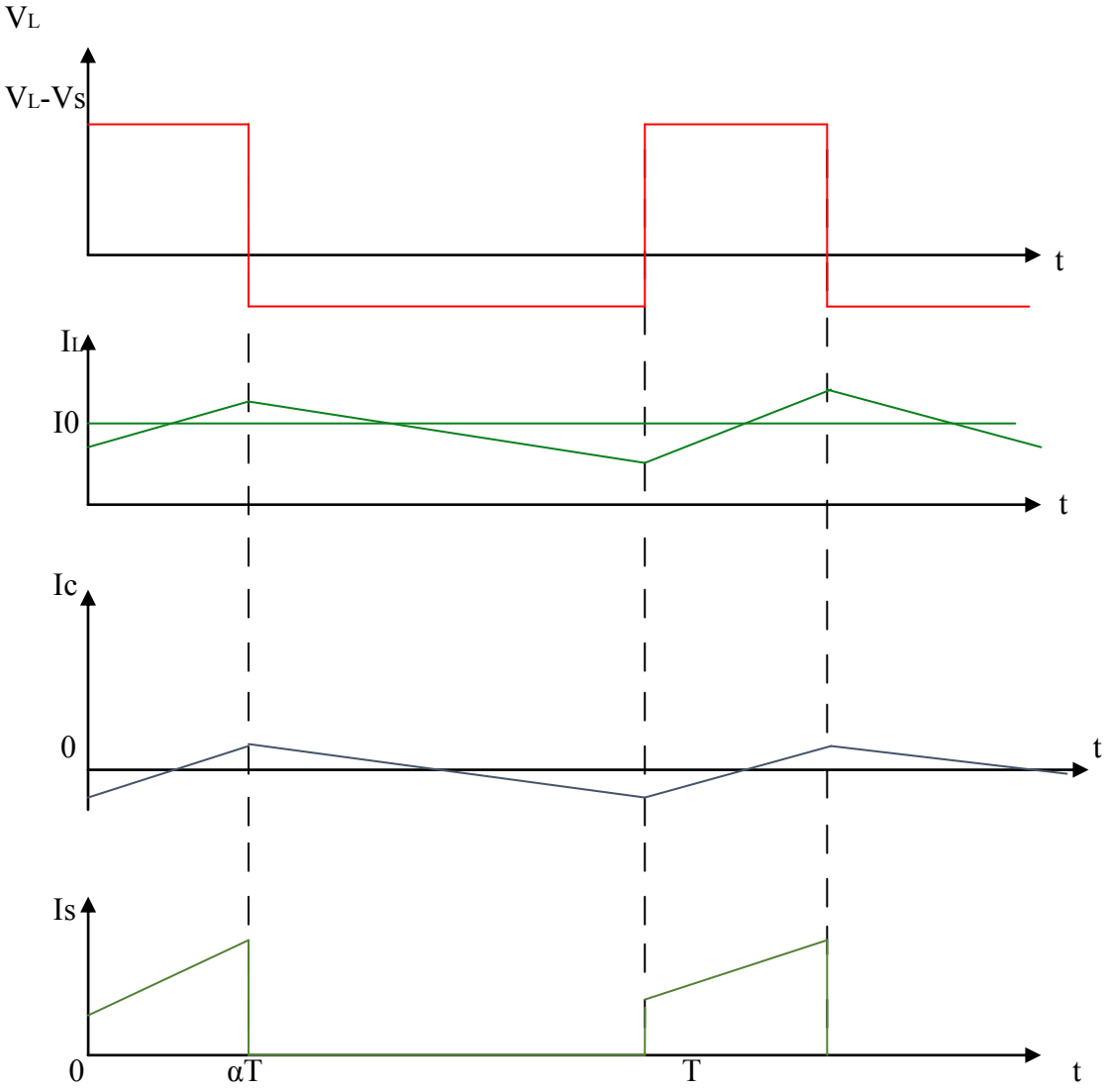


Figure II.20 : Caractéristique de la tension et des courants.

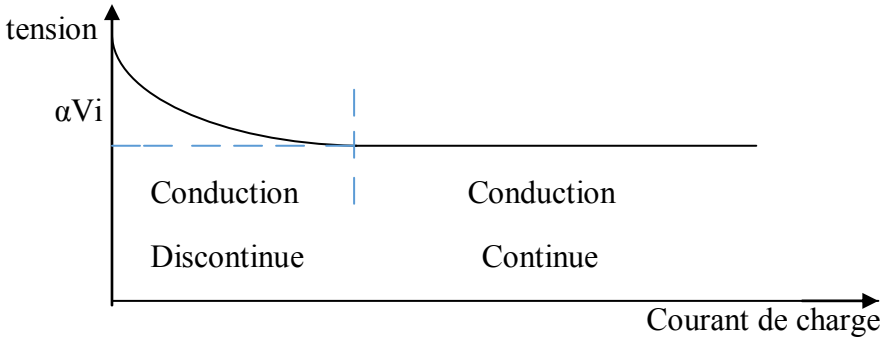


Figure II.21 Variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un Convertisseur Buck [16].

II.5.2.5 Modélisation du convertisseur Buck-Boost :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des configurations de dévolteur et de survolteur. Il peut être employé pour transformer idéalement n'importe quelle tension continue d'entrée en n'importe quelle tension continue désirée de sortie.

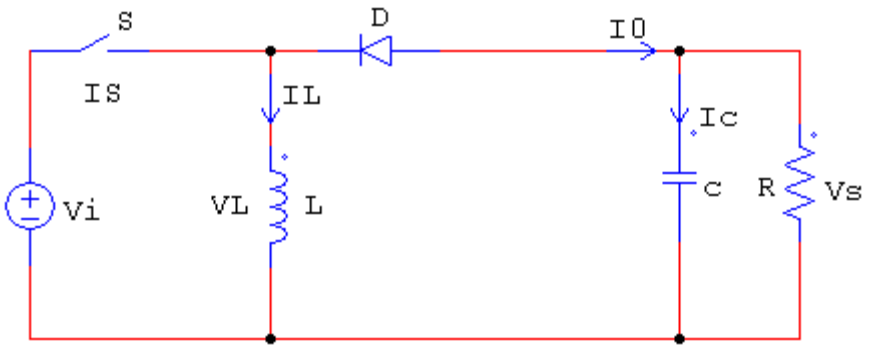


Figure II.22 Circuit électrique de base du hacheur survolteur/dévolteur.

La figure (II.8) montre le schéma de le circuit électrique de base du hacheur dévolteur-survolteur, et les caractéristiques du courant et de la tension de charge dans ce dispositif. La tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cependant, la tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée. Tandis que, lorsque le transistor est sur la position on le courant dans l'inductance augmente, l'énergie est stockée ; et quand le commutateur tourne sur la position off, la tension à travers l'inductance est renversée et l'énergie stockée se transfert vers la charge via la diode. Dans ce cas, l'équation de la tension

aux bornes de la charge décrivant le fonctionnement en conduction continue est donnée comme suit:

$$V_s = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_i \qquad \text{(II.30)}$$

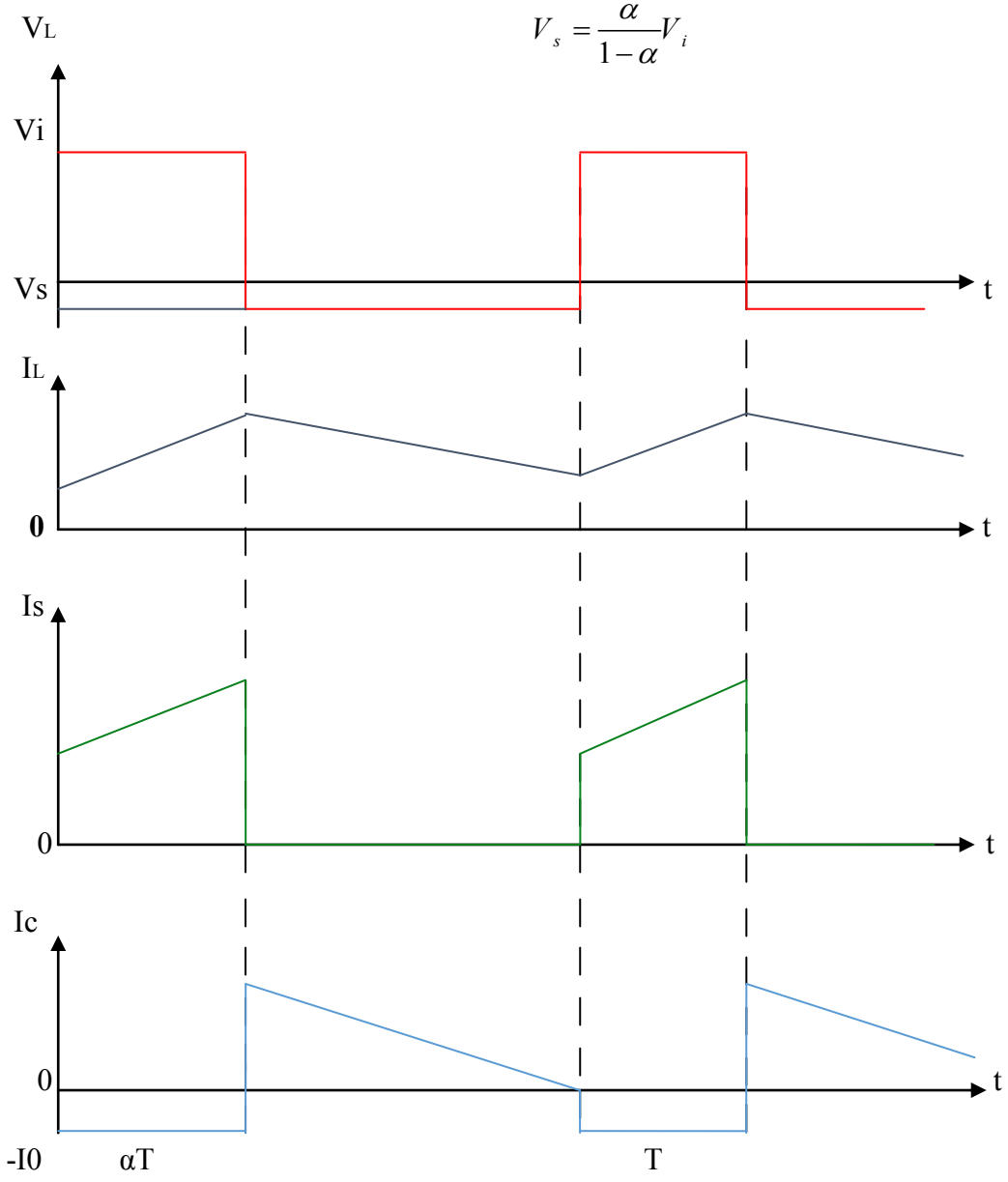


Figure II.23 Caractéristique de la tension et du courant du buck-boost.

Le système de poursuite de point de puissance maximale comme le montre la **Figure II.10** est composée de deux parties :

- Partie commande
- Partie d'électronique de puissance comprenant un convertisseur DC-DC

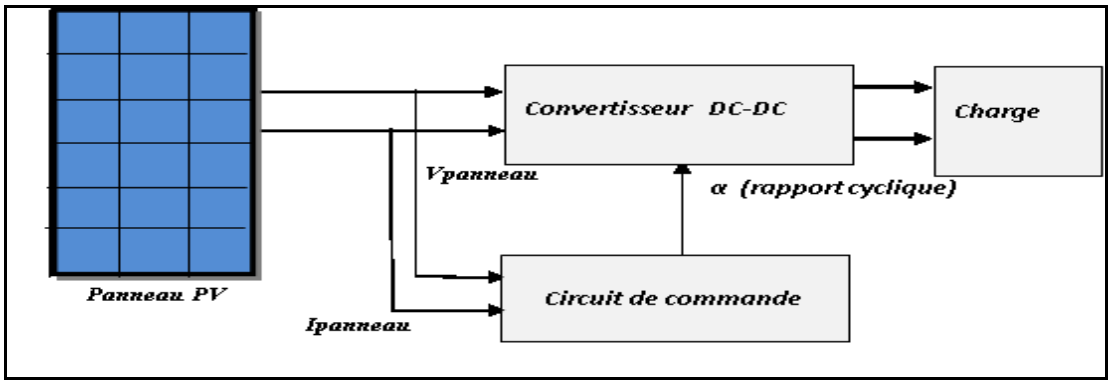


Figure II.24 Schéma synoptique d'un système de poursuite du point de puissance maximale

II.6 Méthode de poursuite de puissance maximale ;

Un panneau photovoltaïque a des caractéristiques courant–tension (IV) non linéaires. Sa puissance de sortie change avec les conditions atmosphériques. Il existe seulement un point (PPM) où la puissance est maximale

L'efficacité d'un système photovoltaïque n'est améliorée si seulement si le panneau est actionné intentionnellement au PPM indépendamment des variations des conditions atmosphériques. Ceci peut être fait en accordant correctement le panneau avec la charge à l'aide des techniques qui détectent et localisent électriquement les PPM sans qu'à priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni quelles étaient les raisons de ce changement

Ces techniques sont appelées MPPT « maximum power tracking » en anglais ou souvent nommées « recherche de point de puissance maximale ». Elles sont utilisées pour extraire le maximum de puissance disponible à l'aide d'un algorithme implanté dans un microcontrôleur et un étage d'adaptation à savoir un hacheur ou un onduleur selon l'exigence du système.

La littérature rapporte un grand nombre de techniques MPPT, le choix d'une d'entre elles reste éprouvant puisque chacune a ses avantages et ses inconvénients.

Pour cela on présente dans ce chapitre quelques techniques de poursuite du point de puissance maximale en détaillant les plus simples à savoir :

- Conductance incrémentale.
- Perturbation & observation (P&O).

II.6.1 Classification des méthodes de poursuite du point de puissance maximale :

La poursuite du point de puissance maximale est un sujet de recherche qui demeure toujours d'actualité. De nombreuses publications voient le jour chaque année présentant de nouvelles idées d'algorithmes ou de nouvelles versions d'anciens algorithmes, dans le seul but d'affiner les rendements. Les algorithmes MPPT peuvent être classés de différentes manières. dans ce travail, nous présentons une classification basée sur le principe de fonctionnement de l'algorithme utilisé. Ainsi, nous distinguons quatre grandes familles d'algorithmes MPPT comme illustré par la **Figure II.25.**

- Les algorithmes exploitant les propriétés des caractéristiques électriques du générateur PV. Ces algorithmes, comme est le cas pour l'algorithme à tension constante, l'algorithme de la tension à circuit ouvert ou encore celui du courant de court-circuit , exploitent des relations existant entre les références du point de puissance maximale (courant et tension) et les caractéristiques du générateur photovoltaïque comme le courant de court-circuit **I cc** ou la tension de circuit ouvert **Vco.**
- Les algorithmes exploitant les modèles mathématiques des générateurs PV.
- Les algorithmes se basant sur la forme de la caractéristique de puissance du générateur PV comme l'algorithme perturbation et observation et l'algorithme à conductance incrémentielle.
- Et enfin, dans la dernière famille, nous classons tous les autres algorithmes y compris ceux exploitant les nouveaux concepts tels que ceux de l'intelligence artificielle

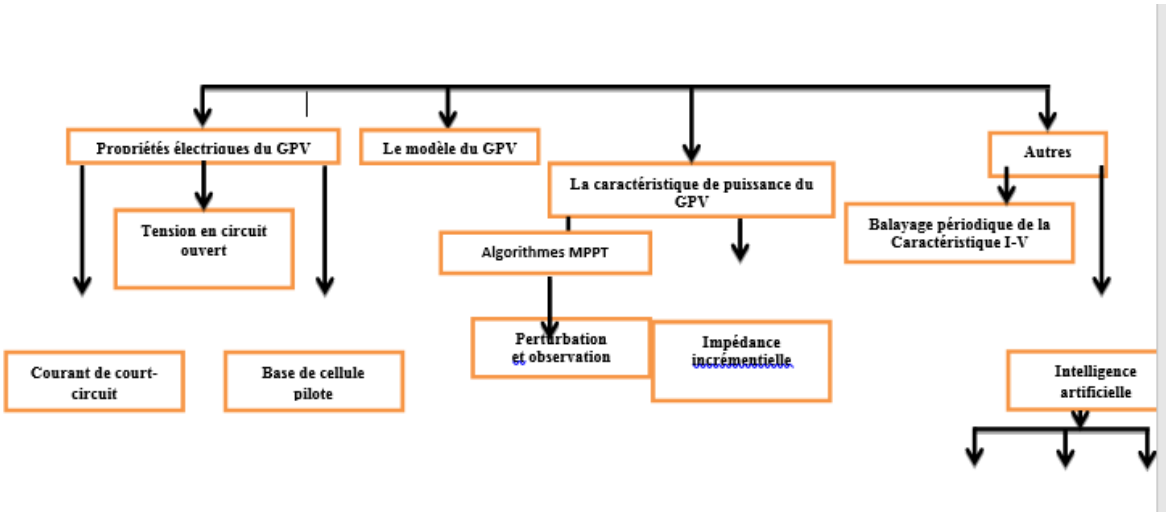


Figure II.25 Classification des méthodes MPPT.

Alors la partie commande est caractérisée par : La méthode à utiliser afin d'effectuer une opération de poursuite de point de puissance maximale**.**

Différents méthodes de recherche du point de puissance maximale peuvent être utilisées, on peut citer à titre d'exemple

- Méthodes à contre réaction de tension.
- Méthodes à contre réaction de courant.
- Méthodes à contre réaction de puissance.

