

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Mention Électrotechnique
Spécialité Machines Électriques

présenté par

IHADDADEN Seif eddine

&

BETTACHE Amine

Étude et simulation d'un filtre actif parallèle alimenté par un système photovoltaïque

Proposé par :M^{me} M. GUERGAH

Juillet 2019.

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

Chapitre II

Notions sur le système photovoltaïque

Chapitre III

Modélisation et commande du Filtre actif parallèle

Chapitre IV

Simulation et résultats du Filtrage

ملخص:

تم توفير الطاقة الكهربائية كتيار جيبي بحت، ولكن في الوقت الحاضر، وبسبب تطور المعدات الإلكترونية التي تسبب اضطرابات في جودة الطاقة الكهربائية، لحل هذه المشكلة سوف يتم تكريس عملنا للحد من التيارات الغير المتناسقة في الشبكة الكهربائية عن طريق محاكاة تركيب عامل التصفية المتوازية ثنائي المستوى يتم تشغيله بواسطة الألواح فولتا ضوئية في الشبكة باستخدام برنامج P-SIM .

Résumé :

L'énergie électrique est fournie sous forme de courant purement sinusoïdal, mais matériel d'électronique provoque des harmoniques dans le réseau, pour résoudre ce problème notre travail sera consacré à la réduction des courants harmoniques dans le réseau électrique en simulant l'installation d'un filtre actif parallèle à deux niveaux de tension alimenté par un panneau photovoltaïque dans le réseau à l'aide du logiciel P-SIM.

Abstract:

The electrical energy is supplied as pure sinusoïdal current, but electronics equipment causes harmonics in the network, to solve this problem our work will be devoted to the reduction of harmonic currents in the electrical network by simulating the installation of a parallel active filter has two levels of voltage by a photovoltaic panel in the network using the P-SIM software.

Notations

f_k	-----	La fréquence de l'harmonique
f_1	-----	La fréquence du fondamentale
k	-----	Le rang de l'harmonique
H_k	-----	Un harmonique de rang K
U_{Hk}	-----	Un harmonique de tension de rang K
I_{Hk}	-----	Un harmonique de courant de rang K
U_{H1}	-----	La tension fondamental
I_{H1}	-----	Le courant fondamental
$S(t)$	-----	Un signal périodique
T	-----	La période du signal $S(t)$
f	-----	La fréquence du signal $S(t)$
w	-----	La pulsation du signal $S(t)$
θ_k	-----	phase de l'harmonique de rang k
a_0	-----	La valeur de la composante continue du signal $S(t)$
i_{ch}	-----	Le courant fondamental combiné a les harmoniques
i_{filtre}	-----	Le courant absorbé par le filtre passif
$i_{rés}$	-----	Le courant de réseau électrique
UPQC	-----	Unified Power Quality Conditioner (Filtre actif série et parallèle)
$I_{H1_{max}}$	-----	La valeur maximal de courant fondamental
$U_{H1_{max}}$	-----	La valeur maximal de tension fondamental

$I_{H1_{eff}}$	-----	La valeur efficace de courant fondamental
$U_{H1_{eff}}$	-----	La valeur efficace de tension fondamental
$I_{HK_{T_{eff}}}$	-----	La valeur efficace total des harmoniques des courants
$U_{HK_{T_{eff}}}$	-----	La valeur efficace total des harmoniques des tensions
THD	-----	Le taux de distorsion d'harmonique
THD_u	-----	Le taux de distorsion d'harmonique en tension
THD_i	-----	Le taux de distorsion d'harmonique en courant
MLI	-----	Modulation de largeur d'impulsion
FAP	-----	Filtre actif parallèle
E_{ph}	-----	la quantité d'énergie du rayonnement solaire.
h	-----	constante de Planck
λ	-----	longueur d'onde
C	-----	vitesse de la lumière
I_{Ph}	-----	Courant créé par l'effet voltaïque
I_d	-----	Courant de la diode
I_s	-----	courant de saturation inverse de la diode
q	-----	la charge de l'électron
n	-----	le facteur d'idéalité de la diode
S	-----	La surface (m^2)
K	-----	constante de Boltzmann
T	-----	température de la jonction

- V** ----- tension de sortie de la cellule
- R_s** ----- Résistance série
- R_{sh}** ----- Résistance de shunt (parallèle)
- η** ----- rendement
- P_{max}** ----- puissance maximum (watts)
- G** ----- L'irradiation(l'éclairement) de référence (1000 w/m²)

Sommaire

Introduction général	1
Chapitre I : Généralités sur la pollution des réseaux électriques	
I.1 Introduction	4
I.2 Qualité de l'énergie électrique	4
I.3 Perturbations électriques	5
I.3.1 Creux de tension	5
I.3.2 Coupures de courte durée	5
I.3.3 Surtension	6
I.3.4 Déséquilibre du système triphasé de tension	7
I.3.5 Perturbations harmoniques en courant et en tension	7
a) Les types des harmoniques	8
a - 1 Rang d'un harmonique	8
a - 2 La représentation spectral	9
b) Source des harmoniques	10
C) Les effets des harmoniques	11
C - 1 Les effets instantanés	12
C - 2 Les effets à long terme	13
d) Caractérisation des perturbations harmoniques	14
d - 1 L'expression de la valeur efficace des harmoniques	14
d - 2 Taux distorsion harmonique THD (%)	15
I.4 Les méthodes de Réductions de la pollution électrique	15

I.4.1 Vivre avec les harmoniques	15
I.4.2 Solutions traditionnels	16
a - Filtres passifs	16
a - 1 Filtre passif amorti	17
a - 2 Filtre passif résonant	18
I.4.3 Solutions modernes	19
I.5 Conclusion	19

Chapitre II : Notions sur le système photovoltaïque

II -1 Introduction	20
II - 2 Effet photovoltaïque	20
II-2-1 définition	20
II-2-2 Principe de la génération photovoltaïque	21
II-3 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque	23
II-3-1 Les caractéristiques électriques d'une cellule PV	26
a) La tension en circuit ouvert	26
b) Le courant de court-circuit	26
c) La puissance	26
d) Le rendement	27
II-4 Les différents types de cellules solaires et leur rendement	28
a) Le silicium monocristallin	28
b) Le silicium multi cristallin (poly cristallin)	29
c) Le silicium amorphe	30
d) Une quatrième technologie	30
II-5 Convertisseur de puissance de système photovoltaïque	31
II-5-1 Convertisseur DC/DC	32
II-5-2 les Types de convertisseurs DC/DC	34
A) - Hacheur parallèle (Boost)	34

a) - Fonctionnement	35
a-1) - Fonctionnement à courant de source ininterrompu	35
a-2) Limites entre le fonctionnement interrompu et le fonctionnement ininterrompu.....	36
B)- Dimensionnement et choix des composants L et C du hacheur Boost	37
II-6 Conclusion	39

Chapitre III : Modélisation et commande d'un filtre actif parallèle

III.1 Introduction	40
III.2 Les filtres actifs	40
III.2.1 principe	40
III.2.2 Structure générale d'un filtre actif	41
III.2.3 principales combinaisons possibles	42
a - Le filtre actif parallèle	42
b - Le filtre actif série	43
c - Le filtre actif série parallèle	44
III.3 Les filtres hybrides	45
a- Filtre actif en série avec la source / Filtre passif en parallèle avec la charge	46
b - Filtre actif et filtre passif en parallèle avec la charge	46
III.4 Structure général d'un filtre actif parallèle	47
III.4.1 La partie puissance	48
A) Onduleur de tension	48
A.1) Configurations	49
a.1) L'onduleur à neutre raccordé	49

a.2) L'onduleur sans neutre raccordé	49
A.2) Équations de base	50
B) Système de Stockage d'énergie	51
C) Filtre de Sortie	52
III.4.2 La partie contrôle-commande	52
A) La méthode d'identification des courants harmonique	52
B) Méthode de la puissance instantanée P-Q	53
a) Définition	53
b) Principe de fonctionnement	53
C) Commande d'onduleur par MLI	56
III.5 Conclusion	57
 Chapitre IV : Simulation et résultats du filtrage	
IV.1 introduction	58
IV.2 Résultat de simulation	60
A) Tensions et courants du réseau électrique	61
B) Le courant de la charge polluante	60
C) Identification des courants Perturbés	62
D) Le courant généré par le filtre actif	62
E) Le courant filtré	63
IV.3 Interprétation des résultats	64
IV.4 Conclusion	64
Conclusion générale	65

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Creux de tension	5
Figure I.2 : Coupure de tension	6
Figure I.3 : Représentation graphique d'une surtension	6
Figure I.4 : Représentation graphique de déséquilibre	7
Figure I.5 : Distorsion du signal fondamental par un harmonique	8
Figure I.6 : La tension fondamentale et les harmoniques des tensions du rang (3,5,7,9)	9
Figure I.7 : Représentation spectral d'un signal périodique	10
Figure I.8 : Alimentation d'une charge linéaire	11
Figure I.9 : Alimentation d'une charge non linéaire	11
Figure I.10 : Raccordement d'un filtre passif	17
Figure I.11 : Filtre passif amorti (passe-haut)	18
Figure I.12 : Filtre passif résonant	18
Figure II.1 : Schéma d'une cellule élémentaire	22
Figure II.2 : à gauche caractéristique d'une photodiode, à droite caractéristique d'une Cellule Photovoltaïque	22
Figure II.3 : Cellules, modules et panneau photovoltaïques	23
Figure II.4 : Représentation la cellule PV idéale	24
Figure II.5 : Représentation la cellule PV réelle	25
Figure II.6 : Caractéristique courant-tension électriques d'une cellule PV	27
Figure II.7 : Caractéristique puissance-tension électriques d'une cellule PV	27

Figure II.8 : Cellule photovoltaïque de type silicium monocristallin	29
Figure II.9 : Cellule photovoltaïque de type silicium multi cristallin	29
Figure II.10 : Cellule photovoltaïque de type silicium amorphe	30
Figure II.11 : Caractéristiques courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorphe et d'une autre au silicium cristallin	31
Figure II.12 : Schéma d'un quadripôle électrique	32
Figure II.13 : Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur	33
Figure II.14 : Hacheur parallèle	34
Figure II.15 : Hacheur parallèle Fonctionnement à courant de source ininterrompu	35
Figure II.16 : Hacheur parallèle Limite du fonctionnement à courant de source ininterrompu.....	36
Figure III.1 : Le retour à la forme sinusoïdale du courant d'alimentation	41
Figure III.2 : Structure générale d'un filtre actif	42
Figure III.3 : Filtre actif parallèle	43
Figure III.4 : Filtre actif série	44
Figure III.5 : Filtre actif série parallèle (UPQC)	45
Figure III.6 : Filtre combiné actif en série avec la source / passif en parallèle avec la charge	46
Figure III.7 : Filtre combiné actif et passif en parallèle avec la charge	47
Figure III.8 : Structure général d'un filtre actif parallèle	48
Figure III.9 : Onduleur de tension triphasé	49
Figure III.10 : Transformation d'axe « abc » à « α - β »	53
Figure III.11 : Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q	55

Figure III.12 : Principe de commande par MLI	57
Figure IV.1 : schéma global du système	58
Figure IV.2 : Les trois tensions du réseau triphasé	60
Figure IV.3 : Les trois courants de la source (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})	60
Figure IV.4 : spectre harmonique du courant pollué	61
Figure IV.5 : Les courants de charge ($i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$)	61
Figure IV.6 : Les courants des référence ($i_{réfa}, i_{réfb}, i_{réfc}$)	62
Figure IV.7 : Les courants injectés ($i_{inja}, i_{inj b}, i_{inj c}$)	62
Figure IV.8 : Les courants filtrés (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})	63
Figure IV.9 : Spectre d'harmonique du courant filtré	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : Valeurs critiques minimaux calculées et normalisées des composants de l'hacheur 38

Tableau IV.1 : Les paramètres de Simulation 59

Introduction générale

Les réseaux électriques est un ensemble de circuits interconnectés qui doit diriger de l'énergie électrique à partir des centrales de production aux consommateurs d'électricité, les consommateurs d'énergie électrique utilise un matériel qui comporte des charges non linéaires, peuvent être des consommateurs de grande puissance comme les industriels qui utilisent des convertisseurs statiques pour les systèmes de commande, pour la variation de vitesse d'un moteur électrique ou pour l'alimentation des charges continues, ces convertisseurs sont à base de composants de puissance qui provoque des problèmes au niveau du réseau électrique [7].

Ces composants sont considérés comme des charges non linéaires, ainsi un redresseur à diode ou à thyristors, un gradateur, un onduleur, un hacheur, consomment un courant non sinusoïdale, génèrent une puissance réactive, ce qui provoque des perturbations et pollution harmoniques dans le réseau électrique [7].

D'autre part ces dernières années, grâce à l'augmentation de la consommation d'énergie, l'agitation et les fluctuations conséquentes du prix du pétrole brut et les changements climatiques mondiaux, les chercheurs se sont concentrés sur l'utilisation des énergies renouvelables incluant les systèmes photovoltaïques, la biomasse et l'énergie éolienne comme une alternative intéressante [31], parmi les différentes ressources renouvelables, la technologie photovoltaïque est l'une des technologies à plus forte croissance, en raison de la disponibilité en abondance de l'éclairage solaire, n'ayant pas d'impacts environnementaux négatifs, la demande d'énergie produite à partir des systèmes photovoltaïques connaît une croissance importante, où la recherche montre que la contribution des systèmes photovoltaïques à la production d'énergie était d'environ 14 000 MW en 2010 et devrait être de 70 000 MW en 2020 [32].

Pour tout cela, l'amélioration de la qualité de l'énergie est devenue un sujet de recherche majeur dans le système de distribution électrique moderne, il y a près de vingt ans, la plupart des charges utilisées par les industries et les consommateurs étaient passives et linéaires, avec un nombre moindre de charges non linéaires ayant ainsi moins d'impact sur le système d'alimentation, avec l'arrivée des semi-

conducteurs et des dispositifs de l'électroniques de puissance et leur facilité de contrôle ont causé l'utilisation large des charges non linéaires, telles que : L'hacheur, l'onduleur, le redresseur ,etc , l'utilisation de ces dispositifs est la cause majeure des perturbations harmoniques et de la puissance réactive, ces derniers induisent la surchauffe des transformateurs, la distorsion de la tension d'alimentation, le faible facteur de puissance et le dysfonctionnement des équipements sensibles [33].

La grande masse de ces recherches a adopté le filtrage (passif et actif) comme solution, d'autres se sont axées vers la reconfiguration des charges polluantes elles-mêmes (convertisseurs AC - DC à MLI) [18].

Tout d'abord, les filtres passifs à base d'inductance L et de capacité C ont été choisis comme meilleurs absorbeurs des harmoniques, en effet ces derniers offrent une manière simple et effective pour éliminer les harmoniques dans différents cas, spécialement, si ces derniers sont localisés à l'intérieur d'une gamme étroite de fréquence, alors l'impédance de la source d'harmoniques est élevée et le réseau ne présente pas de résonance près des fréquences harmoniques [18].

Néanmoins, l'efficacité de ces filtres se retrouve dégradée par la présence de certains facteurs :

- Insuffisante habilité à couvrir une large bande de fréquences qui nécessite l'installation de plusieurs filtres.
- Naissance de résonances séries et parallèles avec le réseau qui conduit à l'amplification de tout harmonique à fréquence voisine de celle de la résonance.
- La mal adaptation avec les changements de l'environnement auquel ils sont connectés [18].

Suite à ces effets néfastes, les recherches se sont orientées vers d'autres solutions présentant de moindres inconvénients. Alors, grâce au développement qu'a connu la technologie des semi-conducteurs de puissance entièrement commandables (GTO, IGBT, et MOSFET), ont paru les convertisseurs AC - DC (redresseurs) d'une part, permettant un meilleur contrôle du facteur de puissance et l'atténuation de certains harmoniques basses fréquences, et les filtres actifs série et parallèle, constitués le plus souvent d'onduleurs de tension, d'autre part [18].

Ces derniers se caractérisent par des qualités supérieures à celles des convertisseurs AC –DC, pour toutes les qualités mentionnées précédemment, les filtres actifs ont été choisis comme la solution idéale pour réduire les harmoniques, éliminer les résonances, compenser l'énergie réactive et améliorer le facteur de puissance [18], c'est pour cela que ce travail a été consacré à l'étude d'un filtre actif parallèle constitué d'un onduleur de tension à deux niveaux commandé Par MLI alimenté par un panneau photovoltaïque.

La présentation du mémoire, structuré en une introduction, quatre chapitres, et une conclusion suivie d'annexes, est répartie comme suit :

- Un premier chapitre dédié à les généralités sur les différentes sources de pollution des réseaux électriques et a l'énumération des nombreux effets néfastes qu'ils engendrent et les différentes stratégies de dépollution.

- Un second chapitre : fera l'objectif de deux parties :

La première partie sera consacrée aux systèmes photovoltaïques, et une description sur leur principe de fonctionnement.

La deuxième partie traitera les convertisseurs DC/DC, et en particulier l'hacheur élévateur Boost.

- Un troisième chapitre concernant l'étude du filtrage actif parallèle à deux niveaux : Structure, Principe, Modélisation, Commande.

- Un quatrième chapitre concernant à une simulation et interprétation des résultats, des commentaires.

- Et en termine avec une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

I.1 Introduction :

Depuis quelques années, il y a une forte augmentation des équipements électriques domestique (éclairage néon, téléviseur, four à micro-onde...) et industriels (four à arc, machine à souder, four à induction...) connectés au réseau électrique, à cette cause ce dernier va être pollué et exposé à des perturbations, ces équipements électriques peuvent produire des harmoniques qui entraînent le mal fonctionnement de certains appareils même elles sont capables de les endommager complètement.

Dans ce chapitre les caractéristiques générales des perturbations électriques vont être étudiées, dans un premier temps nous définissons la qualité de l'énergie électrique et leurs perturbations principales, et en particulier les harmoniques de tension et de courant avec ces différents types, ainsi les sources qui le génèrent, ensuite nous présentons les effets néfastes de cette pollution électrique, finalement nous parlons sur les solutions possibles pour diminuer ou bien éliminer cette pollution électrique.

I.2 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 qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des amplitudes et des déphasages entre les phases

La qualité d'énergie peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. Dans ce qui suit on va présenter les perturbations les plus fréquentes affectant les courants et les tensions dans un réseau électrique [13].

Chapitre I Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

I.3 Perturbations électriques :

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, Surtension, Déséquilibre du système de tension triphasé et Perturbations harmoniques. [14]

I.3.1 Creux de tension :

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes, Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées. [8]

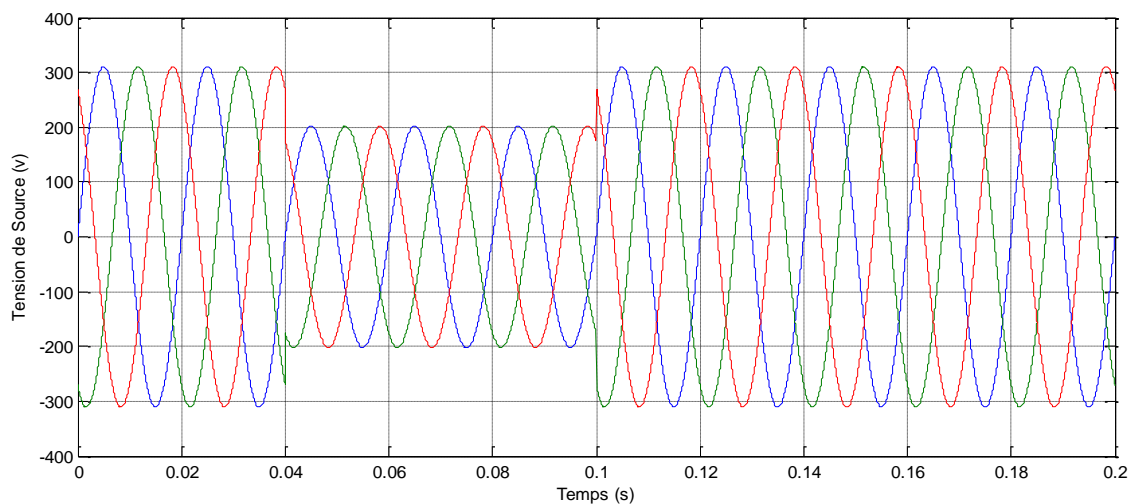


Figure I.1 : Creux de tension

I.3.2 Coupures de courte durée :

Une coupure momentanée désigne la diminution de l'amplitude de la tension en bas de 10% de la valeur nominale pour une durée ne dépassant pas 1 minute, et peut être généralement causé par un court-circuit survenant sur le réseau. Ce type d'anomalie est caractérisé par sa durée laquelle est fonction du temps de fonctionnement des dispositifs de

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

protection, Les coupures sont parfois précédées par un creux de tension dans le cas d'un défaut survenant sur la source d'alimentation [15].

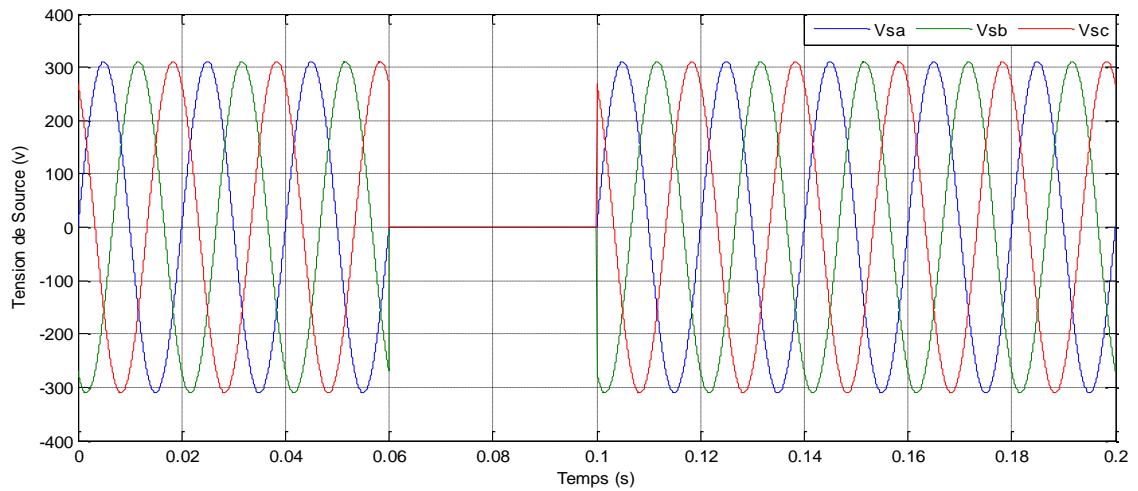


Figure I.2 : Coupure de tension

I.3.3 Surtension :

Une surtension de courte durée désigne l'augmentation de l'amplitude de la tension en atteignant entre 110% et 180% la valeur nominale à la fréquence fondamentale pour une durée allant de 0,5 cycle jusqu'à 1 minute [15].