II.6.2 Algorithme perturbation et observation (P and O) :

La méthode perturbation et observation (P&O) procède en changeant continuellement le point de fonctionnement jusqu'à le faire coïncider avec le point de puissance maximale (PPM). Cela s'effectue en perturbant le point de fonctionnement du système et en observant ce qui se produit en sortie au niveau de la puissance pour en décider de l'action à suivre durant le suivant cycle de perturbation, d'Ou son appellation P&O algorithme. L'organigramme de cette méthode MPPT est illustré par la **Figure II-26**

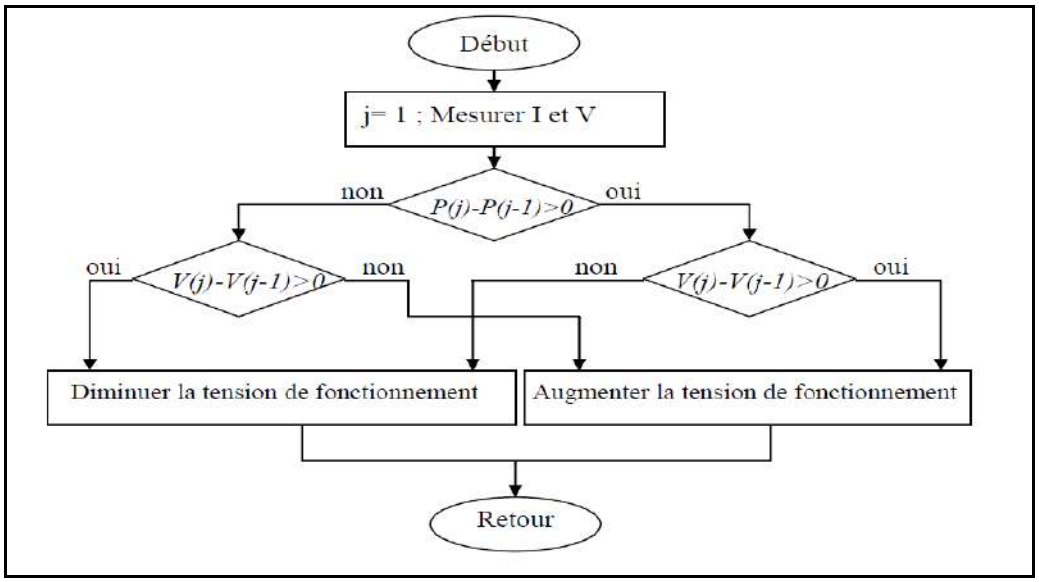


Figure II.26 Organigramme de l'algorithme MPPT P&O.

Pour mieux expliquer le principe, nous considérons la **Figure II.27**. Nous commençons par supposer que le point de fonctionnement initial (PF) du système se trouve en point **A**, une perturbation causée par une augmentation de la tension de fonctionnement fait déplacer le PF vers la position **B**. Dans ce cas de figure, une augmentation de la puissance de sortie sera observée. Cela voudrait dire que la recherche du PPM se fait dans la bonne

direction et par conséquence, la décision à prendre serait de maintenir le même sens de recherche et donc de perturbation durant le prochain cycle. Dans un deuxième cas de figure. Nous supposons que le point de fonctionnement se trouve en point **C**, une perturbation dans le sens croissant de la tension causera, cette fois ci, le déplacement du PF vers la position **D**. Coté puissance, une diminution sera observée ce qui nous permet de déduire que le point de puissance maximale recherché se trouve dans l'autre direction, la tension de fonctionnement sera diminuée au lieu d'être augmenté durant le prochain cycle de recherche.

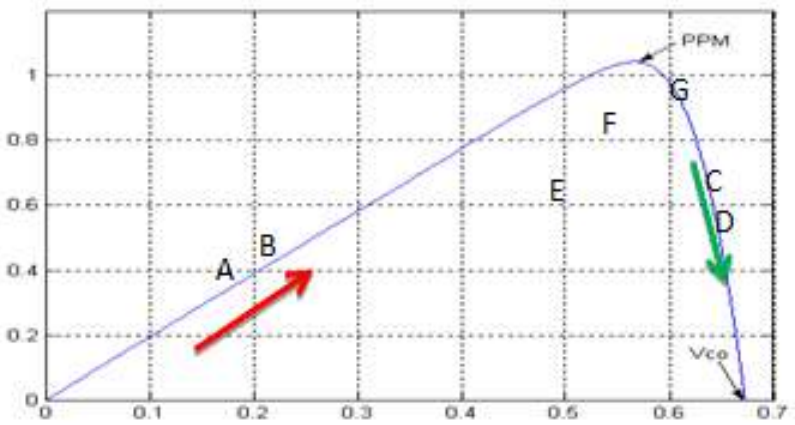


Figure II.27 Principe de la recherche du PPM selon la méthode P&O.

Il faut noter que la méthode P&O est l'une des méthodes les plus utilisées pour la recherche du PPM. Cela est dû essentiellement à la simplicité de son raisonnement, sa facilité d'implémentation et surtout à son faible coût qui est relatif au nombre de mesures qu'elle nécessite pour son bon fonctionnement. Toutefois, elle présente deux inconvénients majeurs qui suscitent, depuis des années, plusieurs recherches dans le but de minimiser leurs impactes. Le premier inconvénient concerne les oscillations que présente l'algorithme de recherche autour du point de puissance maximale une fois ce dernier atteint. Et le deuxième inconvénient étroitement dépendant et faisant face au premier concerne la rapidité de la recherche.

Pour mieux expliquer ces deux inconvénients, nous proposons ce scénario de recherche dans le cas de conditions stables de fonctionnement, c'est-à-dire température et ensoleillement fixes ou lentement variables. L'algorithme commence la recherche à partir du point **A**, après plusieurs cycle de recherche le point **E** est atteint. Le teste au niveau de la puissance est

positif, la direction de la recherche est maintenue, le point de fonctionnement durant le cycle suivant de la perturbation passe à **F**, le test sera positif aussi, ce qui fait que le prochain PF sera en **G. A** ce moment, le test fait signaler qu‟il faut changer de direction, et ainsi le PF se trouvera au point **F**, le test pour la puissance sera positif, mais le prochain PF sera en **E** dont la puissance est inférieure à celle du point **F**, donc un changement de direction sera obligatoire et ainsi de suite, le point de fonctionnement oscillera sans cesse autour du point de fonctionnement ce qui engendrera une perte de puissance non négligeable.

Pour minimiser l'impact de ces oscillation, une solution existe, prendre un pas de perturbation (**ΔV**) le plus petit possible de manière à minimiser l'amplitude des oscillations. Mais ce choix là va avoir une autre conséquence néfaste, l'algorithme sera ralenti, et le nombre de cycle de perturbation nécessaire pour approcher le PPM sera remarquablement augmenté.

Le deuxième inconvénient se manifeste lors d'un changement considérable et rapide dans les conditions de travail, l'algorithme peut perdre le sens d'orientation de la recherche et fait déplacer le point de fonctionnement loin du PPM au lieu de s'en approcher. Ce cas de figure, illustré par la **Figure II.28**, se présente lorsqu'un changement brusque en rayonnement solaire surgit durant une phase de perturbation et nécessite une modification importante de la tension de fonctionnement dans le sens opposé à celui en plein exécution. Le point de fonctionnement se trouvant initialement en **A** va être déplacé vers **B1** pour approcher le PPM1 selon l'algorithme P&O, mais une augmentation de l'rayonnement solaire pendant cette phase d'exécution le fait coïncider au point de fonctionnement **B2** sur la nouvelle caractéristique I-V qui correspond à la nouvelle condition de travail. Une perturbation dans le sens contraire aurait déplacé le point de fon Le point de fonctionnement se trouvant initialement en **A** va être déplacé vers **B1** pour approcher le PPM1 selon l'algorithme P&O, mais une augmentation de l'rayonnement solaire pendant cette phase d'exécution le fait coïncider au point de fonctionnement **B2** sur la nouvelle caractéristique I-V qui correspond à la nouvelle condition de travail. Une perturbation dans le sens contraire aurait déplacé le point de fonctionnement vers **C1**, et ceci l'aurait rapproché d'avantage ou le coïncider exactement avec le nouveau PPM qui est le PPM2.

Gérer ces deux inconvénients en même temps n'est pas une tâche facile. En effet, pour que le PF ne soit pas projeté loin du PPM en cas de changement brusque des conditions de travail, il faut choisir un pas de perturbation petit, celui là permet de maintenir l'amplitude des

oscillations dans des limites abordable mais ralenti d'une manière considérable la recherche du PPM et donc le repositionnement du PF en cas de divergence de l'algorithme

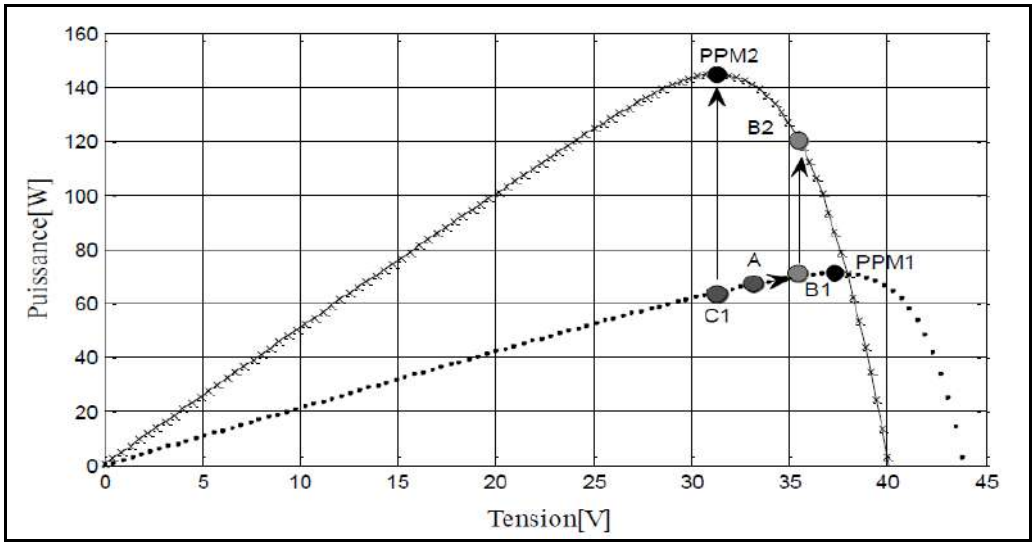


Figure II.28 Divergence de l'algorithme PO en cas de changements brusque des conditions de travail

Dans la littérature, plusieurs recherches se sont intéressées à ce problème : la confusion du sens de recherche du MPP, certaines proposent d'utiliser un pas de perturbation variable . Ainsi, un **ΔV** assez grand peut être choisi pour accélérer la recherche quand le point de fonctionnement (PF) est loin du PPM, tandis qu'une petite valeur est choisie lorsque le PF est aux voisinages du PPM pour minimiser l'amplitude des oscillations, et aussi pendant les brusques changements, de manière à ce que l'algorithme ne diverge pas, ou pas trop. Ceci dit, si la méthode P&O est de loin la plus utilisée, cela est dû à sa simplicité, doter l'algorithme d'un système muni d'une logique de décision pour le choix du pas d'apprentissage nécessite un complément matériel qu'il faut ajouter au coût global de la commande MPPT et du système final. Ce cout supplémentaire peut être apprécié ou pas en fonction de l'apport énergétique qu'apporte cette modification.

II.7. Conclusion :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par la cellule photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule.

CHAPITRE(III)

Commande d'un FAP à deux niveaux par la méthode P-Q et RN alimenté par une source photovoltaïque

III.1. Introduction

Les onduleurs de tension, associés aux machines à courant alternatif, sont de nos jours très largement utilisés dans les systèmes d'entraînement industriels. En premier lieu, les progrès en matière de semi-conducteur ont permis la réalisation des convertisseurs statiques de plus en plus performants. En second lieu, l'évolution des techniques numériques, notamment l'utilisation sans cesse grandissante des processeurs de signaux (DSP, "Digital Signal Processing") et des systèmes à base d'architecture reconfigurable (FPGA,"Field Programmable GateArray"), permet désormais d'exécuter en temps réel des algorithmes complexes de contrôle des convertisseurs. Compte tenu de ces deux principales avancées technologiques, les techniques de MLI ont été l'objet de recherches intensives pendant ces deux dernières décennies. Un nombre important de méthodes, différentes de par leur concept et leur performance ont été développées. La simplicité d'implantation restant cependant encore un critère important, quelques-unes d'entre elles seulement ont gagné la confiance des industriels. Nous nous contenterons ici des généralités sur les techniques de MLI (ST et Hystérésis ainsi la SVM) pour onduleurs triphasés, puisque notre objectif est le contrôle de l'onduleur à six bras alimentant la MAS

Le filtre actif parallèle FAP travaille esten combinaison avec leréseau, le système de filtrage contient deux parties : l'identification des courant harmonique et la commande du filtre, dans notre chapitre on utilise la méthode de puissances instantanées par l'algorithme P-Q Notre filtre, est un onduleur de tension à deux niveaux, alimenté par une source d'énergie renouvelable (photovoltaïque).

III.2. Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux

La Figure (III.1) montre un diagramme schématique d'un seul bras d'onduleurs de différents niveaux dont l'action du semi-conducteur est représentée par un interrupteur idéal ayant plusieurs positions [Mor-11][Dje -07].

L'onduleur à deux niveaux génère une tension de sortie pivotant entre deux valeurs (deux niveaux) tout en respectant la borne négative du condensateur (Figure II.1-a), alors que l'onduleur à trois niveaux génère trois tensions (Figure II.1-b), et ainsi de suite pour l'onduleur N niveaux (Figure II.1-c).

En élevant le nombre de niveaux de l'onduleur, les tensions de sortie ont plusieurs niveaux induisant une forme d'onde de plus en plus proche d'une sinusoïde échantillonnée.

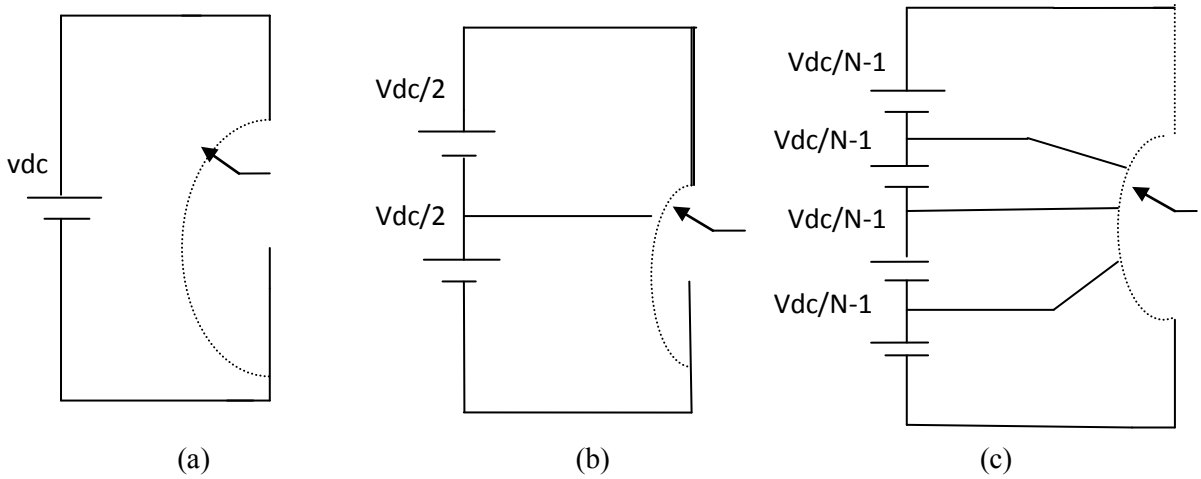


Figure III.1 : Bras d'une phase d'un onduleur de tension : (a) Deux niveaux (b) , Trois niveaux et (c) N niveaux.

Par conséquent, en comparant avec l'onde de la tension de sortie de l'onduleur deux niveaux, celles des onduleurs multi niveaux ont un taux de distorsion plus réduit et donc une moindre pollution harmonique.

Le schéma de l'onduleur montré dans la Figure (II.2) représente un onduleur que l'on appelle à deux niveaux, la sortie de cet onduleur peut prendre deux niveaux de tension (*+Vdc*,*–Vdc*) dépendante de la tension de la source continue et des impulsions de commande des interrupteurs. En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur dépendent de l'état des signaux de commande (*Sa*, *Sb*, *Sc*), comme défini ci-dessous [Zha-07][Gha-16] :

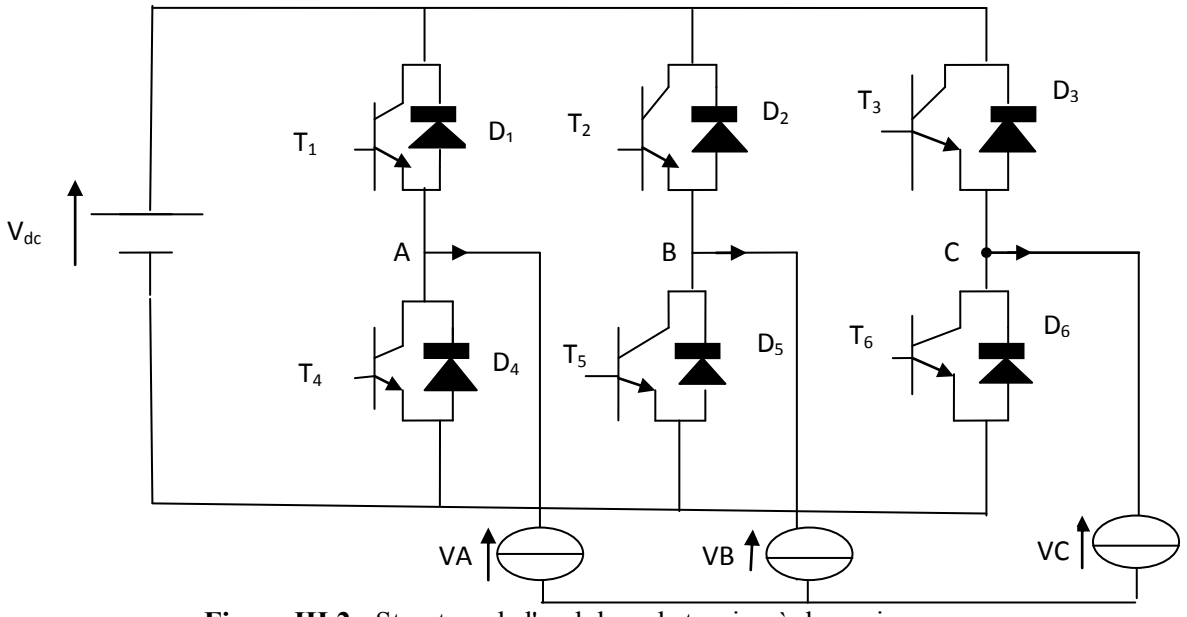


Figure III.2 : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux.

$$Sa=\begin{cases}1\ T1\ fermé\ et\ T4\ ouvert\\ 0\ T1\ ouvert\ et\ T4\ fermé\end{cases}$$

$$Sb=\begin{cases}1\ T2\ fermé\ et T5\ ouvert\\ 0\ T2\ ouvertet T5 fermé\end{cases}$$

$$Sc=\begin{cases}1\ T3\ fermé\ et\ T6\ ouvert\\ 0\ T3\ ouvert\ et\ T6\ fermé\end{cases}$$

A partir de la Figure (II.3), on peut dériver les tensions de l'onduleur en fonction des états des interrupteurs, les potentielles des nœuds A, B, et C de l'onduleur par rapport au point milieu imaginaire *M* sont données par les équations (III.1) :

$$\begin{cases}VAM = UC.(2Sa-1)\\ VBM = UC.(2Sb-1)\\ VCM = UC.(2sc-1)\end{cases} \text{ Avec } \quad UC = \frac{Vdc}{2} \qquad \text{(III.1)}$$

Les tensions composées de l'onduleur s'expriment en fonction des états des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases}VAB = VAM - VBM = 2UC.(Sa-Sb)\\ VBC = VBM - VCM = 2UC.(Sb-Sc)\\ VCA = VCM - VAM = 2UC.(Sc-Sa)\end{cases} \qquad \text{(III.2)}$$

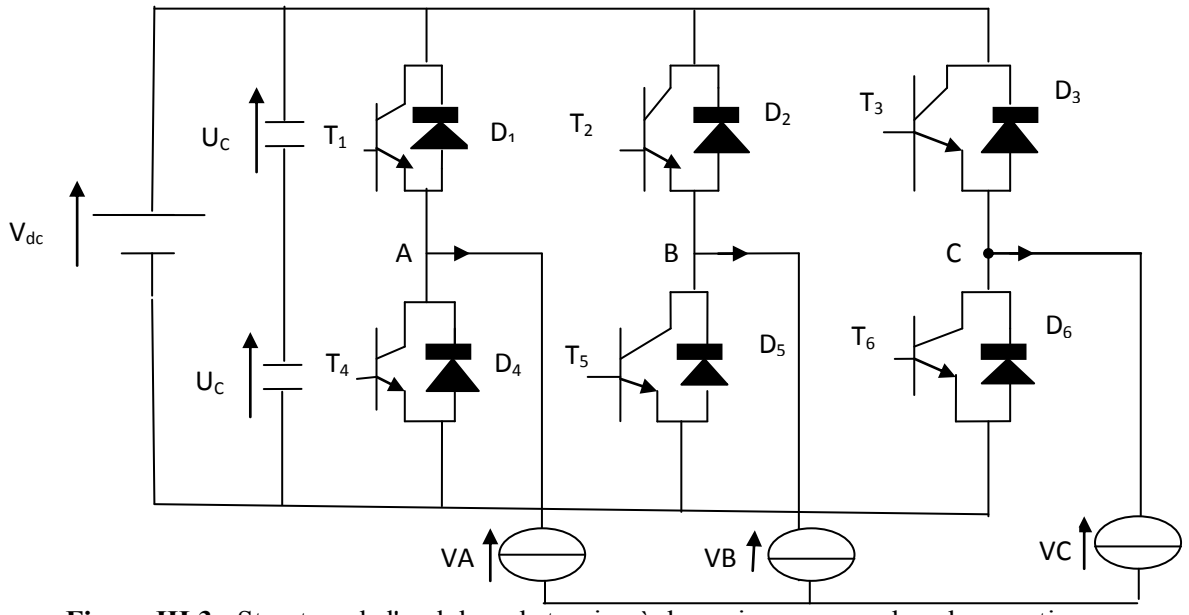


Figure III.3 : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux avec deux bus continus.

III.3.Généralités sur les MLI triphasées

$$\begin{cases} VAB = VAn - VBn \\ VBC = VBn - VCn \\ VCA = VCn - VAn \end{cases} \quad \text{(III.3)}$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} VAB - VCA = -(VBn + VCn) + 2VAn \\ VBC - VAB = -(VCn + VAn) + 2VBn \\ VCA - VBC = -(VAn + VBnà + 2VCn \end{cases} \quad \text{(III.4)}$$

Dans un système de trois tensions équilibrées, la somme des tensions est nulle, alors :

$$VAn + VBn + VCn = 0 \quad \text{(III.5)}$$

A partir de la relation (II.5), on peut écrire :

$$\begin{cases} VAn = -(VBn + VCn) \\ VBn = -(VAn + VCn) \\ VCn = -(VAn + VBn) \end{cases} \quad \text{(III.6)}$$

En remplaçant le système (II.6) dans (II.4), on peut trouver les tensions simples de l'onduleur en fonction de celles composées :

$$\begin{cases} VAn = \frac{VAB - VCA}{3} \\ VBn = \frac{VBC - VAB}{3} \\ VCn = \frac{VCA - VBC}{3} \end{cases} \quad \text{(III.7)}$$

A partir des systèmes (II.2) et (II.7), les tensions simples de l'onduleur peuvent s'écrire en fonction des états Sa ,Sb et Sc et de la tension V_{dc} comme suit :

$$\begin{cases} Vfa = VAn = 2UC\frac{2Sa - Sb - Sc}{3} = VdC\frac{2Sa - Sb - Sc}{3} \\ Vfb = VBn = 2UC\frac{2Sb - Sa - Sc}{3} = Vdc\frac{2Sb - Sa - Sc}{3} \\ Vfc = VCn = 2UC\frac{2Sc - Sa - Sb}{3} = Vdc\frac{2Sc - Sa - Sb}{3} \end{cases} \quad \text{(III.8)}$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de la tension de sortie du filtre actif V_{fk}(référées au neutre *n* de la source) comme le montre le Tableau (III.1).

Tableau III.1 : Tensions possibles à la sortie de l'onduleur.

Cas	S_a	S_b	S_c	V_{fa}/V_{dc}	V_{fb}/V_{dc}	V_{fc}/V_{dc}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3
2	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3
3	1	1	0	1/3	1/3	-2/3
4	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3
5	1	0	1	1/3	-2/3	1/3
6	0	1	1	-2/3	1/3	1/3
7	1	1	1	0	0	0

Pour commander l'onduleur à deux niveaux par la modulation de largeurs d'impulsions (MLI), on a étudié la commande triangulo-sinusoïdale (Figure III.4).

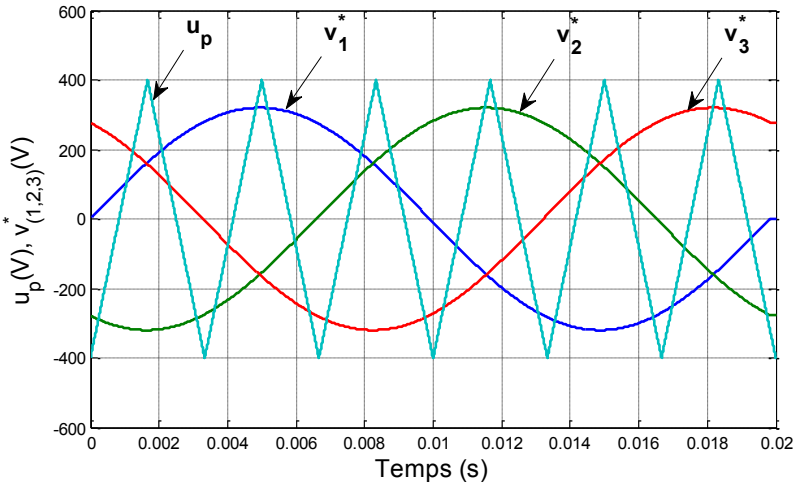
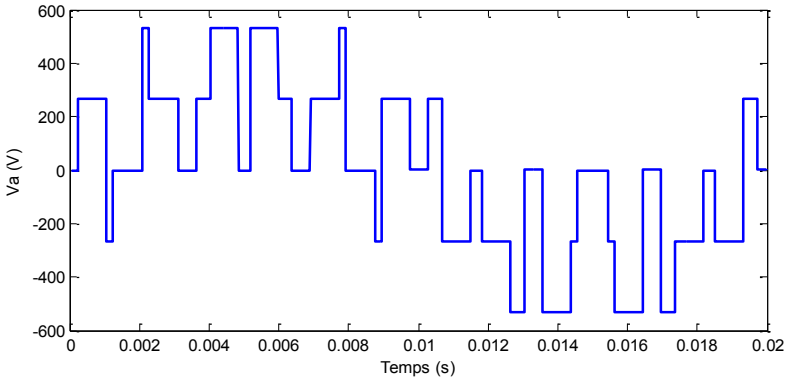


Figure III.4: Stratégie triangule-sinusoïdale de M LI (m =6, r = 0,8).

La Figure (II.5) représente la tension de l'onduleur à deux niveaux commandé par la technique MLI, et représente le spectre harmonique de la tension simple (phase *a*) de l'onduleur (m=6, r=0.8) dont les valeurs des THDva et égale à 92.09%.



(a)

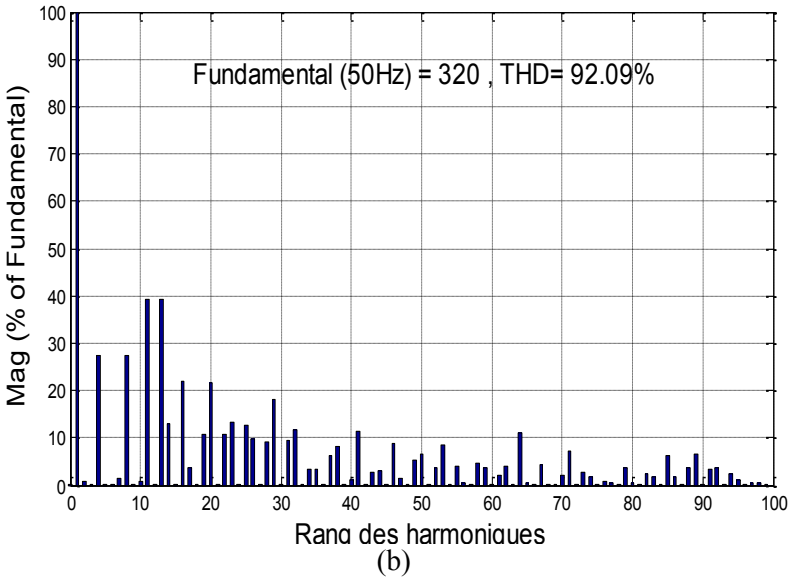


Figure III.5 : La tension simple va et son spectre de l'onduleur triphasé à deux niveaux commandé par la stratégie triangule-sinusoïdal pour m=6 avec r=0.8 et f=50Hz.

III. 4.Stratégies de commande classique

Dans cette étude, la technique de commande indirecte du courant du filtre actif sera présentée, en utilisant un régulateur (PI). La tension du bus de mesurée du filtre actif est comparé avec une tension de référence, l'erreur engendrée sert d'entrée pour le régulateur PI, La sortie du régulateur devient une estimation du courant maximum du filtre · Ce courant prend soin de la puissance active demandée par le filtre actif et les pertes engendrées dans l'onduleur [Pot-97][Ham-04a]. Les courants de référence instantanés de la source sont évalués en utilisant l'identification des courants harmoniques par le courant maximum et les trois tensions de source avec trois courants de charge comme nous verrons ci-après avec la méthode des puissances instantanées active et réactive P-Q.

Le schéma synoptique de commande indirecte du filtre actif est donné en Figure (III.6).

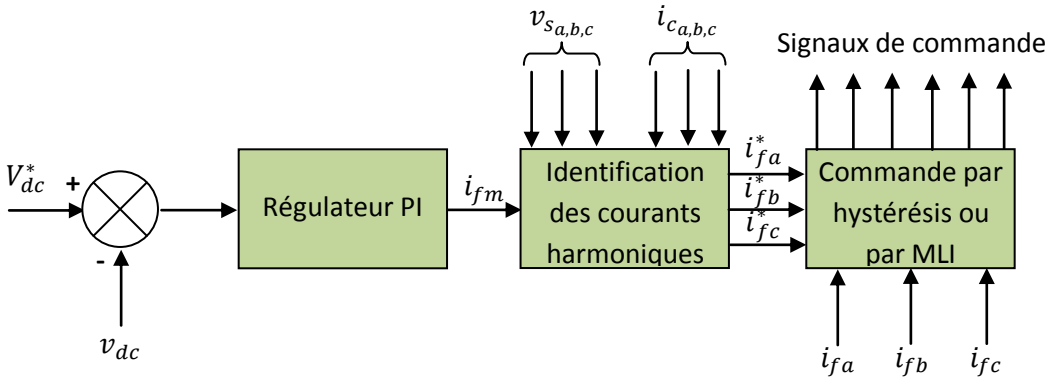


Figure III.6 : Schéma synoptique de commande indirecte du filtre actif triphasé.

III.5.Méthode des puissances instantanées active et réactive (PQ)

III.5.1. Modélisation de la méthode PQ

La méthode des puissances instantanées a été introduite par « H. Akagi ». Cette méthode exploite la transformation de Concordia pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par et les composantes orthogonales du repère associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle *vs(a,b,c)* et aux courants absorbés par les charges 13][Ala-02] Le choix d'une technique dépend du type de machine à commander, de la gamme de puissance, des semi-conducteurs utilisés pour l'onduleur et de la simplicité d'implantation de l'algorithme. Ce sont finalement des critères de coût et de performance qui vont déterminer ce choix. Les critères de performances permettent d'évaluer et de comparer les qualités des différentes techniques de MLI.

Cette méthode d'identification des courants harmoniques, consiste à éliminer la composante continue des puissances active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser [17],[18].La méthode des puissances instantanées introduite par H.Akagi exploite la transformation de Concordia des tensions aux points de raccordement du filtre actif parallèle et des courants absorbés par la charge polluante, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Notons respectivement par (Vs_α, $V_{s\beta}$et$i_{c\alpha,c\beta}$) les composantes orthogonales de Concordia associées aux tensions Vsk(k = a, b, c) et aux courants i_{sk}. La transformation de Concordia permet d'écrire, les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.9)}$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{(III.10)}$$

Les puissances réelle et imaginaire instantanées, notées respectivement p et q, sont définies par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(III.11)}$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés, nous obtenons :

$$P = V\alpha i\alpha + V\beta i\beta = Vsaica + Vsbicb + Vscicc \text{(III.12)}$$

De même, pour la puissance imaginaire on a :

$$q = V\alpha\, i\beta - V\beta\, i\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}[(Vsc - Vsb)ica + (Vsa - Vsb)icb + (Vsb - Vsa)icc] \quad \text{(III.13)}$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative, ce qui nous permet d'écrire:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \& q = \bar{q} + \tilde{q} \quad \text{(III.14)}$$

Avec : $\bar{p}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant ;

$\bar{q}$: Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant ;

$\tilde{p}$et$\tilde{q}$: Puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

En considérant les équations précédentes, nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha - \beta)$en trois composantes active et réactive à la fréquence fondamentale et la somme des harmoniques,ceci conduit à l'équation (III.15) suivante[Mor-12] :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & +v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & +v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta}\begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & +v_{s\alpha} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courants harmoniques}} \quad \text{(III.15)}$$

Il est évident, d'après la relation (III.15), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelle et imaginaire doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant l'un des deux artifices de filtrage illustré sur laFigure (III.7).

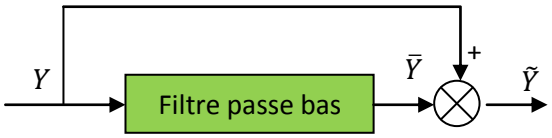


Figure III.7 : Schémade principe des filtres utilisés pour l'extraction des composantes alternatives de p et q.

Les courants harmoniques triphasés $i_{fk}^{*}\,(k = a,b,c)$sont obtenues à partir des courants diphasé $i_{f\alpha}^{*}$ et $i_{f\beta}^{*}$par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^{*} \\ i_{fb}^{*} \\ i_{fc}^{*} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{*} \\ i_{f\beta}^{*} \end{bmatrix} \quad \text{(III.16)}$$

Si V_{sa}et I_{ca} représentent respectivement les valeurs efficaces de la tension et du courant fondamental de la phase a et φ_a, le déphasage entre eux, alors on peut écrire :

$$\begin{cases} \overline{p} = 3 \cdot V_{sa} \cdot I_{ca} \cos \varphi_a \\ \overline{q} = 3 \cdot V_{sa} \cdot I_{ca} \sin \varphi_a \end{cases} \quad \text{(III.17)}$$

Les termes $\overline{p}$ et $\overline{q}$ sont respectivement équivalents à la puissance active conventionnelle et à la puissance réactive conventionnelle.

De cette manière, éliminer les courants harmoniques revient à compenser les composantes alternatives$\tilde{p}$et$\tilde{q}$. La suppression des courants réactifs revient à compenser la composante continue $\overline{q}$ [Mor-12].

L'algorithme *p-q* d'extraction des courants harmoniques présenté sur la Figure (III.8) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des composantes harmoniques du courant d'une charge non linéaire [Gue-07][Mor-14].