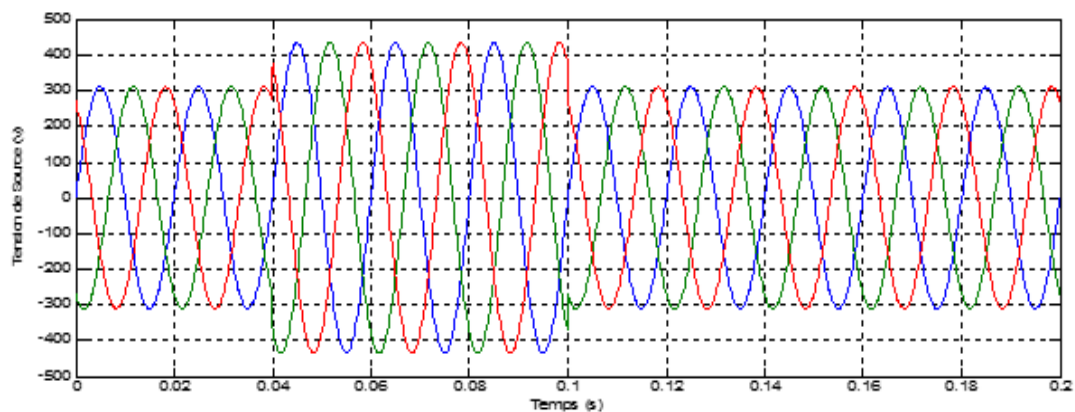


Figure I.3 : Représentation graphique d'une surtension

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

I .3.4 Déséquilibre du système triphasé de tension :

On dit qu'il y a déséquilibre dans un réseau, lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres. [16]

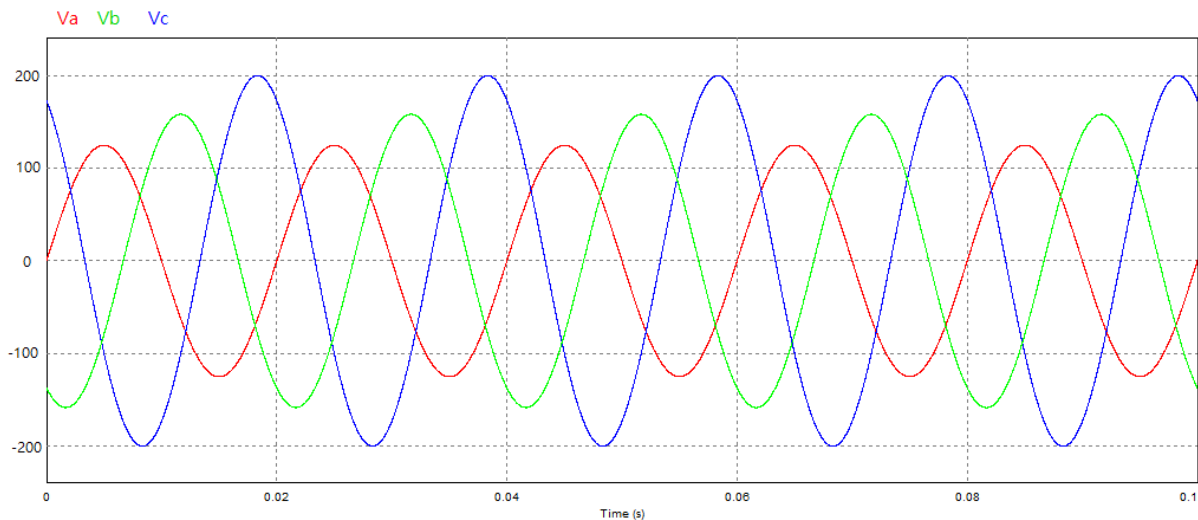


Figure I.4 : Représentation graphique de déséquilibre

I .3.5 Perturbations harmoniques en courant et en tension :

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier (k) de la fréquence fondamentale du réseau de distribution généralement (50 ou 60 Hz), elles sont caractérisé par une amplitude souvent exprimée en pourcentage de l'amplitude du fondamental et par une phase , lorsqu'elles sont combinées à la tension ou au courant fondamental sinusoïdal, les harmoniques provoquent la distorsion de la forme du signal fondamental.

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

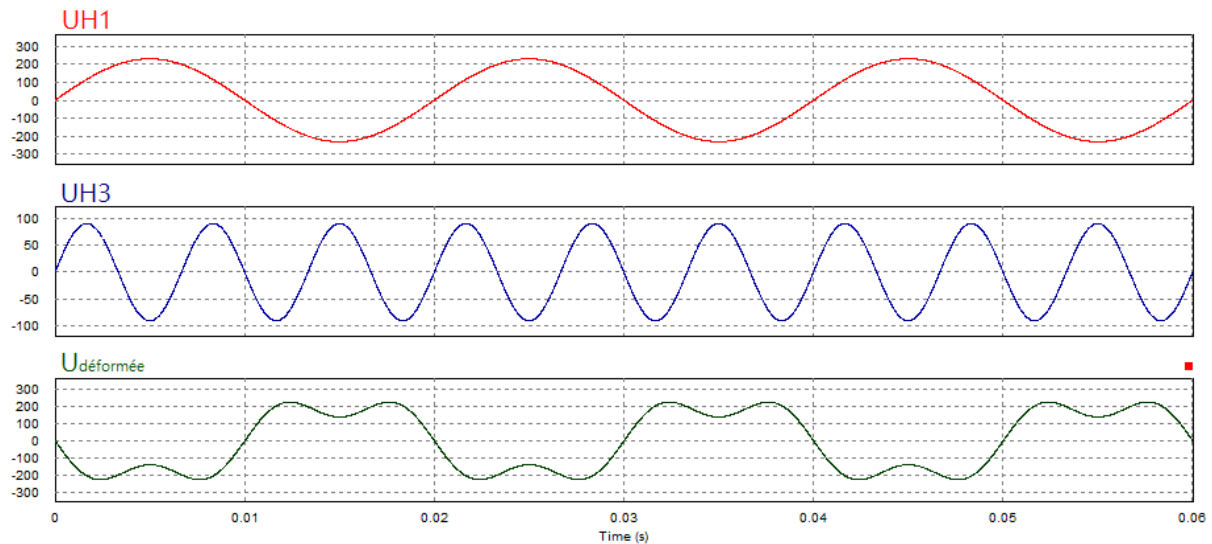


Figure I.5 : Distorsion du signal fondamental par un harmonique

a) Les types des harmoniques :

a - 1 Rang d'un harmonique :

Dans ce chapitre on va nommer les harmoniques par H_k , où k est le rang de l'harmonique, qui est le rapport de la fréquence de l'harmonique f_k à celle du fondamental f_1 .

$$k = \frac{f_k}{f_1} \dots\dots\dots (I.1)$$

En général les harmoniques du rang plus que 50 et du rang pairs sont négligeables et seuls les harmoniques du rang impaires existent (car la sinusoïde est une fonction impaire),

- UH_k ou IH_k indique le type d'harmonique (tension ou courant).
- UH_1 ou IH_1 désigne la tension ou le courant sinusoïdal fondamental lorsqu'il n'y a pas d'harmonique.

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

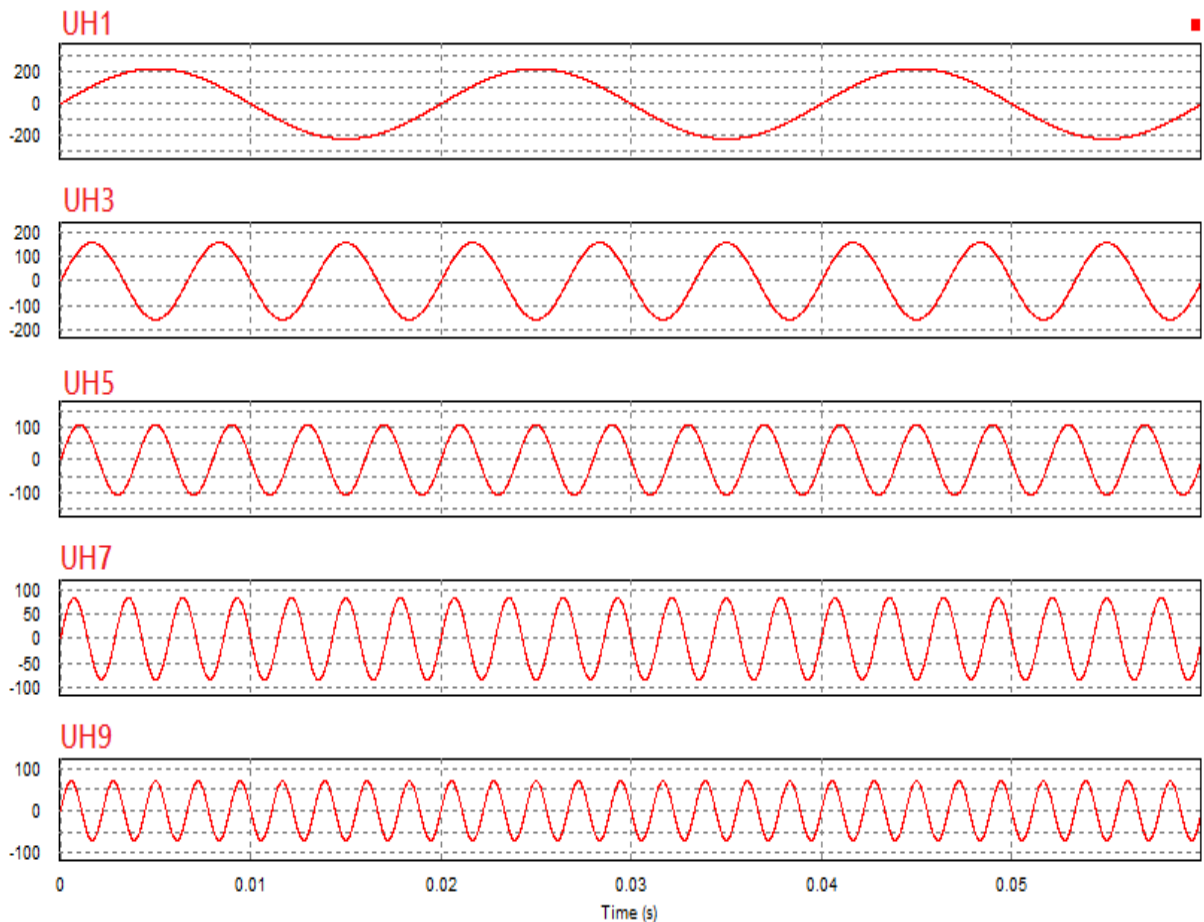


Figure I.6 : La tension fondamentale et les harmoniques des tensions du rang (3,5,7,9)

a - 2 La représentation spectral :

Le spectre est un histogramme fournissant l'amplitude de chaque harmonique en fonction de son rang, l'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en point spécifier, l'examen du spectre permet d'apprécier à la fois quels sont les harmoniques en présence et leur importance respective.

On donne un exemple d'une représentation spectral des signaux montrer par la figure I.6, qui correspond à un signal courant fondamental 50Hz et des signaux harmoniques courant de rang 3(150 Hz), 5(250 Hz), 7(350 Hz), 9(450 Hz).

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

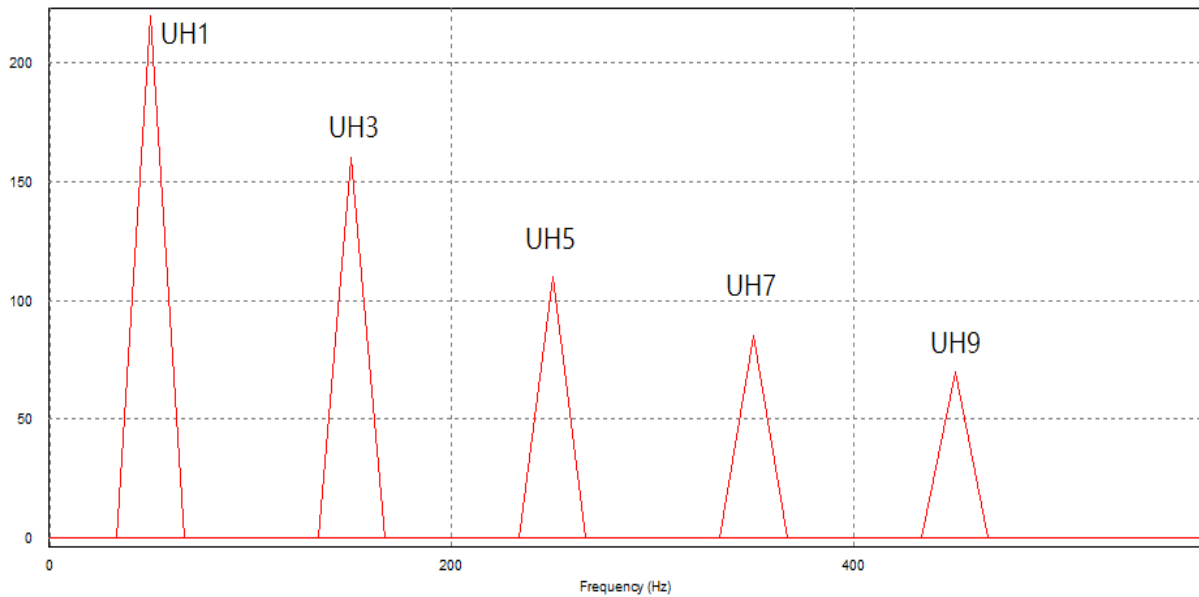


Figure I.7 : Représentation spectrale d'un signal périodique

b) Source des harmoniques :

Le réseau électrique fournit aux charges une tension sinusoïdale de 50/60 Hz, La forme d'onde du courant fourni par la source est en réponse aux besoins de la charge, a cela on distingue deux type de charges, l'une qui absorbe un courant sinusoïdale avec la même fréquence que la tension, on l'appelle une charge linéaire, ce dernier ne génère pas des harmoniques au réseau électrique, l'autre type de charge absorbe un courant périodique, mais pas sinusoïdale, on le nomme une charge non linéaire, ce type de charge est le responsable principal des harmoniques présents sur le réseau électrique.