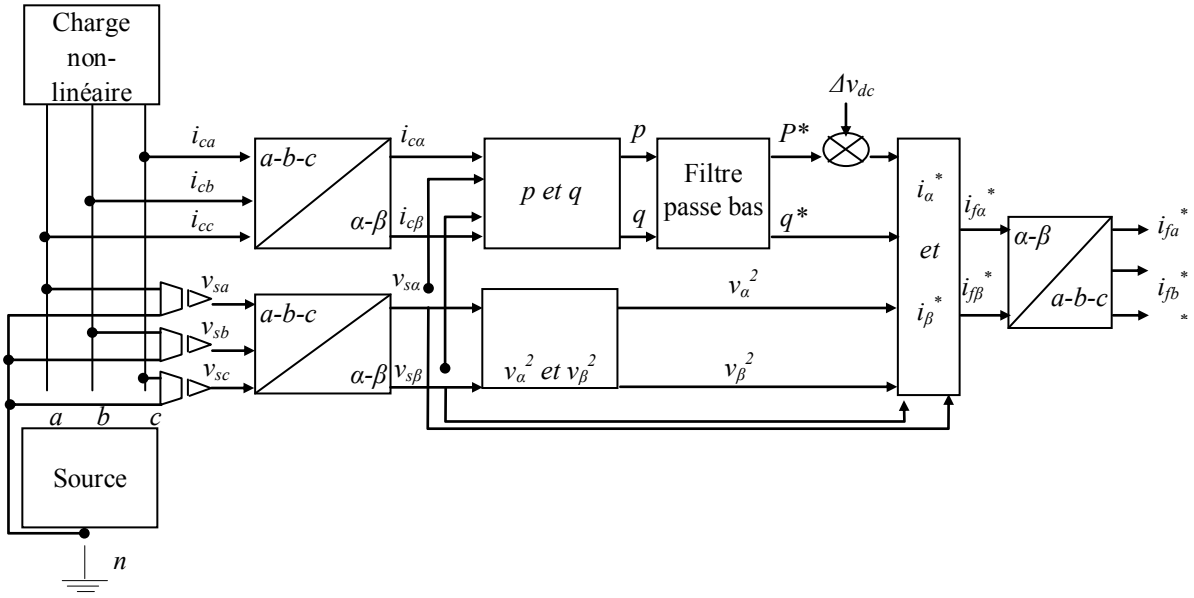


Figure III.8 :*Algorithme p-q d'extraction des courants harmoniques*.

La théorie *p-q* présentée auparavant est valable uniquement pour les systèmes triphasés dépourvus de composante homopolaire. L'extraction des courants des harmoniques dans des applications monophasées ne peut pas être réalisée par cette méthode. Elle est applicable dans le cas où les tensions $v_{s,abc}$sont déformées, à condition de filtrer les ondulations présentées sur le module du vecteur $v_{s,abc}$; $\left(\sqrt{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2}\right)$[Mor-11b].

III.6. Commande par régulateur Proportionnel-Intégral avec la méthode PQ (PQ-PI)

III.6.1 Régulateur PI du courant de filtre avec la commande MLI à porteuse triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire, montrée dans la Figure (III.58), compare l'erreur entre le signal du courant et sa consigne avec une onde triangulaire (porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixées. L'erreur passe par un correcteur Proportionnel-Intégral *PI* avant d'être comparée avec la porteuse triangulaire. En effet, ce sont les deux coefficients $k_p$et $k_i$du correcteur *PI* qui permettent de déterminer la réponse transitoire et l'erreur du régime permanent de cette méthode à porteuse triangulaire. Il a été empiriquement montré que les $k_p$et $k_i$calculés par les équations (III.72) et (III.73) donnent une bonne performance dynamique indifféremment sous des conditions transitoires ou permanentes [Dje-07].

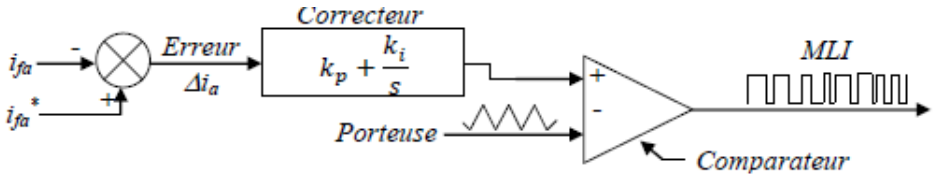


Figure III.9 : Signal MLI à porteuse triangulaire du régulateur PI de courant de filtre actif parallèle de la phase (a).

III.6.2 Schéma de principe de la commande

Le schéma de la Figure (III.59) illustre le principe de filtrage actif parallèle à deux niveaux commandé par la méthode des puissances instantanées active et réactives *p-q*. Le filtre est connecté aux points de connexion communs (PCC) en compensant les harmoniques injectés au réseau électrique et obtenant des courants sinusoïdaux.

Le régulateur du courant de filtre PI est placé entre l'algorithme *PQ* et la commande MLI intersective comme le montre la figure (III.59). Les paramètres du régulateur PI sont les suivants :*kp*=50 et *ki*=0.004.

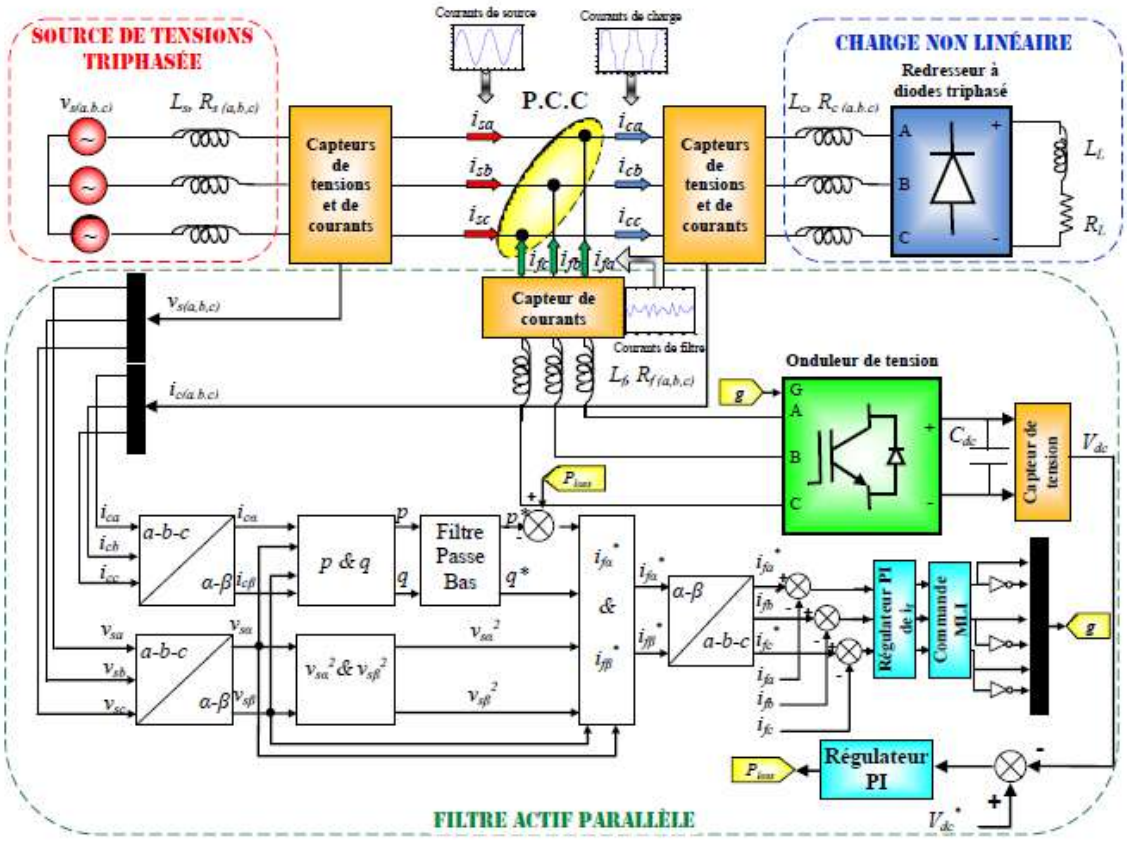


Figure III.10 : Schéma de principe du filtrage actif parallèle à deux niveaux commandé par PQ-PI.

III.7. Réseau de neurone :

Le cerveau se compose d'environ 1012 neurones interconnectés entre eux, avec 1000 à 10000 synapses par neurone. Les neurones ne sont pas tous identiques et ils n'ont pas le même comportement

III.7.1. Le neurone biologie :

Un neurone est une cellule particulièrement complexe spécialisée dans le traitement des signaux électriques. Son rôle est de recevoir, stocker et transmettre l'information. On peut décomposer le neurone en trois régions principales : le corps cellulaire, les dendrites et l'axone [32].

III.7.2 Le corps cellulaire

Il contient le noyau du neurone ainsi que la machine biologique nécessaire à la synthèse des enzymes. Ce corps cellulaire de forme sphérique ou pyramidale contient ainsi les autresmolécules essentielles à la vie de la cellule. Sa taille est de quelques microns diamètre.

III.7.3. Les dendrites

Ce sont des fines extensions qui se ramifient autour du neurone et forment une sortie de vaste arborescence. Les signaux envoyés sont captés par les dendrites. Leur taille est de quelques dizaines de micromètres de longueur.

III.7.4 L'axone

L'information traitée est transmise vers l'extérieur, le long de l'axone, les signauxpartent du neurone grâce a l'arborescence terminale que possède l'axone ; contrairement auxdendrites qui se ramifient autour du neurone, l'axone est plus long et se ramifie a son extrémité où il se connecte aux dendrites des autres neurones. Sa taille peut varier entrequelques millimètres àplusieurs mètres. La notion de synapse explique la transmission des signaux entre un axone et une dendrite. Au niveau de la jonction, il existe un espace à travers lequel le signal électrique nepeut pas se propager. Les transmissions se font alors par l'intermédiaire des substances chimiques (les neurotransmetteurs). Quand un signal arrive de la synapse, il provoquel'émission des neurotransmetteurs qui vont se fixer sur des récepteurs de l'autre cote de l'espace inter synaptique. Quand suffisamment de molécules se sont fixés, un signal électrique est émis de l'autre cote, il y a donc une transmission [32].

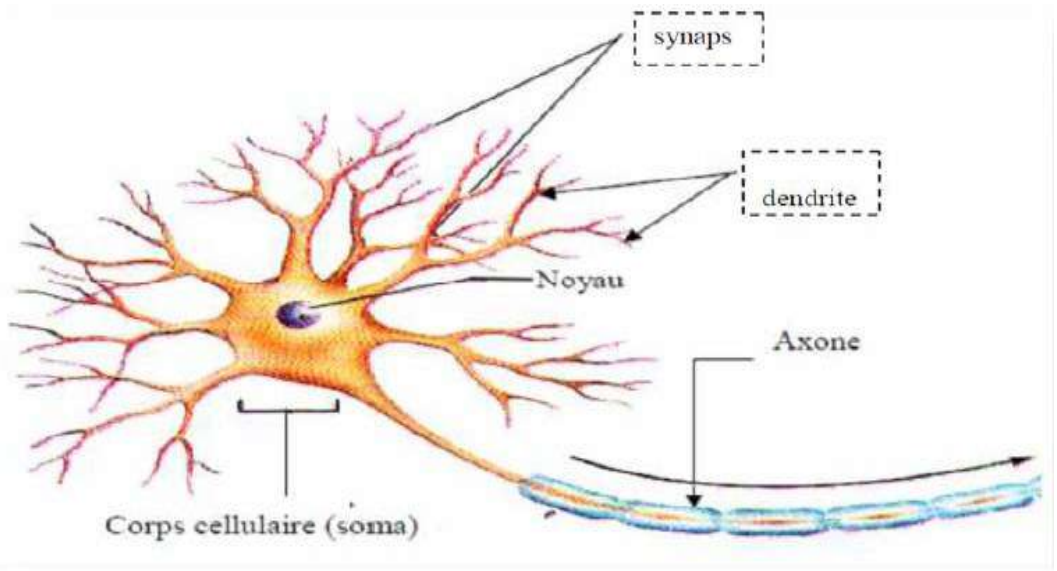


Figure III.11 : Le modèle d'un neurone biologique.

III.7.5 Le neurone artificiel :

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs (neurones) élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit. Toute structure hiérarchique de réseaux est évidemment un réseau [33].

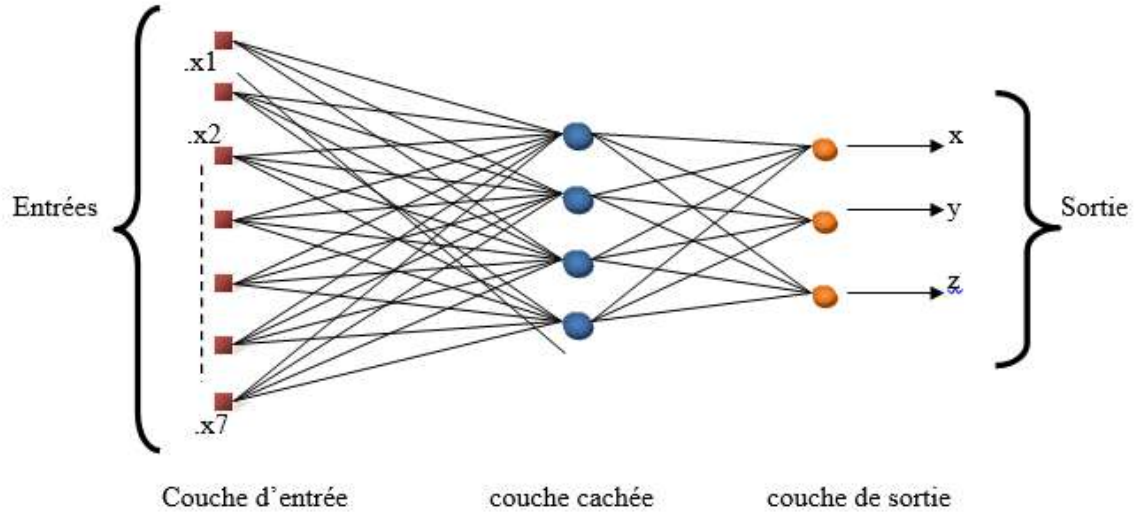


Figure III.12 : Neurone Artificiel.

III.7.6. Les composants d'un réseau de neurone :

Le réseau de neurone se compose en huit éléments sont :

- Un ensemble de neurone.
- Un état d'activation pour chaque neurone (actif, inactif).
- Une fonction de sortie pour chaque neurone [f(s)].
- Un modèle de connectivité entre les neurones (chaque neurone est connecté à tous les autres).
- Une règle de propagation pour propager les valeurs d'entrée à travers le réseau vers les sorties.
- Une règle d'activation pour combiner les entrées d'un neurone.
- Une règle d'apprentissage.
- Un environnement d'opération (le système d'exploitation, par exemple) [32].

III.7.7. Les différentes structures des réseaux de neurones :

Les connexions entre les neurones qui composent le réseau décrivent la topologie du modèle qui peut être ?, mais le plus souvent il est possible de distinguer une certaine régularité

III.7.7.1. Réseau de neurones multicouches :

Les neurones sont arrangés par couche, il n'ya pas de connexion entre neurones d'une même couche et les connexions ne sont font qu'avec les neurones des couches en aval habituellement, chaque neurone est connecté à tous les neurones de la couche suivante et

celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc de définir les concepts de neurone d'entrée et de neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie.Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées cachées.

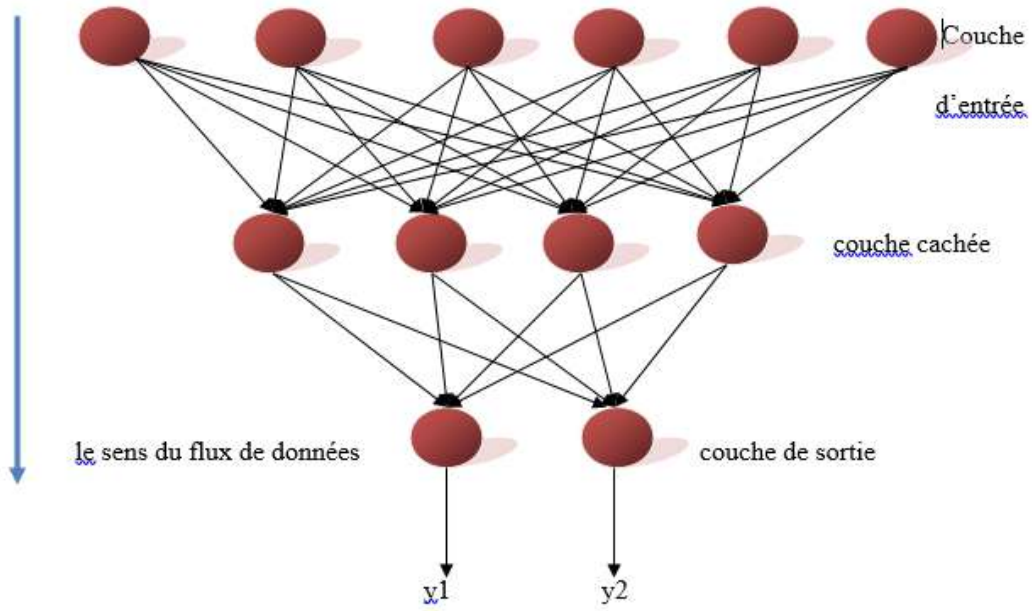


Figure III.13 : Réseau de neurones multicouches.

III.7.7.2. Réseau à connexions locales :

Il s'agit d'une architecture multicouche, mais qui à l'image de la rétine, conserve une certaine topologie. Chaque neurone est connecté avec un nombre réduit et localisé de neurone de la couche aval .Les connexions sont donc moins nombreuses que dans le cas d'un réseau multicouche classique.