Exemples des charges non-linéaires :

- Les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, redresseur, ...)
- Les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu ;
- Les onduleurs ;
- Les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, ...)
- Les appareils domestiques (TV, fours micro-ondes, éclairage néon, ...)
- Certains équipements avec saturation magnétique (transformateurs) ;
- Gradateur de lumière, de chauffage.

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

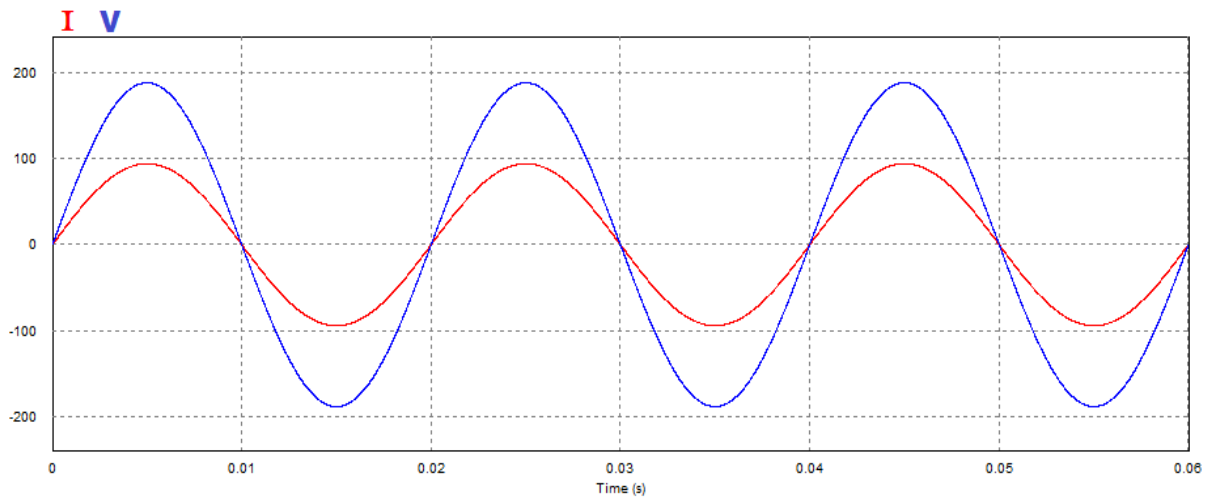


Figure I.8 : Alimentation d'une charge linéaire

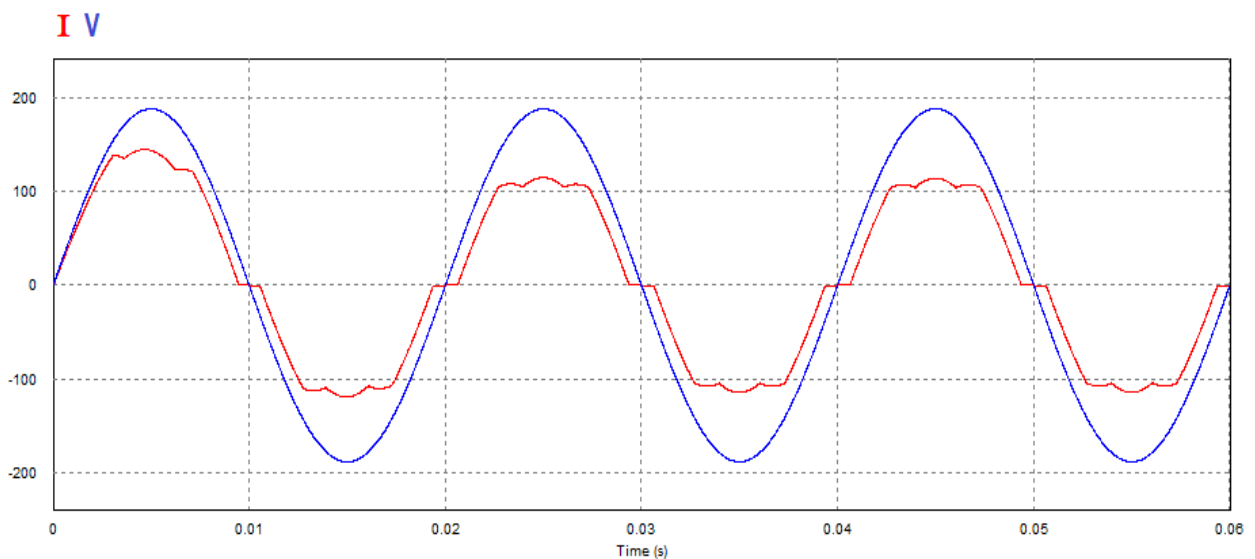


Figure I.9 : Alimentation d'une charge non linéaire

C) Les effets des harmoniques :

On peut considérer que les perturbations provoquées par les harmoniques se manifestent de deux façons sur les appareils et les équipements électriques :

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

C - 1 Les effets instantanés :

Ce sont les effets immédiats sur le bon fonctionnement d'un équipement, il s'agit de :

a - Perturbation des convertisseurs statiques et des matériels électroniques :

Les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation des systèmes électroniques, elles peuvent influencer les conditions de commutation de thyristor lorsqu'elles déplacent ou multiplient les passages par zéro de la tension. [1]

b – Vibrations et bruits :

Ils sont produits Par les efforts électrodynamiques proportionnels aux courants instantanés en présence, les courants harmoniques généreront des vibrations, des bruits acoustiques, surtout dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances). Des couples mécaniques pulsatives, dus aux champs tournants harmoniques, donneront des vibrations dans les machines tournantes. [2]

c – Dysfonctionnement des systèmes de protection et de relais :

Les dispositifs de protection et les relais utilisant les courants de charge peuvent être affectés par la présence d'harmonique, ce phénomène est le responsable d'un déclenchement intempestif des systèmes de protection, et il est la cause des pertes de la sensibilité des relais différentiels par effet de saturation.

d – Perturbation des lignes a courant faible :

Des perturbations surviennent lorsqu'une ligne à courants faibles (contrôle-commande, téléphone) chemine le long d'une canalisation de distribution électrique avec courants et tensions déformés, Les paramètres tels que : longueur du cheminement parallèle, distance entre les deux circuits, fréquence des harmoniques (le couplage augmente avec la fréquence), sont à prendre en compte. [3]

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

C - 2 Les effets à long terme :

Ils se manifestent après une longue exposition au phénomène et se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités ou une destruction complète de l'appareil, les exemples suivants donnent une idée sur l'influence des harmoniques sur certains équipements à usage fréquent :

- *Vieillesse prématurée des moteurs à courant alternatif :*

Les écarts de vitesse important entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor causent des pertes supplémentaires dans les machines, dans leur stator (cuivre et fer), et dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques).

- *Échauffements supplémentaires des condensateurs :*

Ils sont produits par conduction et par hystérésis dans le diélectrique qui peuvent conduire au claquage. [4]

- *Pertes supplémentaires dans les transformateurs :*

Ils sont les constituants les plus directement affectés par les courants harmoniques, Ces derniers produisent pertes supplémentaires des transformateurs dues à l'effet de peau (augmentation de la résistance du cuivre avec la fréquence), à l'hystérésis et aux courants de FOUCAULT (dans le circuit magnétique). [5]

- *Phénomènes de résonance :*

Les fréquences de résonance des circuits forment par les Inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique, Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau. [6]

- *Les échauffements dans les conducteurs :*

Les conducteurs électriques véhiculent le courant fondamental, au même temps ils transportent les courants harmoniques qui produisent par effet Joule un

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

échauffement des conducteurs, la présence des harmoniques dans le réseau diminue aussi la capacité de transport en puissance active de ligne.

d) Caractérisation des perturbations harmoniques :

d - 1 L'expression de la valeur efficace des harmoniques :

Il est possible de mesurer la valeur efficace de chaque signal sinusoïdal, même on peut le déduire mathématiquement, elle correspond à la valeur maximale divisée par la racine carrée de deux.

Par exemple :

La valeur efficace de courant fondamental :

$$IH1_{eff} = \frac{IH1_{max}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (I.2)$$

La valeur efficace de tension fondamentale :

$$UH1_{eff} = \frac{UH1_{max}}{\sqrt{2}} \dots\dots\dots (I.3)$$

La valeur efficace totale des harmoniques des courants :

$$IHk_{T,eff} = \sqrt{IH2_{eff}^2 + IH3_{eff}^2 + IH4_{eff}^2 + \dots + IHk_{eff}^2 + \dots} \dots\dots\dots (I.4)$$

$$IHK_{T,eff} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} IHK_{eff}^2} \dots\dots\dots (I.5)$$

La valeur efficace totale des harmoniques des tensions :

$$UHK_{T,eff} = \sqrt{UH2_{eff}^2 + UH3_{eff}^2 + UH4_{eff}^2 + \dots + UHK_{eff}^2 + \dots} \dots\dots\dots (I.6)$$

$$UHK_{T,eff} = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} UHK_{eff}^2} \dots\dots\dots (I.7)$$

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

d - 2 Taux distorsion harmonique THD (%) :

Le taux de distorsion d'harmonique est défini comme le rapport (en %) entre la valeur efficace total des harmoniques à celle de la valeur efficace du fondamental.

Le THD en courant caractérise la déformation de l'onde de courant :

$$THDi = \frac{I_{HK_{T,eff}}}{I_{H1_{eff}}} (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} I_{HK_{eff}}^2}}{I_{H1_{eff}}} (\%) \dots\dots\dots (I.8)$$

Le THD en tension caractérise la déformation de l'onde de tension :

$$THDu = \frac{U_{HK_{T,eff}}}{U_{H1_{eff}}} (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_{HK_{eff}}^2}}{U_{H1_{eff}}} (\%) \dots\dots\dots (I.9)$$

Selon la norme, on peut généralement limiter K à 50, donc on peut écrire aussi :

$$THDi = \frac{I_{HK_{T,eff}}}{I_{H1_{eff}}} (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{50} I_{HK_{eff}}^2}}{I_{H1_{eff}}} (\%) \dots\dots\dots (I.10)$$

$$THDu = \frac{U_{HK_{T,eff}}}{U_{H1_{eff}}} (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{50} U_{HK_{eff}}^2}}{U_{H1_{eff}}} (\%) \dots\dots\dots (I.11)$$

I.4 Les méthodes de Réductions de la pollution électrique :

Le problème de la pollution dans les réseaux électriques nécessite différentes stratégies de dépollution, on peut le classifier par trois catégories, vivre avec les harmoniques, solutions traditionnels et solutions modernes

I.4.1 Vivre avec les harmoniques :

Cette stratégie consiste à accepter (de faire avec) les harmoniques, ce qui revient essentiellement à surdimensionné les équipements pour prendre en compte les effets des harmoniques par exemple : [7]

- Augmentation des sections des câbles ;
- Augmentation de la puissance nominale des sources ;
- Alimentation spécial pour les charges non linéaires ;
- Regrouper les charges polluantes.

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

I.4.2 Solutions traditionnels :

Cette stratégie sert à éliminer les harmoniques partiellement par exemple :

- a- Filtre passifs ;
- b- Inductance de lissage des courants ; [2]
- c- Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs ; [2]
- d- Utiliser des transformateurs a couplages particuliers.

Comme les filtres passifs sont important dans la pratique nous donnons une idée sur ce genre des filtres.

a - Filtres passifs :

Le filtrage passifs consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau, un filtre passif est constitué d'éléments passifs tels que des inductances, des condensateurs et des résistances, qui forment une impédance dont la valeur varie en fonction de la fréquence. On connecte alors le filtre passif en parallèle avec le réseau de manière à absorber un harmonique de courant donné. [4]

Exemple :

Pour éliminer le courant harmonique de rang 5, on dimensionne alors les éléments passifs de manière à ce que l'impédance équivalente du filtre soit la plus petite possible à la fréquence $5 \times$ fondamental et de valeur importante à la fréquence du fondamentale, le courant circulera alors dans l'impédance la plus faible, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau. [4]

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

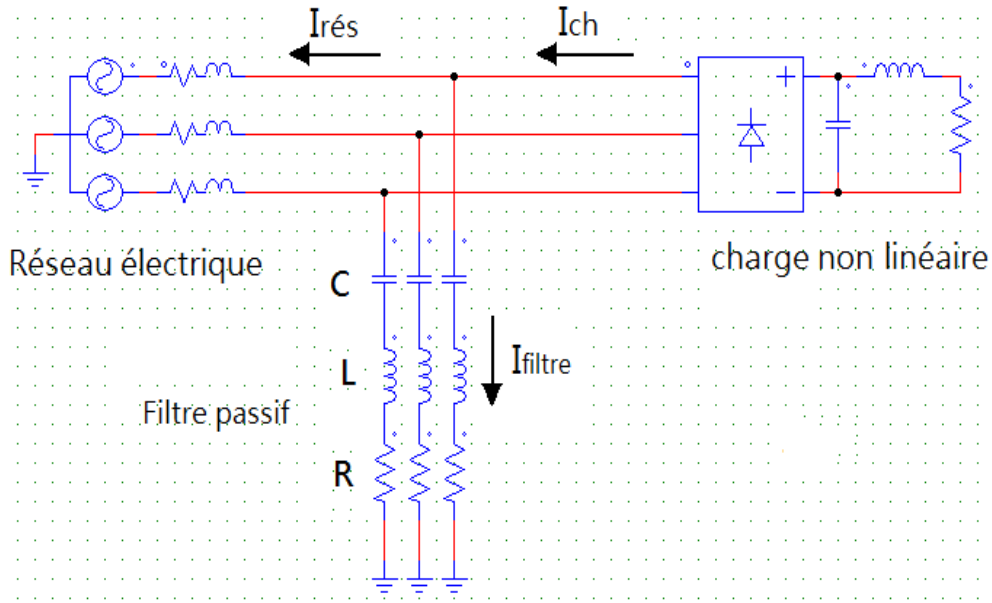


Figure I.10 : Raccordement d'un filtre passif

Equations des courants :

$$i_{ch} = i_{H1} + i_{H5} + i_{H7} + i_{H11} + i_{H13} + \dots \quad \text{..... (I.12)}$$

$$i_{filtre} = i_{H5} \quad \text{..... (I.13)}$$

$$i_{rés} = i_{H1} + i_{H7} + i_{H11} + i_{H13} + \dots \quad \text{..... (I.14)}$$

Parmi les dispositifs de filtrage passif les plus répandus, on distingue deux types de filtre shunt :

- Le filtre passif amorti (passe-haut) ;
- Le filtre passif résonnant.

a - 1 Filtre passif amorti :

Le filtre passif amorti ou passe-haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance dite résistance d'amortissement, le tout en série avec un condensateur, ce type de filtre est efficace seulement pour éliminer les harmoniques de rang suffisamment élevé.

Chapitre I Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

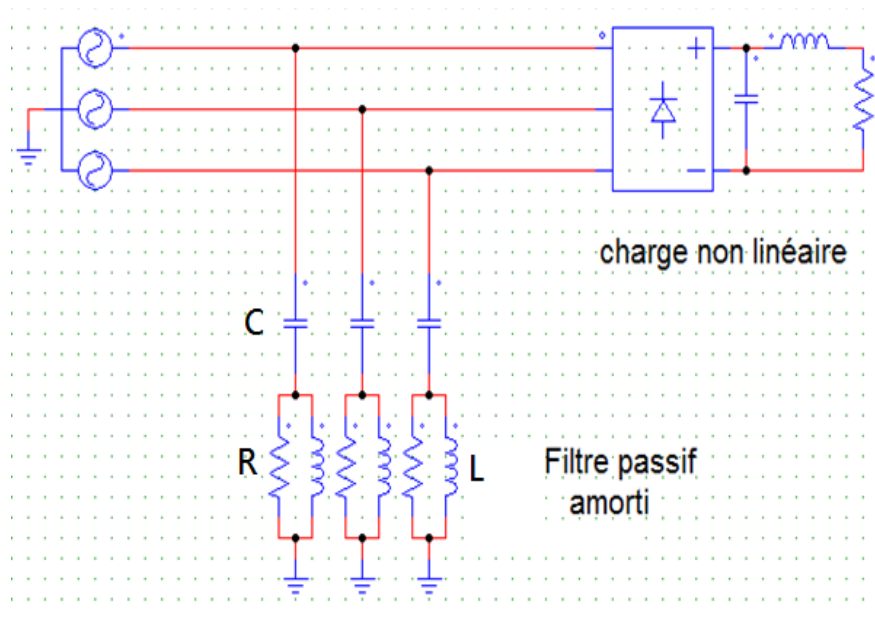


Figure I.11 : Filtre passif amorti (passe-haut)

a - 2 Filtre passif résonant :

C'est un filtre constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, ce type de filtre est généralement utilisé pour éliminer les harmoniques de rang bas.

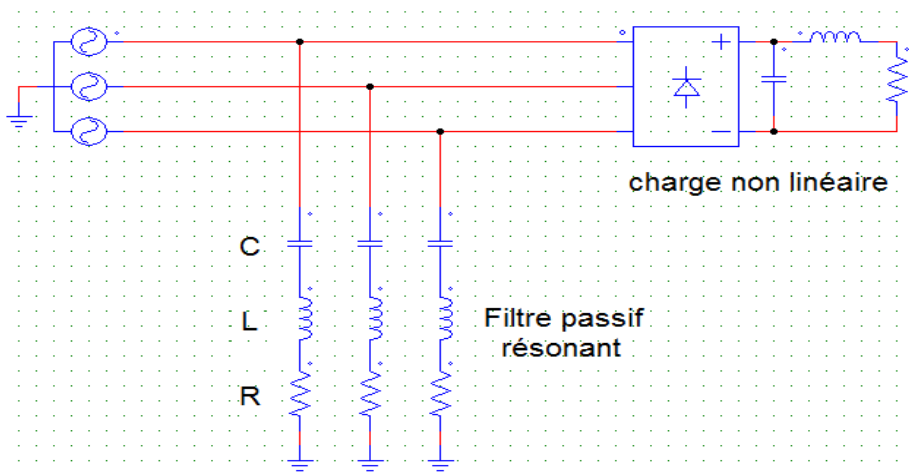


Figure I.12 : Filtre passif résonant

Chapitre I

Généralités sur la pollution harmonique dans les réseaux électriques

I.4.3 Solutions modernes :

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptatif aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir des nouvelles structures des filtres appelée filtres actifs et filtres hybrides.

Cette solution moderne va être détaillé en chapitre 3.

I. 5 Conclusion :

Dans ce premier chapitre, on a présenté les différents types de perturbations pouvant affecter la tension du réseau électrique, après nous avons illustré le phénomène des harmoniques, leurs caractéristiques, ainsi leurs sources, ensuite on a parlé sur effets néfastes de cette pollution, ces effets nous a montrait la nécessité de dépolluer le réseau électrique, ensuite on a vu les solutions de la dépollution qui est classée par trois catégories, vivre avec les harmonique solutions traditionnels qui permettent d'éliminer les harmoniques partiellement avec des problèmes liés à quelques une de ces solutions, ce qui a laissé la place pour les solutions moderne comme solution curative et fiable pour améliorer la qualité d'énergie électrique, nous passons a le deuxième chapitre qui est consacré sur le couplage d'un panneau photovoltaïque avec un hacheur élévateur Boost.

II -1 Introduction :

La limitation des réserves en ressources fossiles ainsi que leur impact négatif sur l'environnement d'une part, et la croissance de la demande en énergie d'autre part, font naître un nouveau principe de production d'électricité utilisant des énergies renouvelables tel que l'énergie photovoltaïque, car étant une énergie propre et inépuisable. Le terme « photovoltaïque » souvent abrégé par l'acronyme « PV », a été formé à partir des mots « photo » qui est un mot grec signifiant lumière et « Volta » qui est le nom du physicien italien Alessandro Volta qui a inventé la pile électrochimique en 1800. [21]

L'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie lumineuse des rayons solaires (photon) en électricité, il utilise pour se faire des modules photovoltaïques composés de cellules, ces cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), etc, le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. [22]

Dans ce chapitre, nous allons présenter des définitions sur l'énergie solaire, Puis nous détaillerons le principe de fonctionnement d'une cellule, module et panneau photovoltaïques ainsi que leurs constituants. Enfin, nous présenterons l'ensemble des éléments d'une installation photovoltaïque incluant les convertisseurs statiques.

II - 2 Effet photovoltaïque :

II-2-1 définition :

Il existe deux technologies qui permettent d'exploiter directement l'énergie solaire:

a - Le solaire thermique (pour le chauffage de l'eau chaude sanitaire)

b - Le solaire photovoltaïque (pour la production d'électricité) :

Le solaire photovoltaïque exploite l'effet photoélectrique, c'est-à-dire le phénomène de transmission de l'énergie issue des photons de la lumière solaire aux électrons liés à la matière constituante du panneau photovoltaïque.

Le résultat de cette conversion lumineuse est un courant électrique directement exploitable, on retrouve des installations photovoltaïques aussi bien à l'échelle de grandes centrales, profitant d'une énergie lumineuse stratégique et réinjectant l'électricité produite

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

sur le réseau, qu'à l'échelle plus locale du particulier, avec consommation directe ou non de l'électricité. [23]

Le rayonnement solaire est constitué de photons transportant chacun une énergie **E_{ph}** qui répond, elle-même, à la relation suivante :

$$E_{ph} = h * c / \lambda \dots\dots\dots (2.1)$$

Où

E_{ph} : représente la quantité d'énergie.

λ : la longueur d'onde.

h : la constante de Planck.

C : la vitesse de la lumière.

II-2-2 Principe de la génération photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, son fonctionnement est basé sur les propriétés des matériaux semi-conducteurs, la cellule photovoltaïque permet la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Son principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque [24].

Une cellule est constituée de deux couches minces d'un semi-conducteurs, ces deux couches sont dopées différemment, pour la couche N, c'est un apport d'électrons périphériques et pour la couche P c'est un déficit d'électrons, les deux couches présentent ainsi une différence de potentiel, l'énergie des photons lumineux captés par les électrons périphériques (couche N), leur permet de franchir la barrière de potentiel et d'engendrer un courant électrique continu. Pour effectuer la collecte de ce courant, des électrodes sont déposées par sérigraphie sur les deux couches de semi-conducteur (figure 2.1).

L'électrode supérieure est une grille permettant le passage des rayons lumineux, une couche antireflet est ensuite déposée sur cette électrode afin d'accroître la quantité de lumière absorbée [25].

Chapitre II
Notions sur le Système photovoltaïque

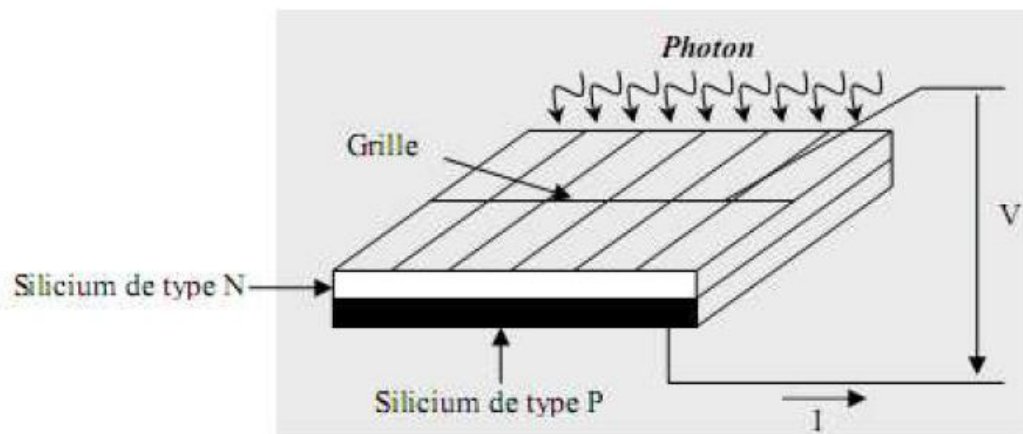


Figure 2.1 : Schéma d'une cellule élémentaire.

Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium, le rendement énergétique atteint industriellement est de 13 à 14 % pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly-cristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces.

Les caractéristiques ainsi obtenues sont celles d'une photodiode mais en convention Générateur (figure 2.2).

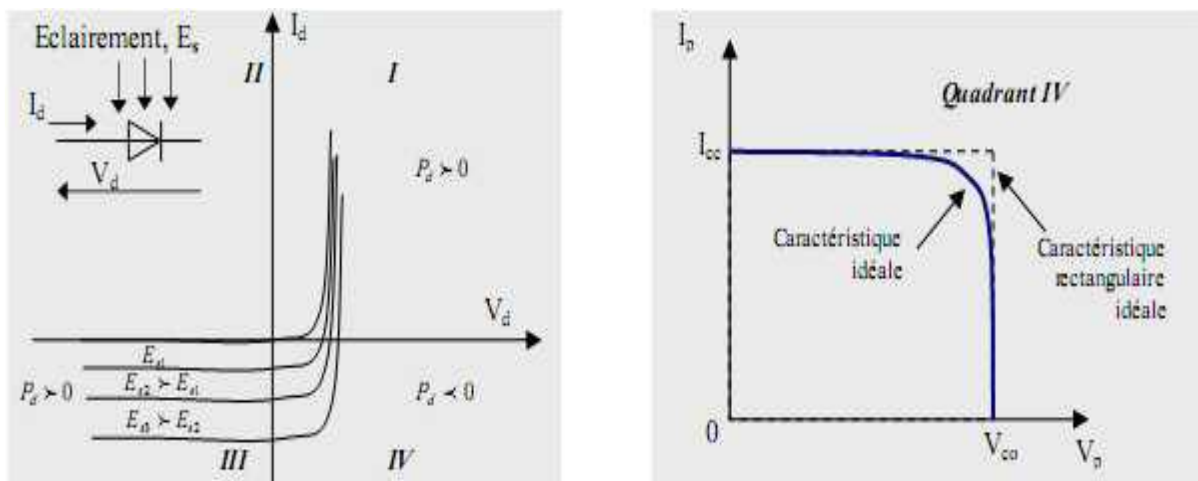


Figure 2.2 : à gauche caractéristique d'une photodiode, à droite caractéristique d'une cellule Photovoltaïque

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

Typiquement une cellule photovoltaïque produit moins de 2watts sous approximativement 0,5 volt, une association série de plusieurs cellules donne un module et une association série et/ou parallèle de plusieurs modules permet de réaliser un panneau photovoltaïque.

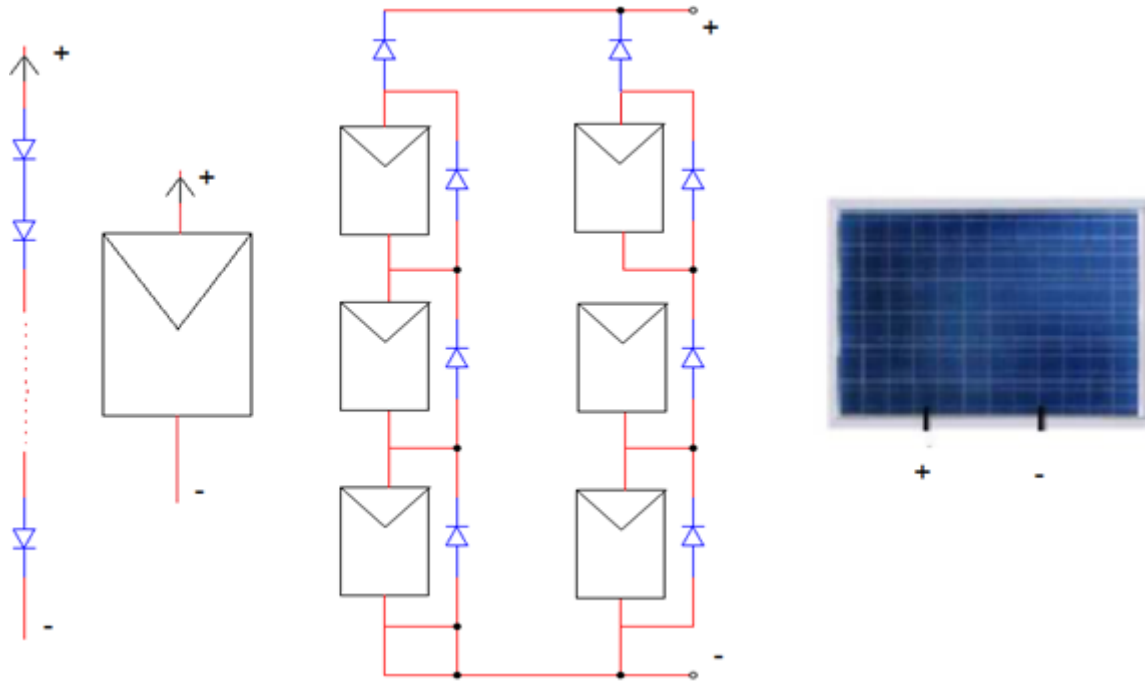


Figure 2.3 : Cellules, modules et panneau photovoltaïques

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée.

II-3 Caractéristiques de la cellule photovoltaïque :

On peut facilement représenter la cellule PV par le schéma de (la figure 1.4), où le générateur de courant modélise le courant I_{ph} généré par l'éclairement appliqué à la cellule (l'effet photovoltaïque), la diode modélise le comportement de la cellule dans l'obscurité, c'est le cas idéal de la cellule.

Chapitre II
Notions sur le Système photovoltaïque

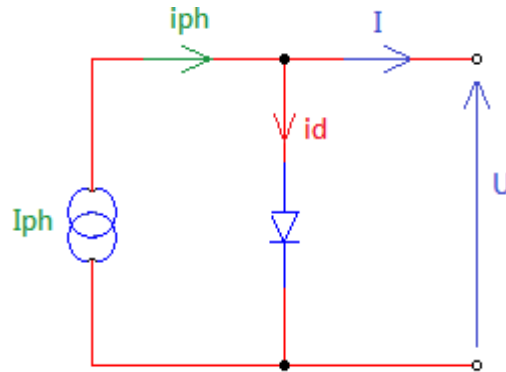


Figure 2.4 : Représentation la cellule PV idéale.

Dans ce cas le courant I est donné par :

$$I = I_{ph} - I_d \dots \dots \dots (2.2)$$

Avec I_{ph} : Courant créé par l'effet voltaïque.

I_d : Courant de la diode et exprimée par :

$$I_d = I_S \left[\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2.3)$$

Où :

I_S : courant de saturation inverse de la diode.

q : la charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19}$ c).

K : constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23}$ m2kg/s2K).

T : température de la jonction.

V : tension de sortie de la cellule.

n : le facteur d'idéalité de la diode, dans le cas idéal $n=1$.

Mais en réalité il y a des pertes au niveau de la cellule donc on ajoute au schéma de la cellule idéale deux résistances pour modéliser les pertes internes :

- Résistance série R_S : cette résistance est constituée de plusieurs composants, parmi ces composants, l'émetteur et grille supérieure (composé du doigt et la résistance de barres) dominant la résistance série globale.

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

- Résistance shunt R_{sh} : Une faible résistance de shunt provoque des pertes de puissance dans les cellules solaires en fournissant un trajet de courant alternatif pour le courant généré par la lumière. Une telle dérivation réduit la quantité de courant circulant à travers la jonction de cellules solaires et réduit la tension à partir de la cellule solaire. L'effet d'une résistance shunt est particulièrement grave à de faibles niveaux de lumière.

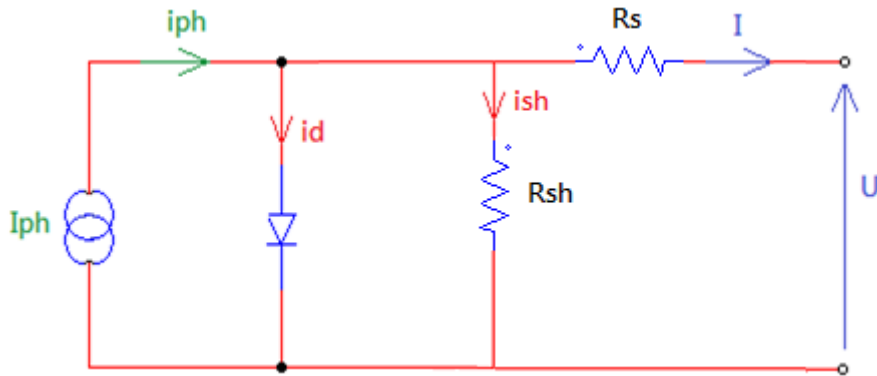


Figure 2.5 : Représentation la cellule PV réelle

La nouvelle équation modélisant la cellule sera :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \dots \dots \dots (2.4)$$

Où :

$$I_{sh} = \frac{v + I.R_s}{R_{sh}} \dots \dots \dots (2.5)$$

Et :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(q \left(\frac{V + I.R_s}{nKT} \right) \right) - 1 \right] \dots \dots \dots (2.6)$$

L'équation (2.4) sera donc :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q(V + I.R_s)}{nKT} \right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \dots \dots \dots (2.7)$$

II-3-1 Les caractéristiques électriques d'une cellule PV :

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension (I-V), ainsi qu'illustré ci-dessous :

a) La tension en circuit ouvert :

Si l'on place une photopile sous une source lumineuse constante, sans aucun récepteur à ses bornes, celle-ci va produire une tension continue d'environ 0,6V, appelée tension en circuit ouvert V_{CO} (elle varie légèrement avec la technologie et l'éclairement)[27], cette valeur correspond à la tension de coupure d'une diode, ce qui confirme le fait que l'on puisse assimiler une cellule solaire à une jonction P-N.

b) Le courant de court-circuit :

A l'inverse du cas précédent, si l'on place une photopile en court-circuit, elle va débiter un courant maximal à tension nulle. Ce courant est dit courant de court-circuit I_{cc} , le photo-courant fourni par la cellule est proportionnel à l'intensité lumineuse et à la surface du panneau mis en œuvre, ainsi plus ces deux paramètres seront élevés, plus l'intensité produite sera grande.

c) La puissance :

Le but recherché par tout utilisateur de générateur photovoltaïque est que l'énergie produite soit la plus optimale possible, la figure 2.6 représente la caractéristique courant-tension d'une photopile sous illumination ainsi qu'une courbe théorique de puissance constante (puissance = tension \times intensité).

Pour l'éclairement considéré, le point P_{max} représente le point où la puissance de la photopile est maximale. Ce point, dit puissance maximale, est associé à une tension optimale V_m et à une intensité optimale I_m .

Par ailleurs, lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (définition du rendement ci-dessous), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête (W_c).