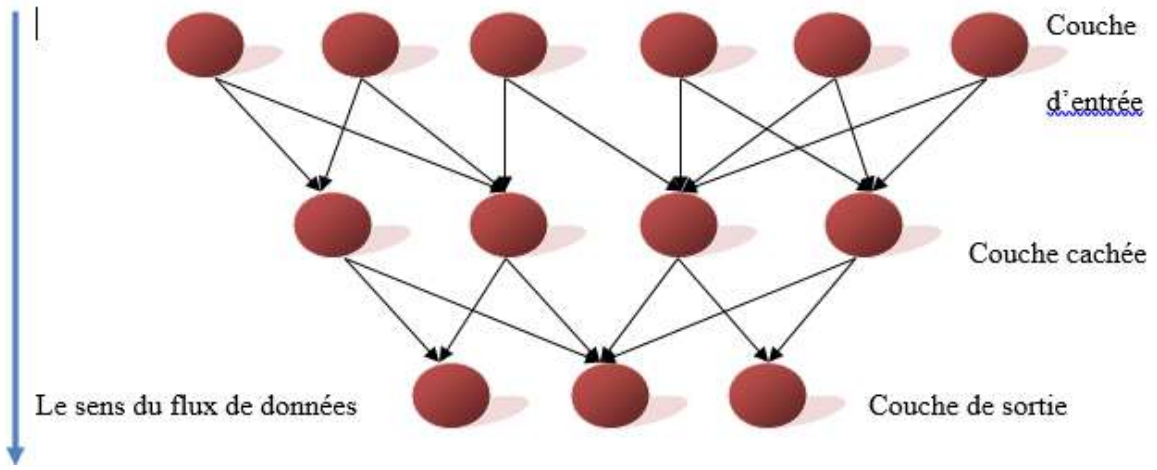


Figure III.14 :Réseau à connexions locales

III.7.7.3. Réseau à connexions récurrentes :

Les connexions récurrentes ramènent en arrière par rapport au sens de propagation défini dans un réseau multicouche. Ces connexions sont le plus souvent locales.

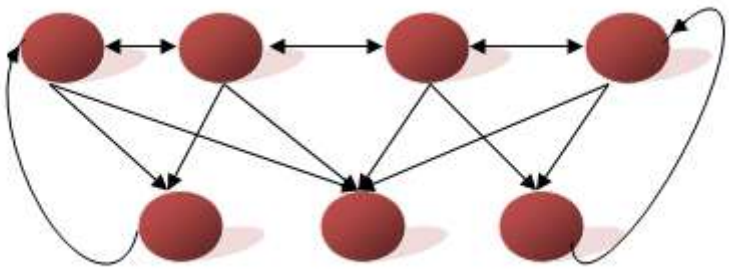


Figure III.15 : Réseau à connexions récurrentes.

III.7.7.4. Réseau à connexions complètes :

C'est la structure d'interconnexions la plus générale figure(III.10) Chaque neurone est connecté à tous les neurones du réseau et à lui-même.

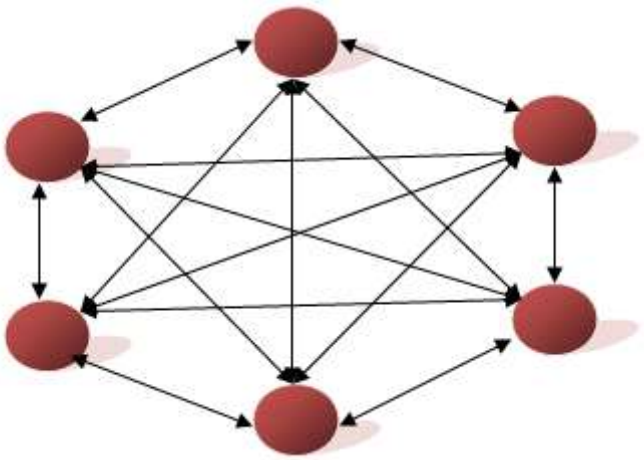


Figure III.16 :Réseau à connexions complètes.

III.7.8. Les fonctions d'activations :

C'est une fonction non-linéaire qui définie l'état interne (A) du neurone en fonction de son entrée totale (E) elle peut être une fonction binaire à seuil, linéaire à seuil ou multi-seuil , sigmoïde stochastique ou une autre fonction généralement choisie croissante et impaire [34].

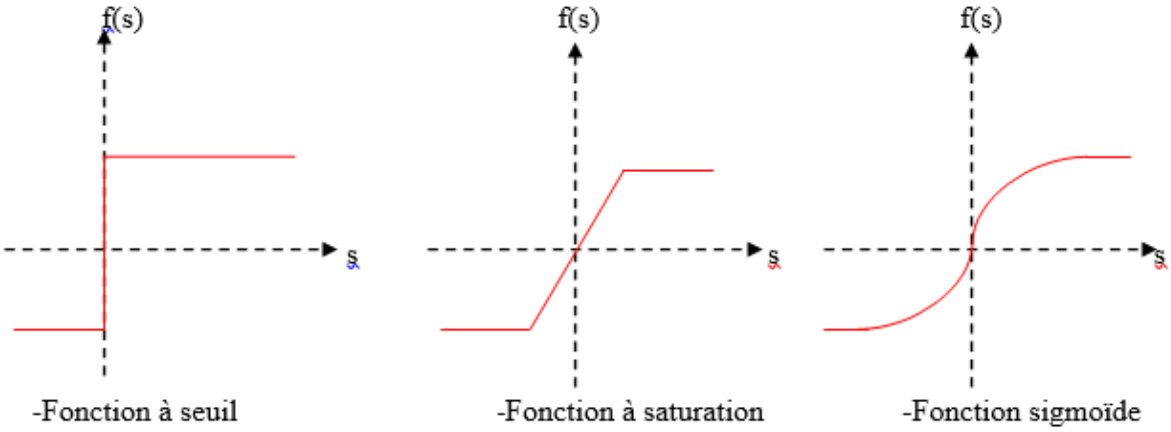


Figure III.17: Quelque fonction d'activations.

III.7.9. Les techniques d'apprentissage :

On à deux techniques d'apprentissage : supervisé et non supervisé.

III.7.9.1. Apprentissage supervisé :

Un apprentissage supervisé est lié à la disponibilité d'exemples, ou de modèles de réponses. L'ensemble des exemples utilisés pour l'apprentissage se présente sous forme de couples (X, Y*) ou Y* est la réponse désirée du réseau à l'entrée X.Lorsque le réseau apprend à mimer une fonction multi variable, il utilise des exemples d'entrée/sortie. Ses poids sont ajustés sous l'influence d'un signal d'erreur qui représente la différence entre la sortie estimée

par le réseau et la sortie désirée par le modèle. Les caractéristiques de l'algorithme neuronal lui permettent ensuite de généraliser et de répondre à une entrée quelconque, même si elle n'appartient pas au jeu d'apprentissage. Le réseau réalise une approximation de la fonction qui lui a servi de professeur [33].

III.7.9.2. Apprentissage non supervisé :

L'hypothèse d'existence d'un maître qui supervise l'apprentissage n'est pas toujourspossible. Dans ce cas, on ne connaît pas les sorties désirées Y* des exemples d'apprentissage. Le réseau doit donc apprendre de lui-même et on parle d'apprentissage non supervisé.Ce type d'apprentissage permet au réseau d'extraire des propriétés contenues implicitementdans un ensemble de données, représentées par des vecteurs de grande dimension, et l'on cherche à les regrouper, selon des critères de ressemblance qui sont inconnus a priori [34].

III.8.Conclusion

Dans ce chapitre ,on a étudié une méthode ou technique de la commande, la commande par l'algorithme P-Q basé sur les puissances instantanées et l'identification des courants d'harmoniques ainsi que la technique moderne de réseau neurone.

Dans le dernier chapitre, on présenteralasimulation etl'interprétationdu résultatdes différentes commandes tellesquelaméthodedespuissancesinstantanées de l'alimentation du l'onduleur et le réseau neuronne par source énergie renouvelable.

Chapitre (IV)

Résultats de simulation et Interprétations

IV.1. Introduction

Dans le chapitre précédent j'ai étudié les méthodes de commande dont les puissances instantanées P-Q et RN, avec l'alimentation de notre onduleur par source d'énergie renouvelable (photovoltaïque).

Le but de ce chapitre est voir les résultats de simulation des différentes méthodes comme suivant :

Dans la première partie de ce chapitre je donne les caractéristiques du courant et de tension de source i_{sa}, v_{sa} avant de l'application du filtrage actif parallèle.

La seconde partie, je présente les résultats de simulation après le filtrage actif parallèle contrôlé par l'algorithme P-Q et par la technique de RN avec l'alimentation du l'onduleur par une source renouvelable (photovoltaïque), puis on fait la comparaison entre les résultats de simulation entre les valeurs des THDs et la forme de courant de charge i_{sa}.

IV.2. La simulation du système de FAP

La Figure (IV.1) montre le schéma de principe du système de filtrage actif parallèle de notre travail.

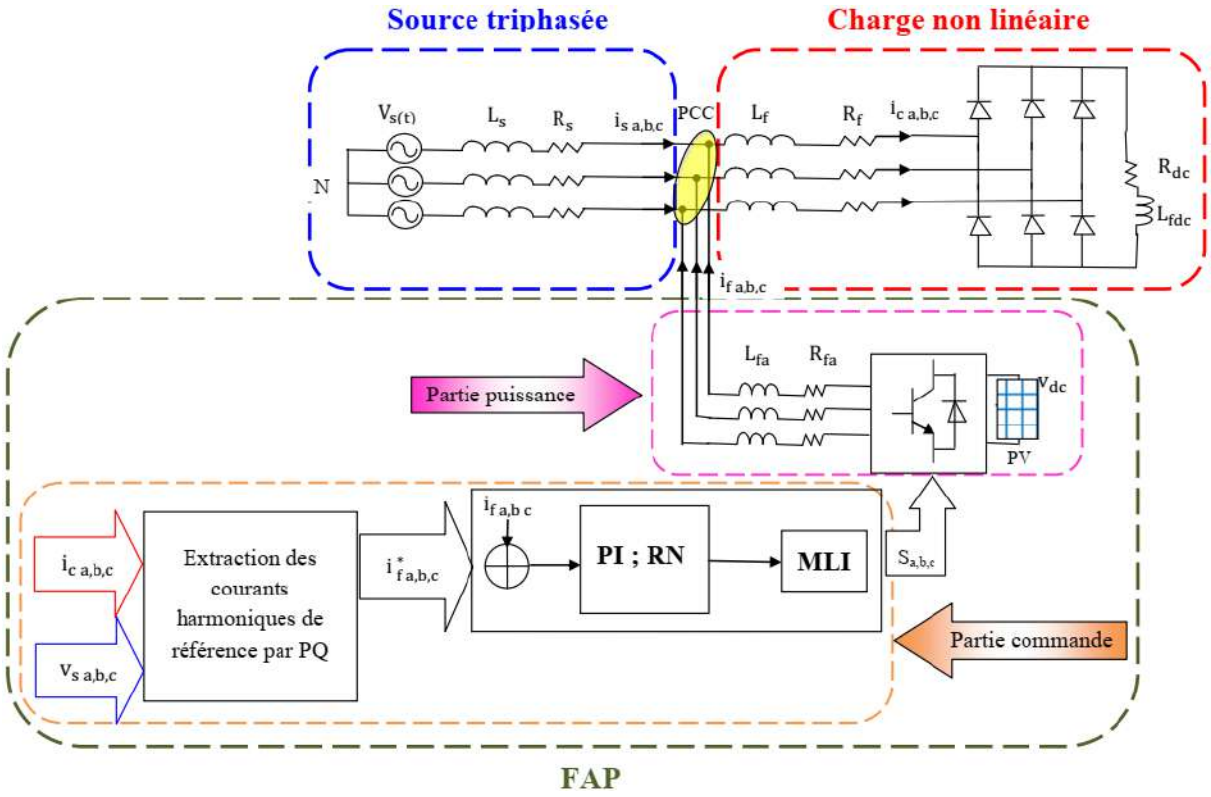


Figure I V.1 : Schéma de principe du système de filtrage actif parallèle.

IV.2.1 Résultats de simulation

Les paramètres de simulation sous *MATLAB/Simulink* du filtrage actif parallèle de puissance sont présentés dans le Tableau (IV.1).

Tableau IV.1 : Paramètres de simulation considérée du système de filtrage actif parallèle.

Paramètres		Valeurs numériques
Réseau d'alimentation	Valeur efficace	220 V
	Fréquence f	50 Hz
	Résistance de ligne R_s	0,25 mΩ
	Inductance de ligne L_s	19,4 µH
Charge non linéaire (avant le défaut)	Puissance apparente S	17,7452 kW
	Inductance de correction L_f	1,5 mΩ
	Résistance interne de l'inductance de correction R_f	
Charge non linéaire (ale défaut)	Résistance de charge DC R_{dc}	6,5 Ω
	Inductance de charge DC L_{dc}	20 mH
Filtre actif	Tension continues du filtre V_{dc}	840 V
	Fréquence de commutation (fréquence de la porteuse) f_c	10 kHz
	Résistance R_{fa}	5 mΩ
	Filtre de sortie L_{fa}	1,5 mH
Régulateur PI	Gain proportionnel k_p	10
	Gain intégral k_i	0,5
Régulateur RN	Nombre de couches cachées	03
	Nombre de neurones	10

Pour la simulation sous MATLAB/Simulink, on a utilisé les paramètres du Tableau (IV.1). On va se contenter de l'étude du courant et de la tension seulement dans la phase a, sachant que ceux des deux autres phases sont retardés par rapport à la phase a de 120° et 240° respectivement.

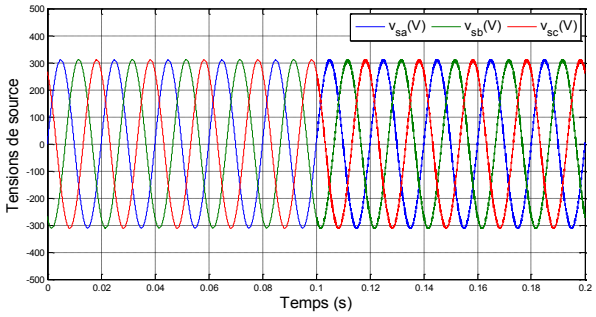
La figure (IV.1) représente les résultats de simulation obtenus de tous les cas choisis qui sont les suivants :

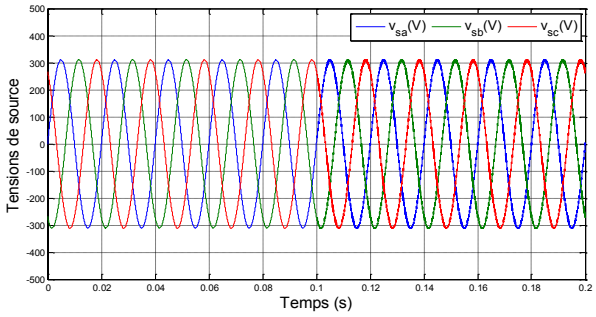
A. Avant filtrage actif parallèle. (i_{ca}, THD_{ica}, déphasage entre i_{ca} et v_{sa}) ;

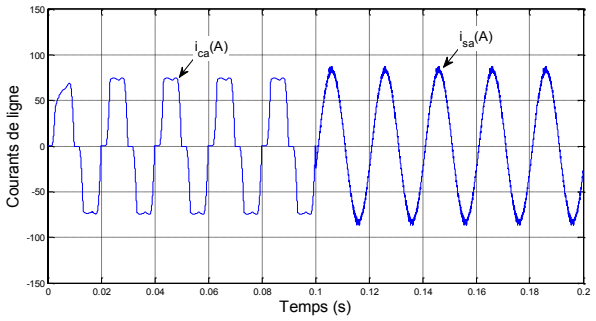
B. Après filtrage actif parallèle. (i_{sa}, THD_{isa}, déphasage entre i_{sa} et v_{sa}) ;

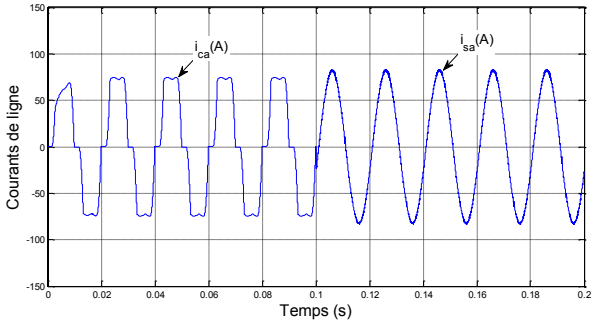
- La commande par régulateur classique PI en cascade avec la méthode PQ ;
- La commande par réseau de neurone en cascade avec la méthode PQ.

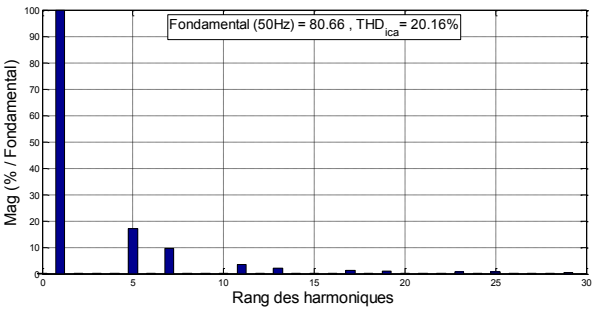
IV.2.1.1 Avec une source continue E=840 V

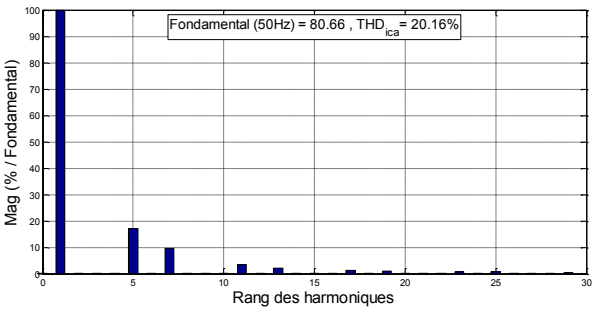


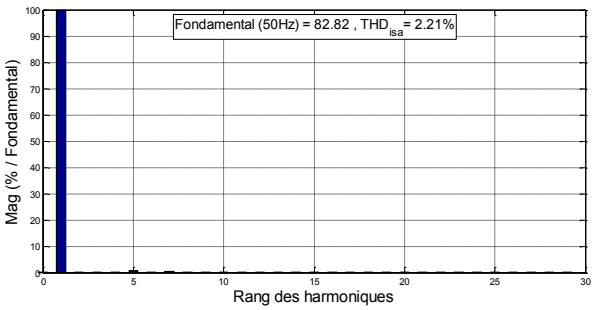


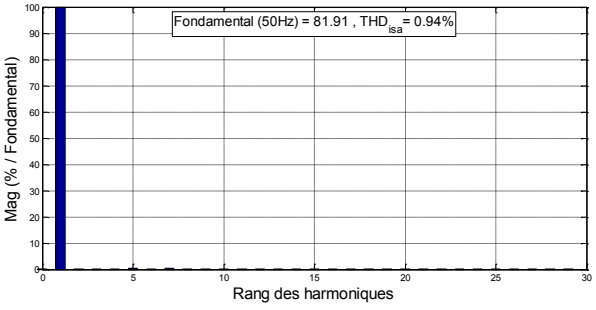


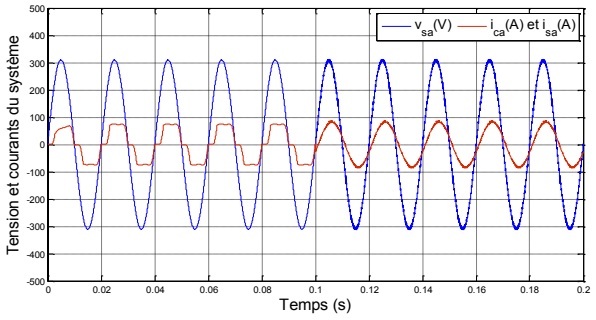


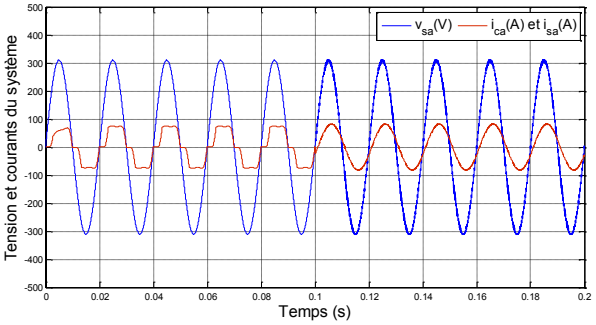


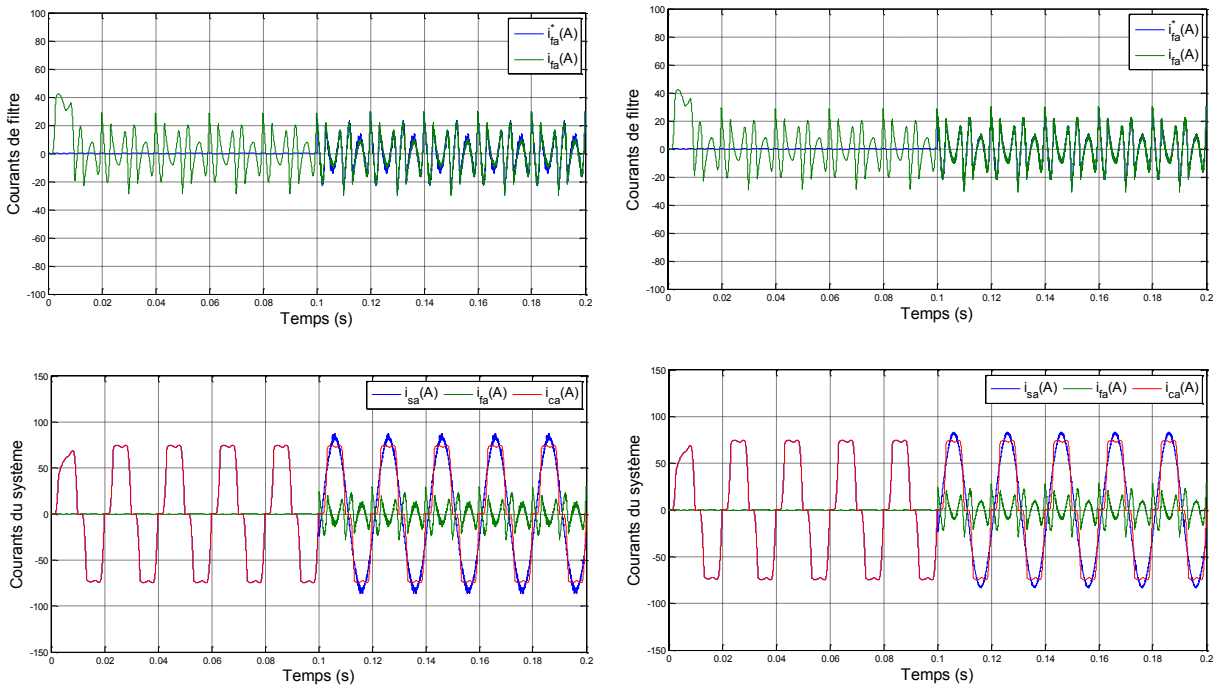












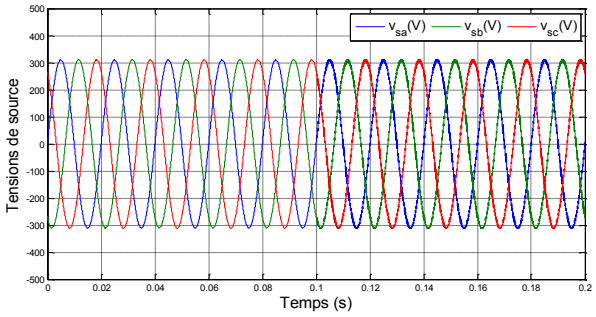
PQ-PI **PQ-RN**

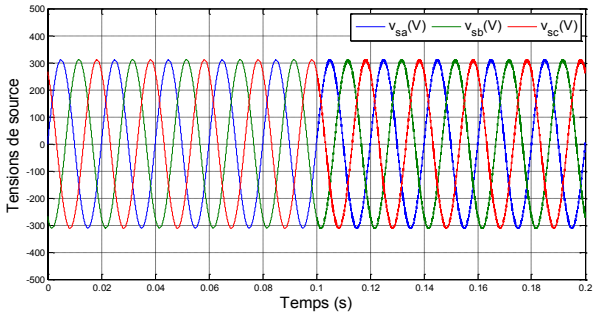
Figure IV2 : Comparaison entre les deux techniques de commande du FAP, PI et RN avec E.

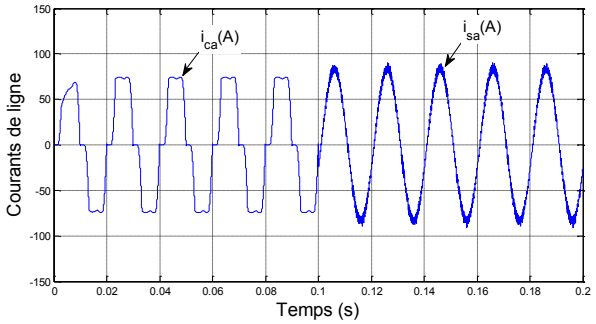
Les résultats de simulation obtenus avant filtrage actif sont indésirables car nous a donné un THD élevé inacceptable par le réseau électrique. Pour cela, nous avons connecté entre la source d'énergie et la charge non linéaire un filtre actif parallèle de puissance (FAP), ce qui nous permet de minimiser tous les harmoniques en même temps.

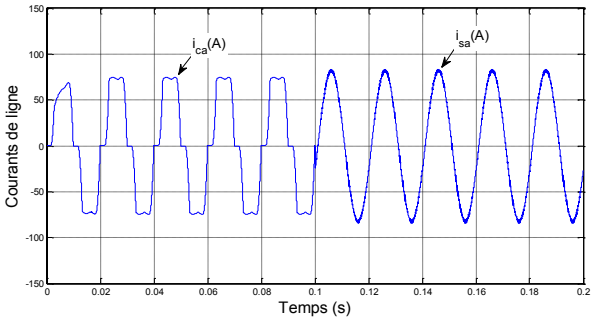
La distorsion harmonique n'est pas le seul problème rencontré on a aussi une dégradation au niveau du facteur de puissance ; ainsi on peut s'attendre à une fluctuation dans l'énergie réactive du système.

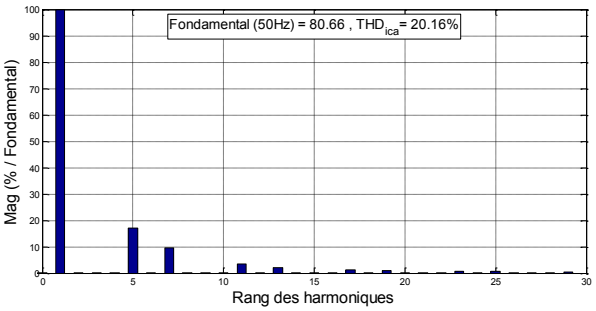
IV.2.1.2 Avec une source photovoltaïque V_{dc}=840 V

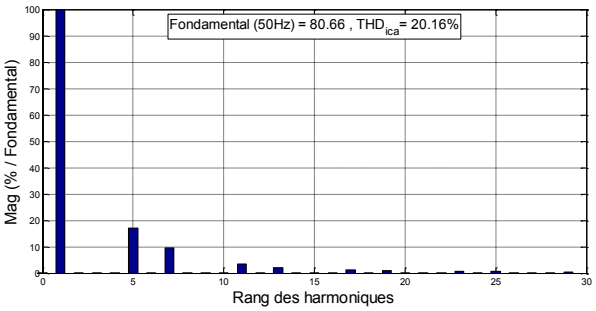


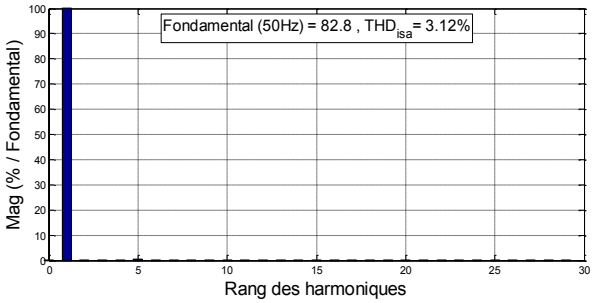


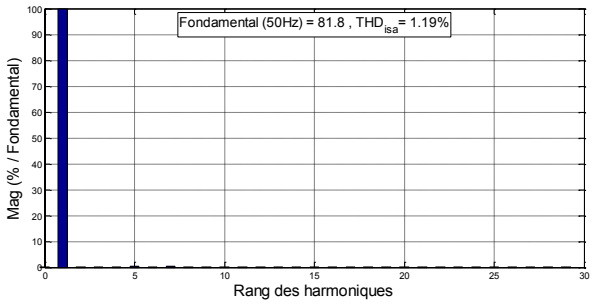


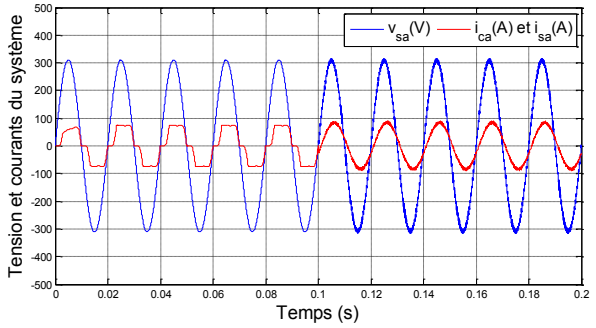


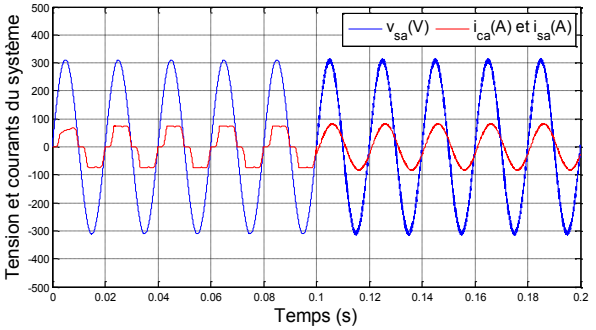


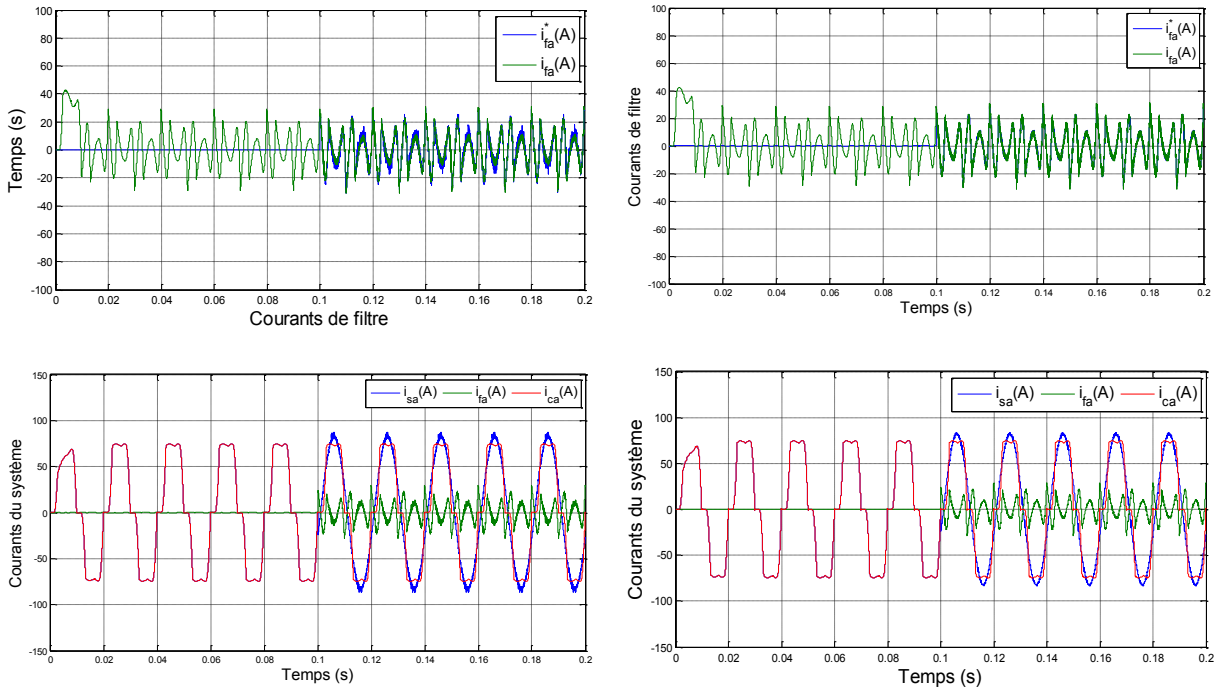












PQ-PI **PQ-RN**

Figure IV.3 : Comparaison entre les deux techniques de commande du FAP, PI et RN avec PV.

Le système photovoltaïques raccordé au réseau électrique nous a permet de remplacer la source continue E par une tension homologue délivrée par ce système. Les caractéristiques du système PV commandé par une commande MPPT (méthode P&O) sont présentées sur les Figures (IV.4) à (IV.7).

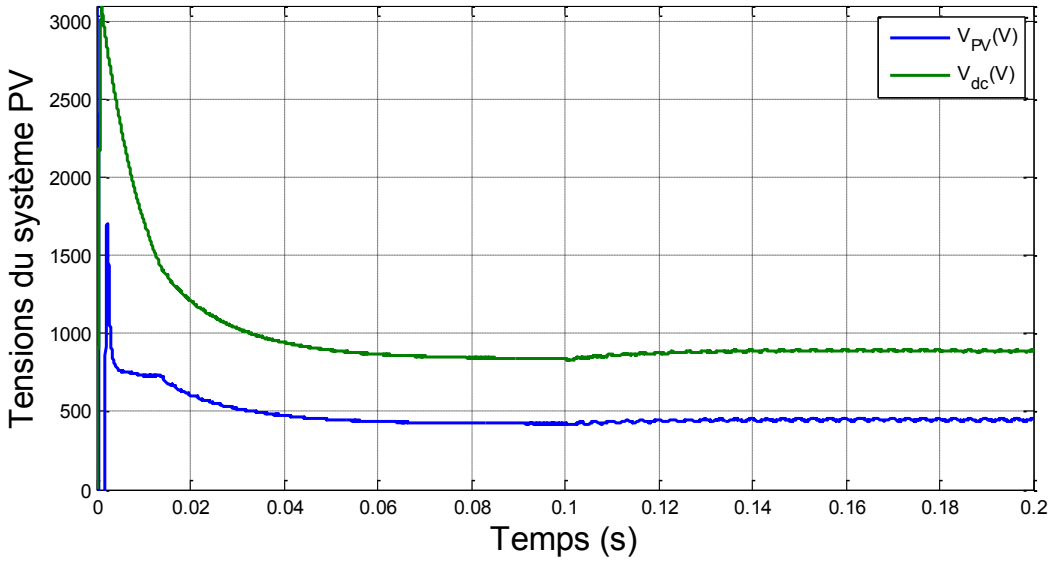


Figure IV.4 : Tensions du panneau PV (V_{PV}) et du convertisseur DC-DC (V_{dc}).

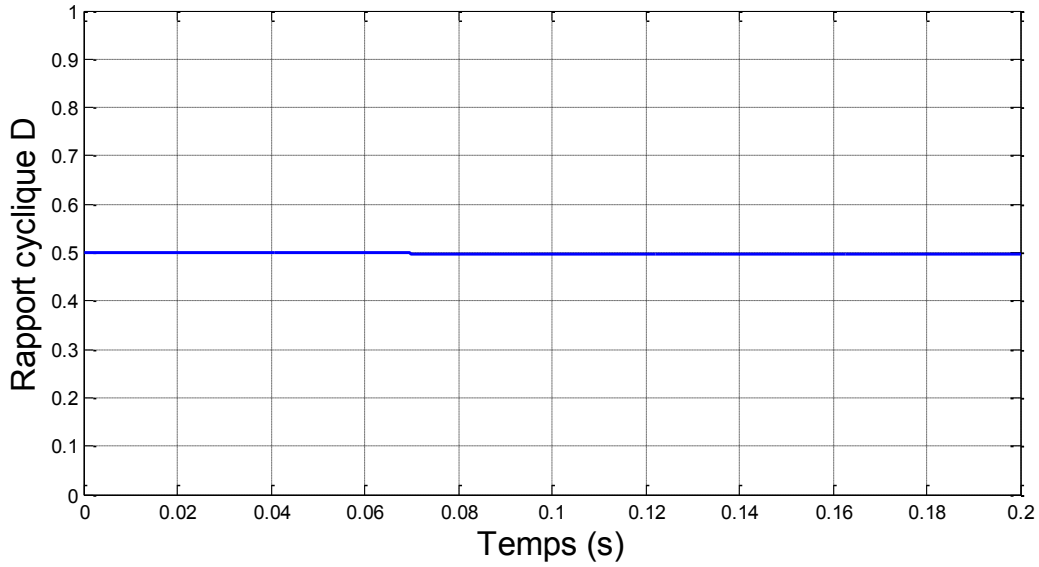


Figure IV.5 : Rapport cyclique D.