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

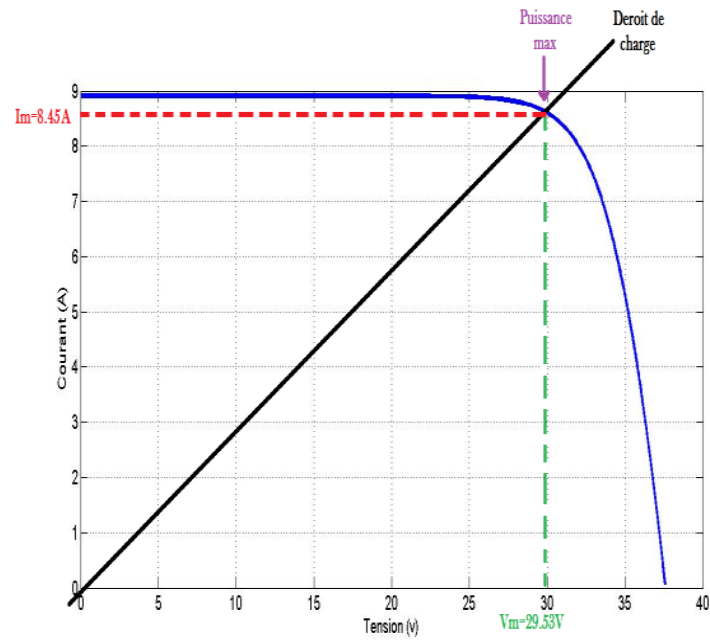


Figure 2.6 : Caractéristique courant-tension électriques d'une cellule PV

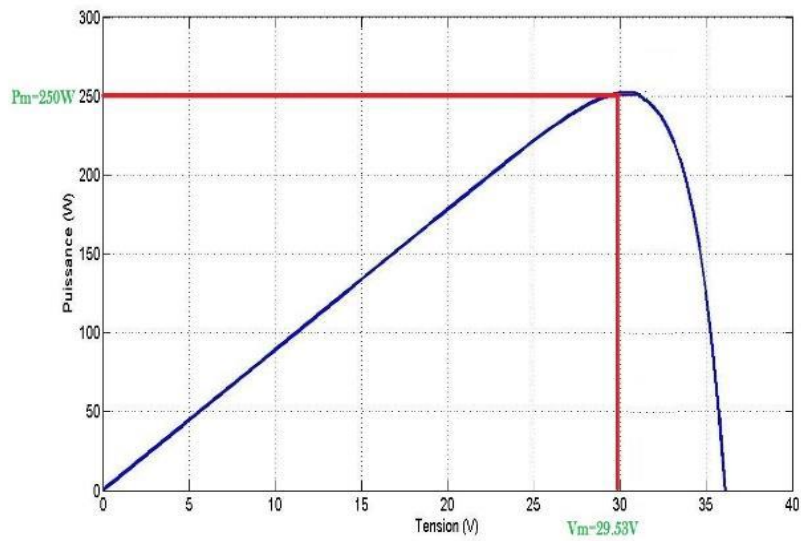


Figure 2.7 : Caractéristique puissance-tension électriques d'une cellule PV

d) Le rendement :

Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module, soit S la surface du module et G l'éclairement en W/m^2 , ce rendement a pour formule :

$$\eta = \frac{P_{\max}}{G \times S} \dots\dots\dots (2.8)$$

Il est généralement évalué dans des conditions de référence :

Sous un ensoleillement de 1000W/m², à la température de 25 °C et sous un spectre AM 1,5 (Air Masse), ces conditions normalisées sont dites « STC » pour Standard Test Conditions [27].

II-4 Les différents types de cellules solaires et leur rendement :

Lorsque nous avons présenté le fonctionnement des cellules solaires, nous avons évoqué quelques-uns des matériaux qui les constituent. On peut, à l'heure actuelle, distinguer deux grandes familles de matériaux photovoltaïques utilisés dans des installations :

- ❖ Les matériaux cristallisés, d'épaisseur de 0,15 à 0,4 mm.

- ❖ Les couches minces, d'épaisseur faible de l'ordre du micron [27], le matériau le plus répandu de nos jours est le silicium, semi-conducteur tétravalent.

Le silicium est soit cristallin, soit amorphe :

a) Le silicium monocristallin :

Les cellules qui en sont composées sont les plus performantes sur le marché :

- Elles présentent un bon rendement à fort et moyen éclairement, Toutefois, leur prix reste élevé.
- Rendement électrique des panneaux : 15% en condition STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc.
- Gamme d'éclairement : 100 à 1000 W/m².
- Usage : tous usages extérieur de forte et moyenne puissance (télécoms, balisage, relais, habitat) [27].

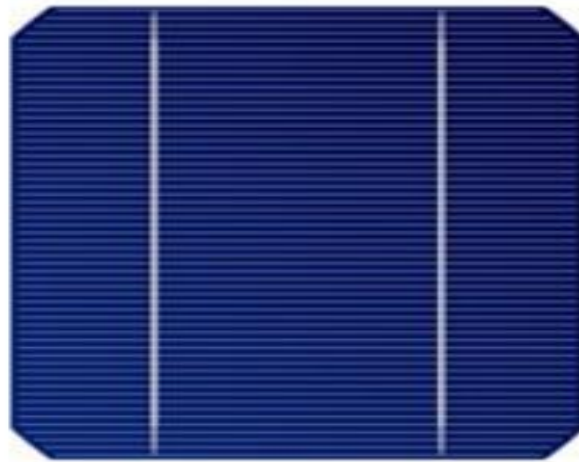


Figure 2.8 : Cellule photovoltaïque de type silicium monocristallin

b) Le silicium multi cristallin (poly cristallin) :

Il est le plus répandu actuellement et les caractéristiques électriques des cellules multi cristallines sont similaires aux monocristallines, toutefois il est un peu moins performant, essentiellement aux éclairagements modérés, et également moins onéreux du fait d'une fabrication moins complexe.

- Rendement électrique des panneaux : 12 à 14% dans les conditions STC.
- Puissance des panneaux : 5 à 150 Wc.
- Gamme d'éclairement : 200 à 1000 W/m².
- Usage : même usage que le silicium monocristallin [7].

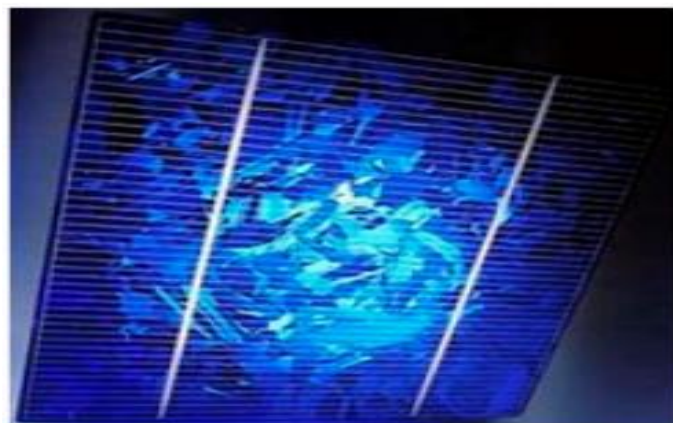


Figure 2.9 : Cellule photovoltaïque de type silicium multi cristallin

c) Le silicium amorphe :

Malgré un gap optique plus élevé que le silicium cristallin et donc une tension plus forte, son courant est nettement plus faible à cause de sa moins bonne collecte et de sa faible épaisseur, il est donc moins puissant que le silicium cristallin, par contre, en couche très mince, il répond à tous les éclairagements, extérieur et intérieur.

Sa technologie de fabrication est moins onéreuse et permet de réaliser de petits formats de panneaux.

- Rendement électrique des panneaux : 5 à 7% dans les conditions STC (jusqu'à 9 % pour les multi-jonctions).
- Puissance des panneaux extérieurs : 0,5 à 60 Wc.
- Gamme d'éclairément : de 200 à 1000 W/m².
- Usage : électronique professionnelle et grand public (montres, calculatrices), électronique de faible consommation en extérieur [27].

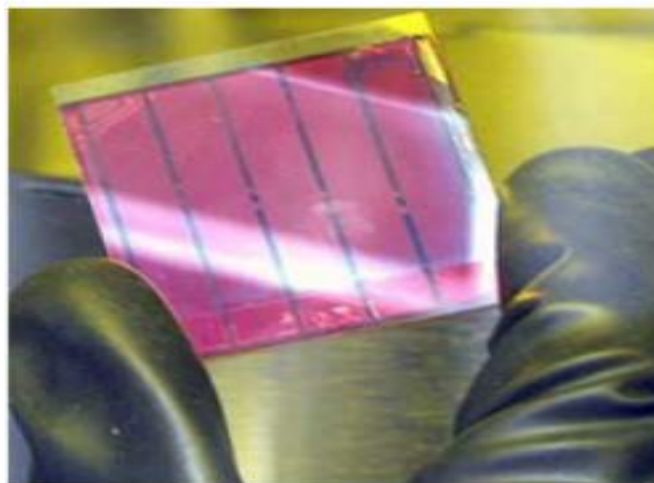


Figure 2.10 : Cellule photovoltaïque de type silicium amorphe

d) Une quatrième technologie :

Avec le progrès technologique, émergent des solutions à base de cuivre indium / gallium / sélénium (CIS), on voit de plus en plus de panneaux équipés de cellules CIS, ces cellules ont la particularité de transformer en électricité un spectre lumineux plus large que celui des cellules en silicium.

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

Cette caractéristique rend ces panneaux beaucoup plus performants à l'ombre ou par temps couvert, à puissance équivalente, l'énergie captée sur une journée est supérieure à celle d'un panneau en silicium, mais cette technologie est essentiellement utilisée à des fins industrielles ou adaptée sur des véhicules nomades car sa principale caractéristique est son efficacité incomparable aux autres technologies existantes en zone d'ombre.

En matière de rendement, ces panneaux sont environ 12% supérieurs par rapport aux panneaux en silicium amorphe.

La figure 2.11 représente les caractéristiques courant-tension de deux cellules photovoltaïques, l'une au silicium monocristallin, l'autre au silicium amorphe.

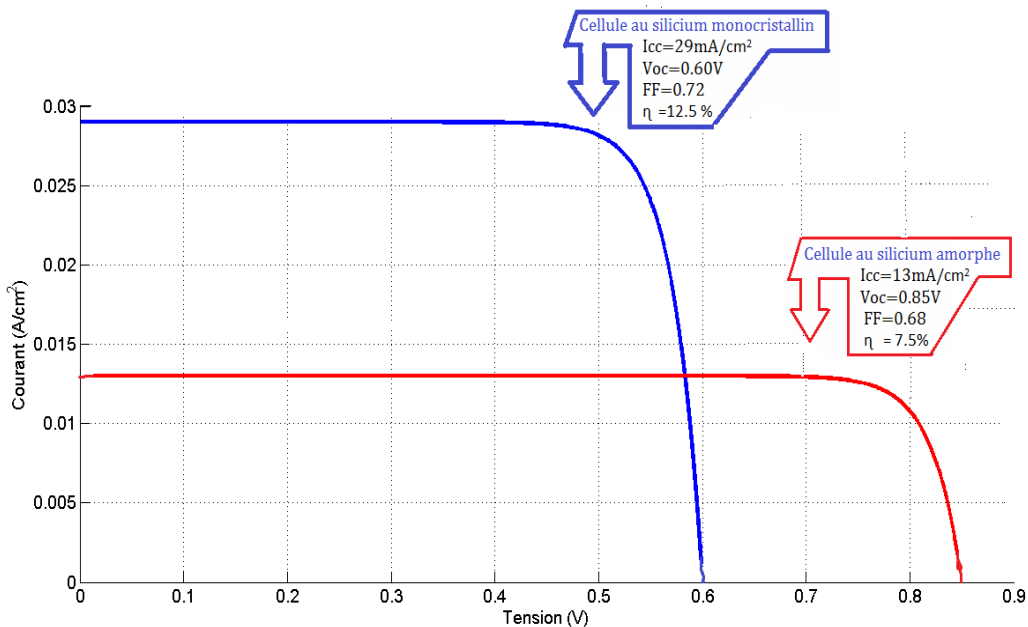


Figure 2.11 : Caractéristiques courant-tension comparées d'une cellule au silicium amorphe et d'une autre au silicium cristallin (sous 1000 W/m²)

II-5 Convertisseur de puissance de système photovoltaïque :

L'utilisation des convertisseurs DC/DC permet le contrôle de la puissance électrique dans les circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Par convention, des systèmes de conversion photovoltaïques reliés au réseau se composent de convertisseur DC-DC et d'onduleur, le convertisseur DC-DC est contrôlé pour la poursuite du point de puissance maximum du panneau photovoltaïque et l'onduleur est contrôlé pour produire le courant de telle manière que le courant de système ait une faible déformation totale d'harmonique et il ait en phase avec la tension de réseau.