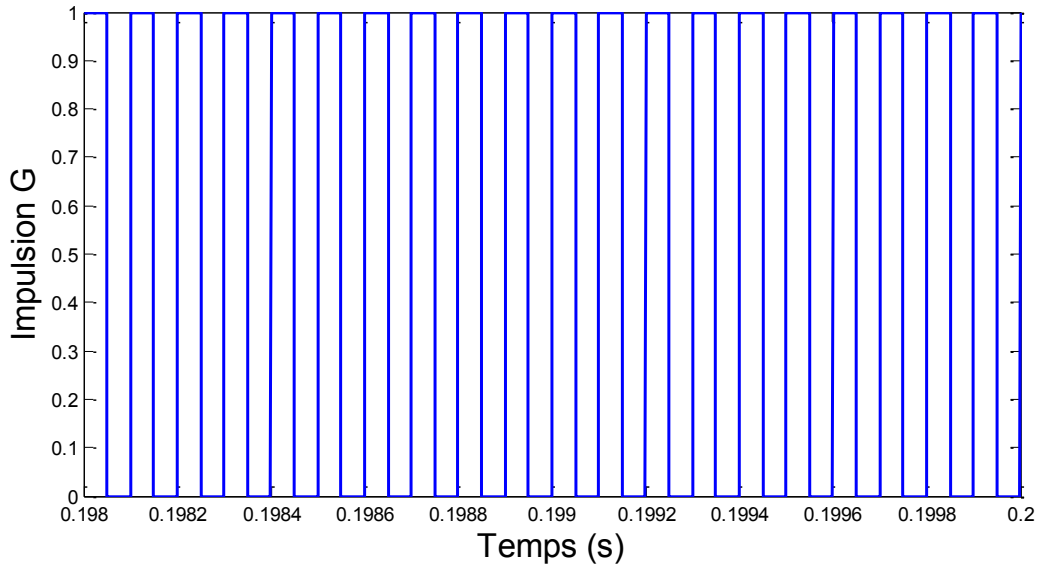


Figure IV.6 : Impulsion G délivrée par MLI.

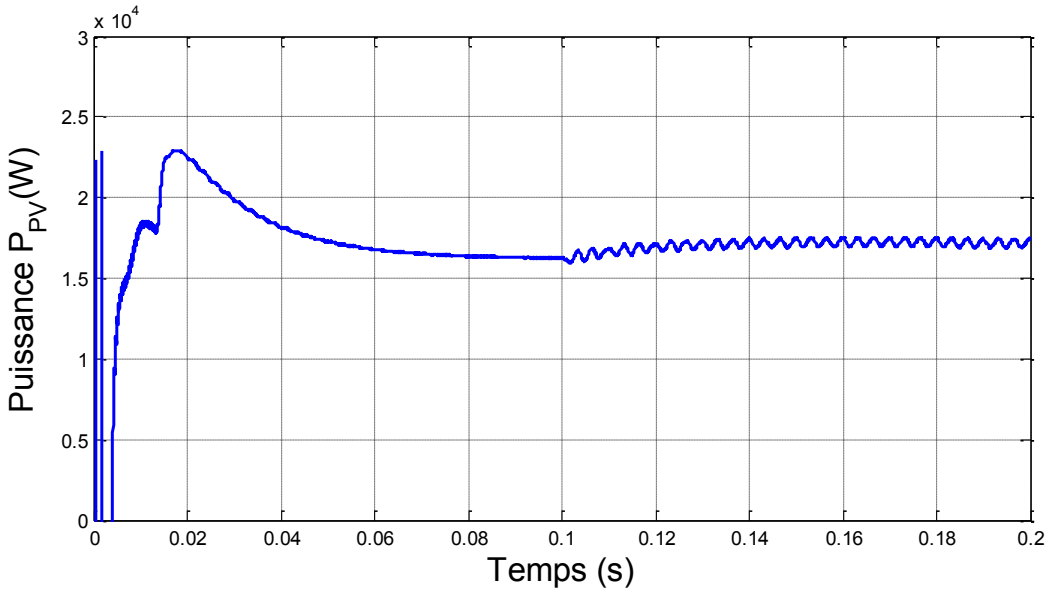


Figure IV.7 : Puissance P_{PV}.

IV.3 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, on a présenté les résultats de simulation du courant de source avant l'application du filtre actif parallèle, on remarque que la forme d'onde du courant de source n'est pas sinusoïdale, c'est le même courant de la charge non linéaire, le spectre harmonique du courant de source prend une valeur plus élevée (THD_{ica} = 20.16%).

Dans la seconde partie, on a représenté les résultats de simulation du filtre commandé par l'algorithme P-Q avec une source d'origine renouvelable (PV). La simulation du système de filtrage actif parallèle en alimentant l'onduleur par une source continue *E* avec les deux stratégies de commande classique (PI) et intelligente artificielle par réseaux de neurones a donné des formes d'ondes sinusoïdales du courant de source, ce qui donne un THD_{isa} (PI)=2,21% et un THD_{isa} (RN)=0,94% qui est plus performant. Tandis qu'on a alimenté l'onduleur par une source photovoltaïque, on a constaté que le système est influé un peu a cause de la tension obtenue V_{dc} n'est pas purement stable à la valeur 840 V malgré qu'on a optimisé le système par la commande MPPT. Alors les THD_{isa} (PI)=3,12 % et THD_{isa} (RN)= 1,19 %.

Dans le but de réduire les harmoniques imposés par la charge non linéaire sur le réseau électrique basses tensions et améliorer le facteur de puissance entre la tension et le courant de source On a réagit sur les stratégies de commandes de l'onduleur qui est alimenté par une source photovoltaïque.

D'après les résultats de simulation sous MATLAB/Simulink obtenus, il est également observé que le contrôleur réseau de neurone a des performances dynamiques supérieures à ceux des autres commandes en termes de réduction des harmoniques et des compensations de puissance réactive.

D'abord, dans le premier chapitre, une révision de la littérature des pollutions existent aux réseaux électriques avec leurs dépollutions comme solutions classiques (ou passifs) par des condensateurs et modernes (ou actifs) par des filtres actifs de puissance.

Après avoir introduit leur concept, je suis passée dans le deuxième chapitre a Une étude générale de système PV , en se basant sur son principe de fonctionnement, son schéma de principe, ses modes de fonctionnement, Les différents types de cellules solaires En plus j'ai étudié Les convertisseurs DC-DC, ainsi que la MPPT avec la méthode perturber et observer.

Le troisième chapitre de cette thèse présente un filtre actif parallèle FAP à structure de tension à deux niveaux, nous citons le point de raccordement ainsi le rôle avec structure de FAP et modélisations circuit de puissance d'un filtre actif à structure tension, et la liaison entre l'onduleur de tension et le réseau, l'onduleur de tension triphasé a deux niveaux les stratégies de commandes en tension (puissance instantanée P-Q)ainsi l'utilisation de la technique de réseau neurone avec alimentation par source énergie renouvelable comme photovoltaïque.

Le dernier chapitre une simulation a été faite de mon système de filtrage par méthode de puissance instantanée P-Q avant et après filtrage .

- En résumé, on peut dire que le système de filtrage utilisé est en effet conforme aux recommandations internationales IEEE519 pour l'acceptation des courants électriques sur le réseau d'alimentation. C'est-à-dire que le taux de distorsion des harmoniques est inférieur à 5% et que le facteur de puissance est proche de l'unité.

Comme perspective On propose autres stratégies des commandes telles-que :

- Pour profiter l'alimentation du bus continu de l'onduleur de tel façon gratuitement, nous pouvons établir d'autre énergies renouvelables comme l' éolienne.
- Pour la commande en temps réel : nous pouvons utiliser l'outil informatique ou certain processeurs pour améliorer la vitesse de poursuite des perturbations du filtre actif de puissance tel que les FPGA.
- Application d'autres techniques de commande du filtre actif parallèle de puissance comme la commande par mode glissant, la commande non-linéaire (commande adaptative), la commande par intelligence artificielle (réseaux de neurones, neuro-flou, … etc.).
- Développement d'autres structures du filtre actif parallèle (multiniveaux, multicellulaire).
- Redresseur commandable à Thyristors
- Digital signal processor (DSP)

ANNEXE

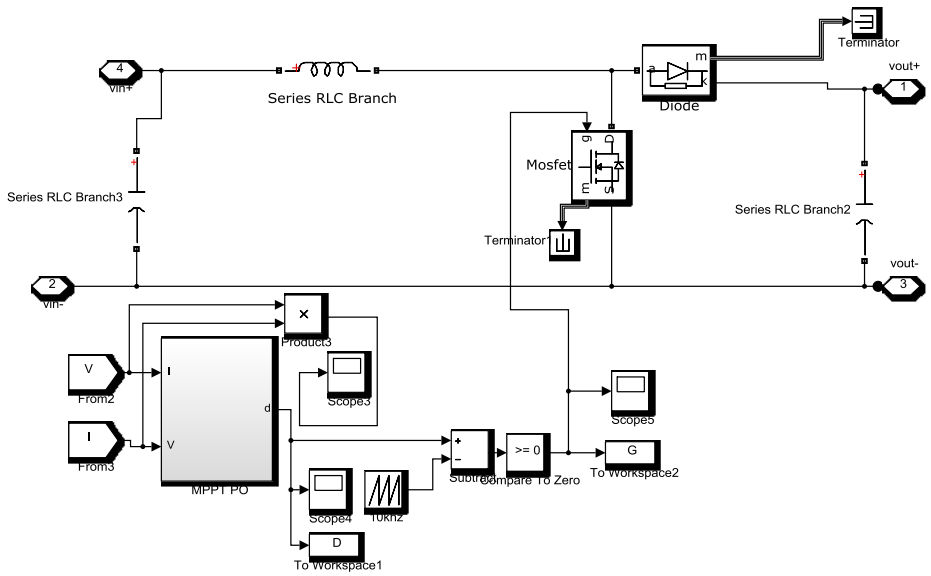


Figure A.1 : Hacheur boost.

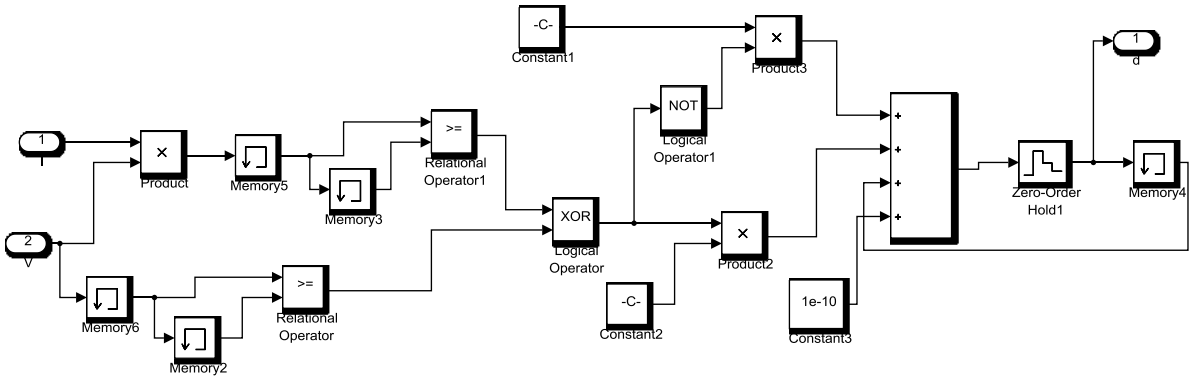


Figure A.2 : P&O.

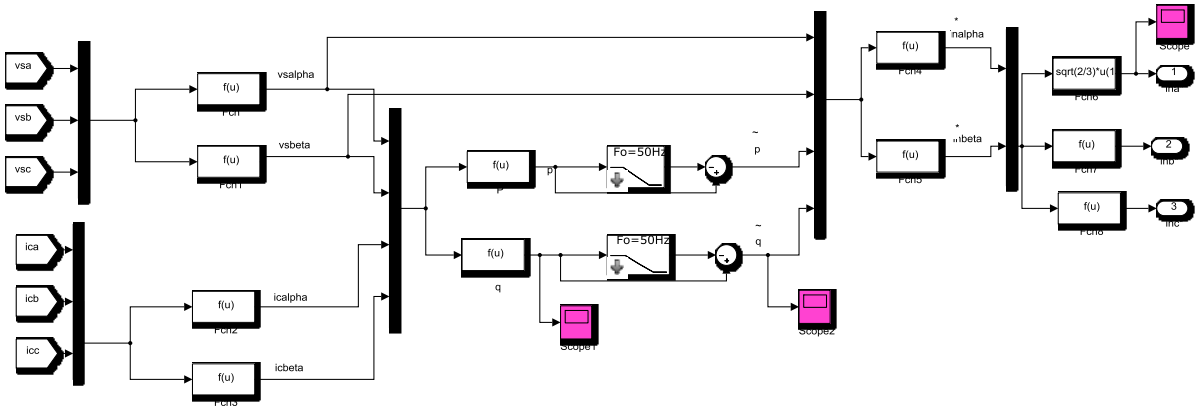


Figure A.3 : P-Q.

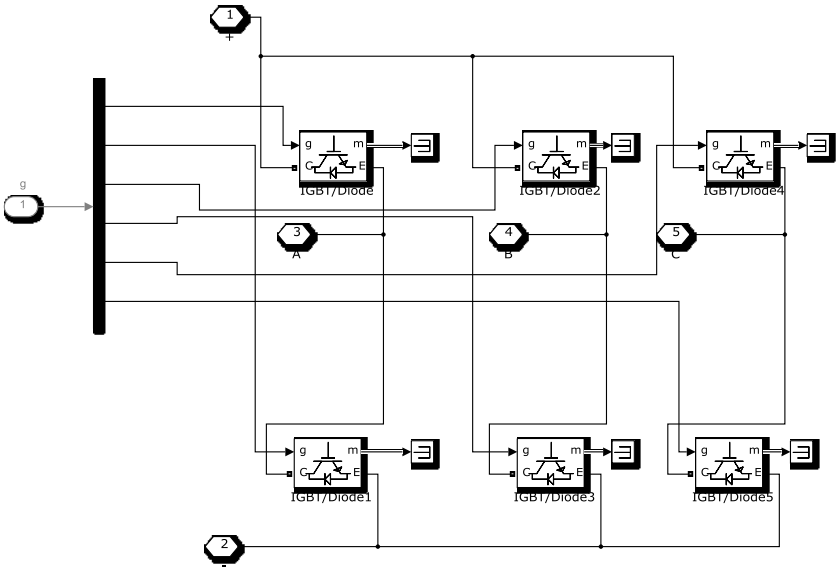
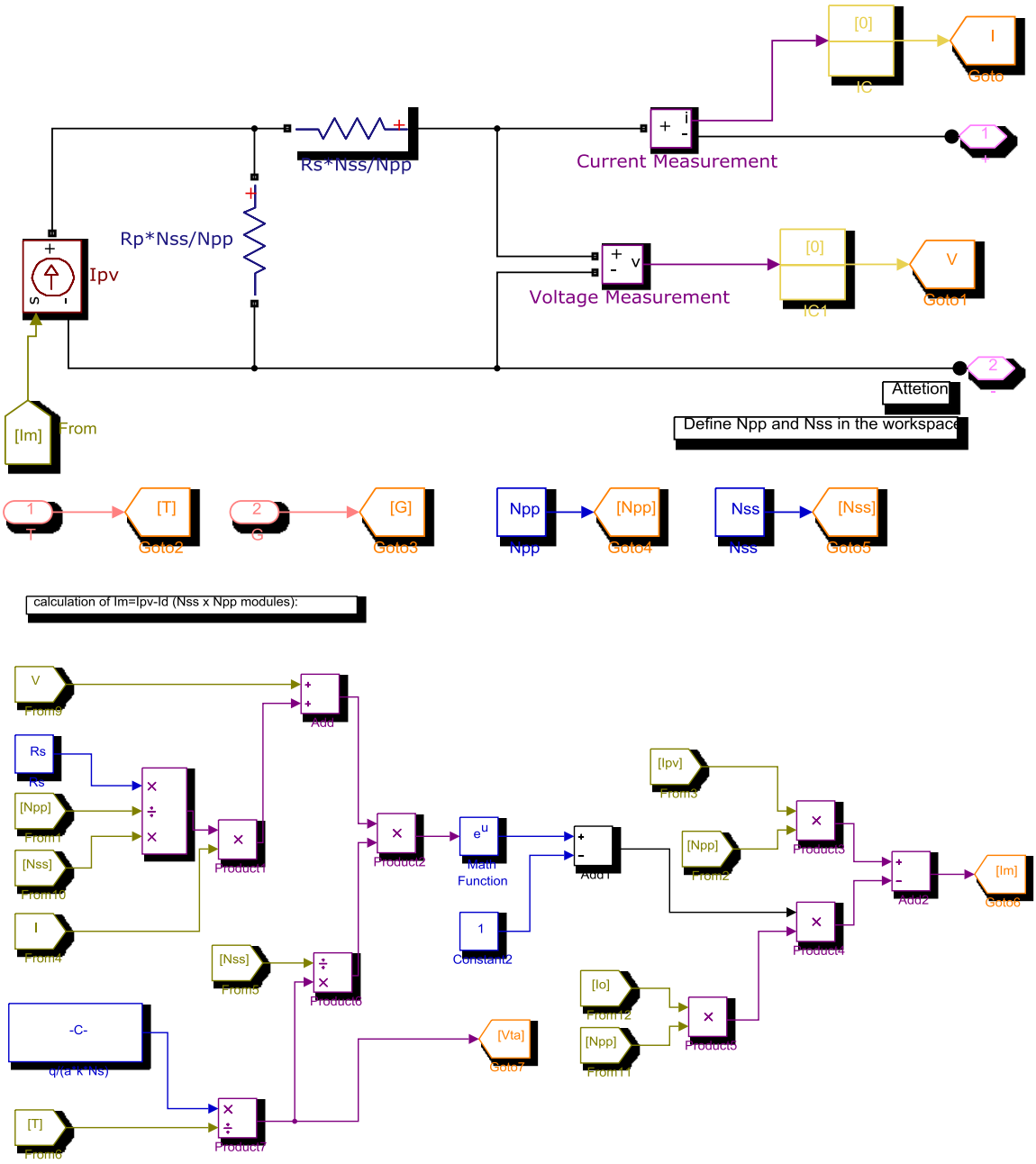


Figure A.4 : Onduleur à 2 niveaux.


Rs*Nss/Npp
Rp*Nss/Npp
Ipv
Current Measurement
Voltage Measurement
[0]
IC
I
Goto
V
Goto1
IC1
1
2
Attetion
Define Npp and Nss in the workspace
[Im]
From
1
T
[T]
Goto2
2
G
[G]
Goto3
Npp
[Npp]
Goto4
Nss
[Nss]
Goto5
calculation of Im=Ipv-Id (Nss x Npp modules):
Rs
[Npp]
[Nss]
I
Product1
Add
Product2
Math Function
Constant2
Add1
[Ipv]
Product5
Add2
[Im]
Goto6
Product4
[Nss]
Product6
-C-
q/(a*k*Ns)
[T]
Product7
[Vta]
Goto7
[Io]
Product8

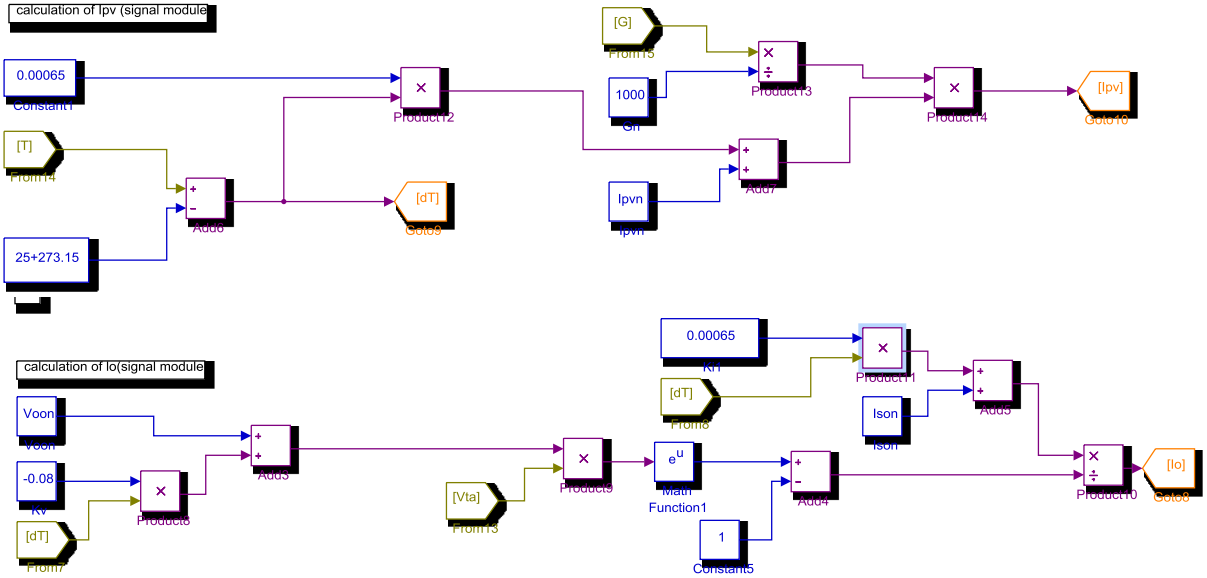
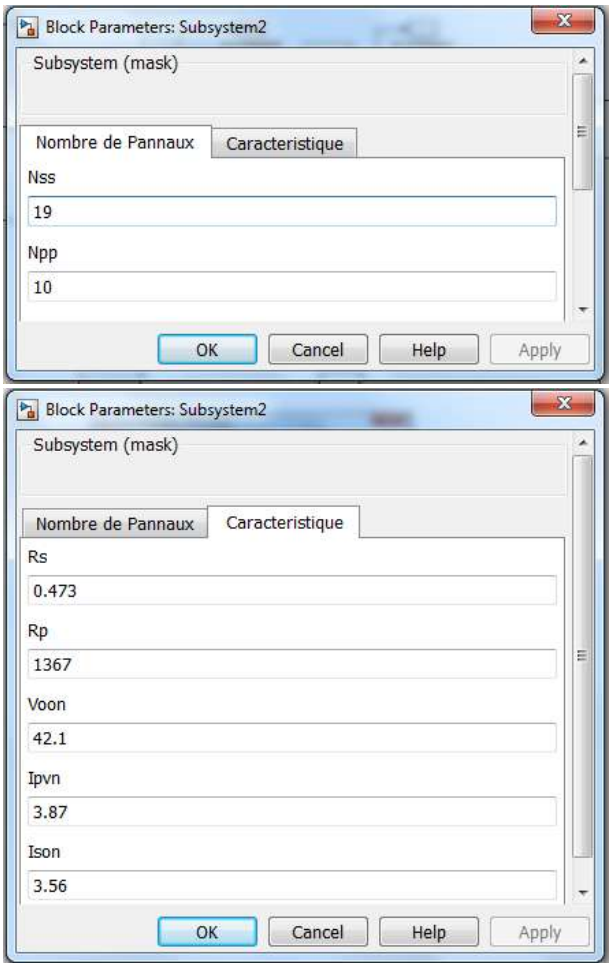


Figure A.5 : Panneau PV.

Tableau A.1 : Paramètres du panneau PV.



[1] F. **Chekired**, « etude et implémentation d'une commande mppt neuro-floue sur *FPGA»*, mémoire de magister, ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[2]http://tepeenergiephotovoltaique.e-monsite.com/pages/la-cellule-photovoltaique/principe-de-la-cellule-photovoltaique.html

[3] **M.Blhadj**,*«*modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome*»*,mémoire de magister centre universitaire de Bechar ,2007-2008.

[4] **M.L.Louazane** ,*«*etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla*»*,mémoire de magister université El Hadj Lakhdar-Batna, 16/06/2008.

[5] **S. M. Ait-Cheikh**, *«*etude, investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques*»*, thèse de doctorat d'état, ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[6] **S. Issaadi**, *«* commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les réseaux de neurones », mémoire de magister, ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2006.

[7**]** **M. Adouane**, *«*etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique», mémoire de magistère, ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie, 2008.

[8] **S. Bellakehal**, *«*conception & commande des machines à aimants permanents dédiées aux energies renouvelables*»,* thèse de doctorat, université de Constantine, Algérie, 2010.

[9] **W.Bensaci**, *«*modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », mémoire de master,université Kasdi Merbah,Ouargla, 2011/2012.

[10] **M.N.Mchalikh et CH.Hmada**, *«* modélisation et simulation d'un système photovoltaïqueen fonctionnement autonome et connecté au réseau », mémoire de master ,université Kasdi Merbah,Ouargla ,2013.

[11] **OMEIRI AMAR** « simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » thèse doctorat de l'université de BADI MOKHTAR ANNABA 2007.

[12] **M. SARRA,** « contribution a l'etude des filtres actifs hybrides », these de doctorat de l'université de Sétif FERHAT ABBAS, Algérie, (2013).

[13] **T. DEFLANDRE, P. MAURAS,** « les harmoniques sur les réseaux électriques », edition Eyrolles, septembre1998.

[14] **BOUKADOUM AZIZ** «contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique » thèse de magister de l'université de BADI OKHTAR ANNABA2007.

[15] **ABDELMADJID CHAOUI** « filtrage actif triphasé pour charges non linéaires » thèse de doctorat l'université de FERHAT ABBAS DE SÉTIF, l'université de Poitiers 2006.

[16] **IEC61000-**3-4. limits:limitations of emissions of harmonic current sin1ow voltage power supply systems for equipment withrated current greater than 16a.(1998).

[17] **IEEE-519.IEEE** recommended practices and requirements for harmonic controlin Electricpower systems.(1992).

[18] **CEI 61000-2-4:** "compatibilite électromagnétique (cem). 2eme partie, (environnement). 4eme section: niveaux de compatibilite dans les installations industrielles pour les perturbations conduites a basse fréquence". (2002).

[19] **IEC61000-3-4**"compatibilite electromagnetique (cem). Partie3-4:limites–limitation des emissions decourants harmoniques dans les reseaux bass et ension pour les materielsayantun courant assignesuperieur a16 a. (1998).

[20] **y. Abdelli ,** « etude et commande de convertisseurs statiques multifonctions en vue de l'amelioration de la qualite de l'energie electrique ». These de doctorat de l'universite de nantes, 2005.

[21] **B. M. Bird, J. F. Marsh, P. R. McLellan,** "Harmonic Reduction in Multiple Converts by Triple-Frequency Current Injection ", IEE Proceeding, vol. 116, no. 10, pp. 1730-1734, 1969

[22] **H. Sasaki, T. Machida,** "A New Method to Eliminate AC Harmonics Currents by Magnetic Compensation ", IEEE Trans. on Power Application System, vol. 90, no. 5, pp. 2009-2019, Sept./Oct. 1971.

[23] **l. Gyugyi, e. C. Strycula,** "active ac power filters ", conference ias annual Meeting, 1976, pp. 529-535

[24] **h. Akagi, h. Fujita,** "new power line conditioner for harmonic compensation in Power systems ", ieee trans. On power delivery, vol. 10, no. 3, pp. 1570-1575, jul.1995.

[25] **H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh,** "Control Strategy of Active Power Filters using Multiple Voltage-Source PWM Converters ", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA- 22, no. 3, pp. 460-465, May/Jun. 1986.

[26] **F. Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae**, "A Study of Active Power Filters Using Quad-Séries Voltage-Source PWM Converters for Harmonic Compensation ", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 5, no. 1, pp. 983-990, Nov./Dec. 1990.

[27] **H. Akagi,** "New Trends in Active Filters for Power Conditioning ", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp. 1312-1322, Nov./Dec. 1996.

[28]H. **Akagi,** "Control Strategy and Site Selection of a Shunt Active Filter for Damping of Harmonic Propagation in Power Distribution Systems ", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 12, no. 1, pp. 354-363, Jan. 1997

[29] **v. Aburto, m. Schneider, l. Moran, j. Dixon,** "an active power filter implemented with a three level npc voltage-source inverter ", conference pesc'97, vol. 2,jun.1997, pp. 1121-1126.

[20] **F. Z. Peng, J: W. McKeever, D. J. Adams,** "A Power Line Conditioner Using Cascade Multilevel Inverters for Distribution Systems", Conference IAS Annual Meeting, New Orleans (US), Oct. 1997, pp. 1316-1321.

[30] **b. M. Song,** "voltage balancing techniques for flying capacitors used in soft-switching multilevel active power filters ", thèse de la faculté de l'institut polytechnique de virginia (etats unis), 2004.

[31] **h. Miranda, v. Cardenas, j. Pérez, c. Nuñez,** "a hybrid multilevel inverter for shunt active filter using space vector control ", conference pesc'04, aachen (germany), 2004.

[32] **s. Hui, z. Ji-yan, l. Wei-dong,** "a novel active power filter using multilevel converter with self voltage balancing ", conference powercon'02, vol. 4, oct. 2002, pp. 2275-2279.

[33] **m. Saeedifard, a. R. Bakhshai, p. Jain,** "an active power filter implemented with a three-level npc converter in conjunction with the classification technique ", conference ccgei'03, montréal (canada), may 2003.

[24] **b-r. Lin, h-k. Chiang, k-t. Yang,** "shunt active filter with three-phase four-wire npc inverter ", ieee international midwest symposium on circuits and systems, vol. 2, jul. 2004, pp.ii.281-ii.284

[35] **p. C. Tan, r. E. Morrison, d. G. Holmes,** "voltage form factor control and reactive power compensation in a 25-kv electrified railway system using a shunt active filter based on voltage detection ", ieee trans. On industry applications, vol. 39, no. 2, mar./apr. 2003.

[36] **p. C. Tan, p c loh, d. G. Holmes, r. E. Morrison,** "application of multilevel active power filtering to a 25 kv traction system ", conference aupec'92, melbourne (australie), 2002.

[37] **m. Rastogi, p. W. Hammond, s. R. Simms,** "multi-level active filter for medium Voltage applications ", conference peds'05, vol. 2, nov. 2005, pp. 1508-1513.

[38] **s. Loudot, h. Pouliquen, t. Meynard, y. Chéron,** "active current filter for mv/hv networks ", conference epe'95, vol. 1, séville (spain), pp. 1129-1134.

[39] **s. Srianthumrong, h. Akagi,** "a medium-voltage transformerless ac/dc power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter ", ieee trans. On industry applications, vol. 39, n° 3, pp. 874-882, may/jun. 2003.

[40] **r. Inzunza, h. Akagi,** "a 6.6 kv transformerless shunt hybrid active filter for Installation on a power distribution system", ieee trans. On power electronics, vol. 20, no. 4, pp. 893-900, jul. 2005.

[41] **c. Junling, j. Xinjian, z. Dongqi, d. Likuan, y. Beige,** "high power hybrid active power filter for medium-voltage distribution network ", conference icems, vol. 2, no. 6, sep. 2005, pp. 1381-138.

[42] **S. BERNARD, G. TROCHAIN** Deuxième génération de compensateur actif d'harmoniques forte capacité basé sur le mode d'injection du courant.MGE UPS SYSTEMS, MGE0121UKI 1998

[43] **M^{elle} KEBIRI Samia** « Modélisation et simulation d'un filtre actif multiniveaux » mémoire de magister UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI, TIZI-OUZOU 2009**.**

[44] **J. Xu,** « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994

[45] **A. Salem Nia,** « Contribution à l'étude théorique et expérimental d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 24 Septembre 1996.

[46] **H. Benquassimi,** « Conception de convertisseurs alternatifs – continu mono étage A absorption sinusoïdale »Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 18 Juin 1998.

[47] **M.a.e. Alali,** « contribution a l'étude des compensateurs actifs Des réseaux électrique basse tension ». Thèse de doctorat, ULP Strasbourg i. 12 septembre 2002.

[48] **CHELLI Zoubir** Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique thèse doctorat.

[49] **JOIN, Cédric.** *Diagnostic des systèmes non linéaires-Contribution aux méthodes de Découplage*. 2002. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy I.

[50] **J. Xu,** « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994.

[51] **A. Salem Nia,**« Contribution à l'étude théorique et expérimental d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 24 Septembre 1996.

[52] **L. Benchaita,** « Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 30 Octobre 1998

[53] **M. lardjoum Mohamed youcef, melle. khorchef imane »** Commande d'un filtre actif parallèle de puissance par la méthode SVPWM fondu sur un réseau »Master Électrique basse tension-université Médéa (215-216)

[54] **MOUSSA Oussama** « étude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif » mémoire de magister BATNA2

[55] **S. Beaulieu,** « Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique ». Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Université du Québec à Chicoutimi. MAI 2007.

[56] **a.morsli, a.tlemcani, m.s.boucherit et n.ould cherchali,** ''Dépollution des Réseaux Electriques Basse Tension utilisant un Filtre Actif Parallèle à deux niveaux contrôé par l'Algorithme P-Q'', Vol 53, N°=2, 2012..

[57] **Mohamed Muftah ABDUSALAM** « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales »thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I.

[58] **l. Asiminoaei, s. Hansen, c. Lascu and f. Blaabjerg,** « selective harmonic current Mitigation with shunt active power filter ». Epe, aalborg, (2007).

[59] **j. H. Kim and s. K. Sul,** « over modulation strategy for a three-phase four-leg voltage Source converter ». Ieee, industry applications conference, 37th ias annual meeting,(2003).

[60] **MOUSSA Oussama**« l'étude des harmoniques et techniques de commandes du filtre actif » thèse magister université Batna 2.

[61] **R. Kiffouche,** « Identification des harmoniques et génération de courants de référence - Application au convertisseur statiques ». Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes, Juillet 2006.

[62] **. M.C. Benslimane,** «Compensation générale des harmoniques Etude, dimensionnement et commande d'un filtre actif parallèle». Mémoire de Magister, Université M'Hamed Bougara de Boumerdes. 2002.

[63] **CHENNAI Salim,** ''Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle'', Thèse de doctorat en génie électrique, université Mohamed Khider- Biskra (Algérie) 2013.

[64] **S.Tadjer I.Habi,** "Problématiques et identification des perturbations harmoniques dans un réseau basse tension", article,Laboratoire de la recherche syr l'électrification des entreprises industrièlles, Faculté des Hyrocarbures et de la chimie, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, (Algérie).

[65] **MAGRAOUI Mohamed,** ''Validation de techniques de commande d'un filtre actif parallèle'', Exigence partielle à la maitrise en génie électrique, L'Ecole De Technologie Supérieure, MONTREAL, (CANADA) 17-septembre 2007.

[66] **Amaia Lopez de Heredia Bermeo,** "Commande avancées des systèmes dédies a l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la moyenne tension", Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble,(France) 2006.

[67] **C. A. Quinn, N Mohan, & H. Mehta,** "A four-wire, current-controlled converter provides harmonic neutralization in three-phase, four-wire systems", in Proc. IEEE APEC'93, pp. 841–846, 1994.

[68] **Melle HİND DJEGHLOUD** « filtrage actif de puissance » thèse de doctorat UNİVERSİTÉ MENTOURİ CONSTANTİNE 2007.

BIBLIOGRAPHIE