II-5-1 Convertisseur DC/DC :

Pour la conversion de puissance, il est essentiel que le rendement soit maintenu élevé pour éviter la dissipation de la puissance et pour éviter les échauffements excessifs dans les composants électroniques, pour cette raison toute la conversion de puissance échangée doit être réalisée autour des composants de stockage d'énergie (inductance et condensateurs) et les commutateurs, les commutateurs de puissance utilisés dépendent du niveau de la puissance à convertir ou à commander, les MOSFETS (transistors à effet de champ d'oxyde de métal) sont habituellement utilisés à la puissance relativement basse (quelques kW) et les IGBTs (transistors bipolaires à gâchette isolée) à des puissances plus élevées. Les thyristors ont été généralement utilisés et acceptés dans les plus hauts niveaux de puissance [29] .

D'un point de vue circuit, l'hacheur apparaît comme un quadripôle (figure 2.12), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau, on peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [30].

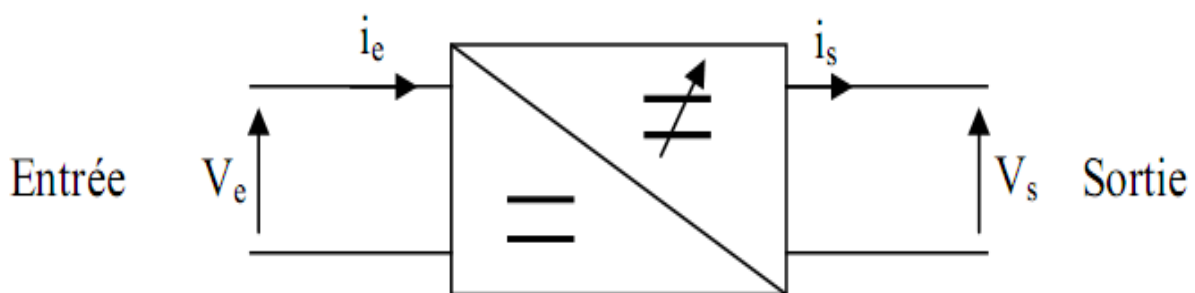


Figure 2.12 : Schéma d'un quadripôle électrique.

L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductances et de commutateurs, dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

Le commutateur est un dispositif semi-conducteur en mode (bloqué – saturé) :

Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle.

Si le dispositif est dans l'état saturé, la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [30].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f_s

Avec :

un temps de fermeture $T_f = d \cdot T_s$

un temps d'ouverture $T_o = (1-d) \cdot T_s$

Où :

- T_s : est la période de commutation qui est égale à $1/f_s$
- d : Le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0,1]$) (la figure 2.13)

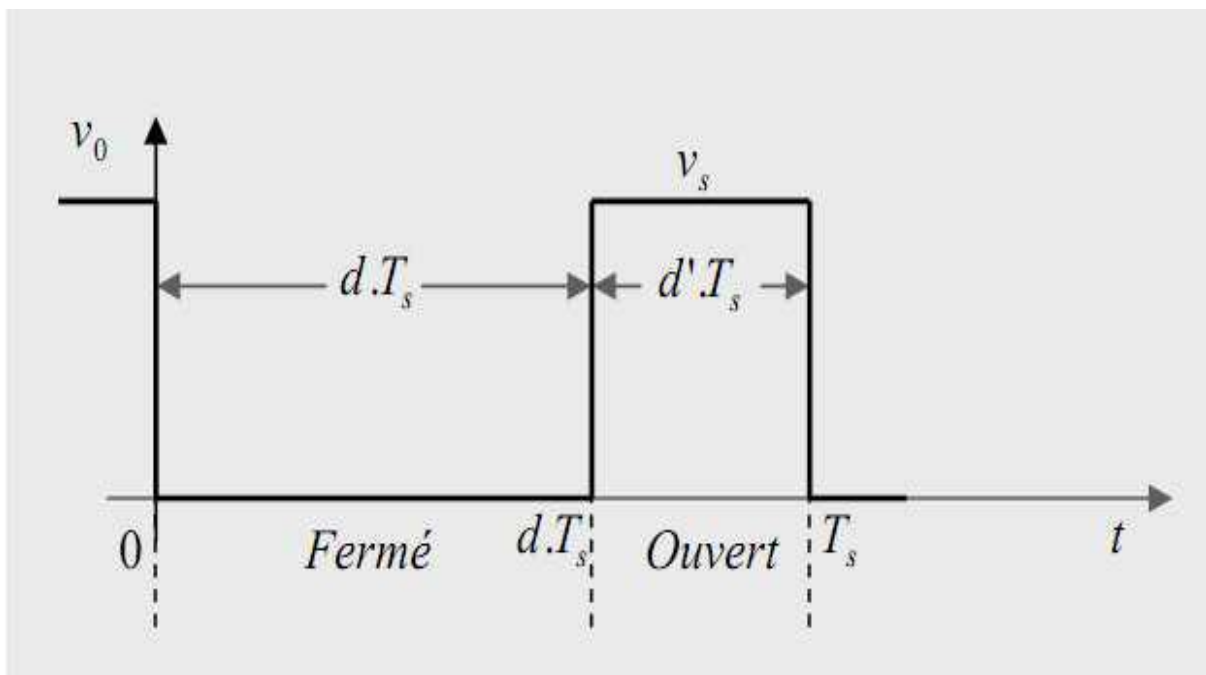


Figure 2.13 : Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

II-5-2 les Types de convertisseurs DC/DC :

Il y a différents types de convertisseurs DC/DC, une première distinction est à faire entre le convertisseur à isolement galvanique entre la sortie et l'entrée, et le convertisseur qui présente une borne commune entre l'entrée et la sortie (Notez que dans le cas de l'isolement galvanique le rendement se verra affecté d'au moins 10%, ce qui est inadmissible dans le cas par exemple des applications en énergie photovoltaïque).

Dans les convertisseurs à stockage d'énergie, on distingue :

- Les élévateurs (BOOST) dans lesquels $V_S > V_e$.
 - Les abaisseurs (BUCK) dans lesquels $V_S < V_e$.
 - Il y a aussi un type (BUCK-BOOST) : mélange entre les deux précédents.
- ❖ Dans notre système, s'intéresse au convertisseur élévateur « Boost » et on donne ici son étude avec un peu de détail.

A) Hacheur parallèle (Boost) :

Le hacheur Boost est aussi appelé hacheur survolteur, ce montage permet de fournir une tension moyenne U_{d0} à partir d'une source de tension continue $U > U_{d0}$, le montage étudié est donnée à (la figure 2.14).

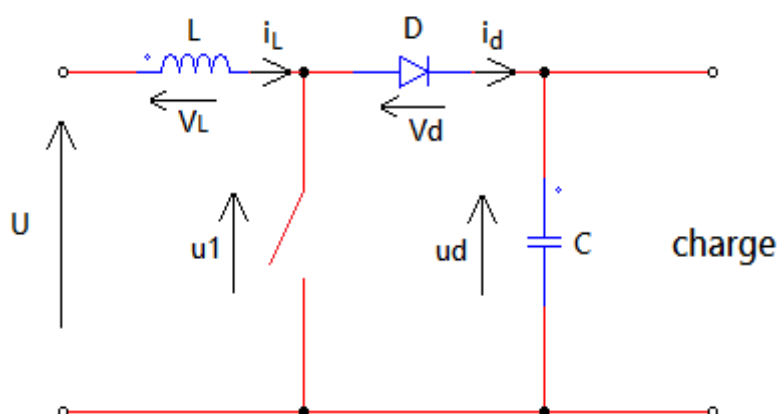


Figure 2.14 : Hacheur parallèle.

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

On distingue deux phases de fonctionnement [30] :

1. Lorsque l'interrupteur I est fermé, la diode est polarisée en inverse $V_D = -u_D$,
La charge est donc isolée de la source. La source fournit de l'énergie à l'inductance L.
2. Lorsque l'interrupteur I est ouvert, l'étage de sortie (C+charge) reçoit de l'énergie de la source et de l'inductance L.

Pour l'analyse en régime permanent présentée ici, le condensateur de filtrage C a une valeur suffisamment élevée pour que l'on puisse considérer la tension disponible en sortie constante : $u_D(t) = U_{d0}$

Enfin on distingue deux modes de fonctionnement selon le courant dans l'inductance L, $i_L(t)$ est interrompu ou non.

a) Fonctionnement :

a - 1) Fonctionnement à courant de source ininterrompu :

- pour $0 < t < \alpha T$ l'interrupteur I est fermé et l'intensité $i_L(t)$ croît linéairement :

$$U = L \frac{di_L}{dt} + U_{d0} \text{ donc } i_L(t) = \frac{U - U_{d0}}{L} (t - \alpha T) + i_L(\alpha T) \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\text{Avec } i_L(\alpha T) = \frac{U}{L} \alpha T + i_L(0) \dots\dots\dots (2.10)$$

Et $U < U_{d0}$ car $i_L(t)$ doit décroître.

On a :

$$u_L = U_{d0}$$

$$i_d = i_L$$

$$v_L = U - U_{d0}$$

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

On déduit les caractéristiques de la figure 2.15 :

On détermine facilement la relation liant U et U_{d0} .

$$\text{On a : } U = v_L + u_i$$

Donc en moyenne sur une période, compte tenu du fait que la valeur de la moyenne $v_L(t)$ est nulle, on obtient :

$$U = U_{I0} = (1 - \alpha) \frac{T}{T} U_{d0} = (1 - \alpha) U_{d0}$$

$$\text{Donc } \frac{U_{d0}}{U} = \frac{1}{(1-\alpha)}$$

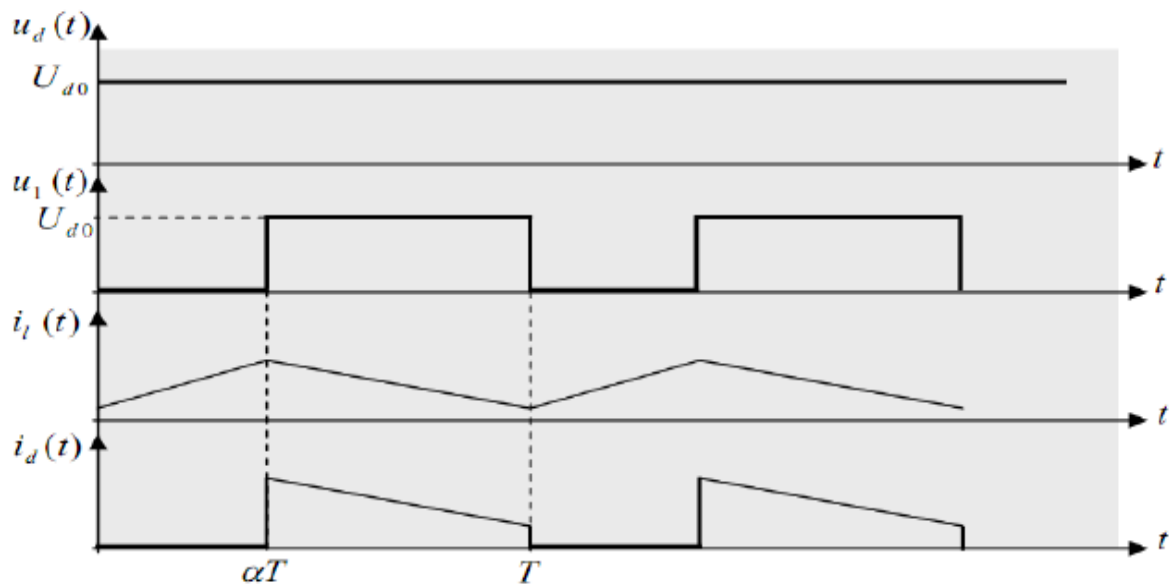


Figure 2.15 : Hacheur parallèle. Fonctionnement à courant de source ininterrompu.

a - 2) Limites entre le fonctionnement interrompu et le fonctionnement ininterrompu :

La forme des courant et tension $i_L(t)$ et $v_L(t)$ est donnée sur la figure 2.16.

La valeur moyenne du courant $i_L(t)$ s'écrit :

$$I_{L0} = \frac{I_{LM}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U}{L} \alpha T \quad (\text{car } i_L(0) = 0) \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Donc la valeur moyenne du courant disponible en sortie I_{d0} s'écrit :

$$I_{d0} = (1 - \alpha)I_{L0} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U}{L} \alpha T (1 - \alpha) = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{d0}}{L} \alpha T (1 - \alpha) \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

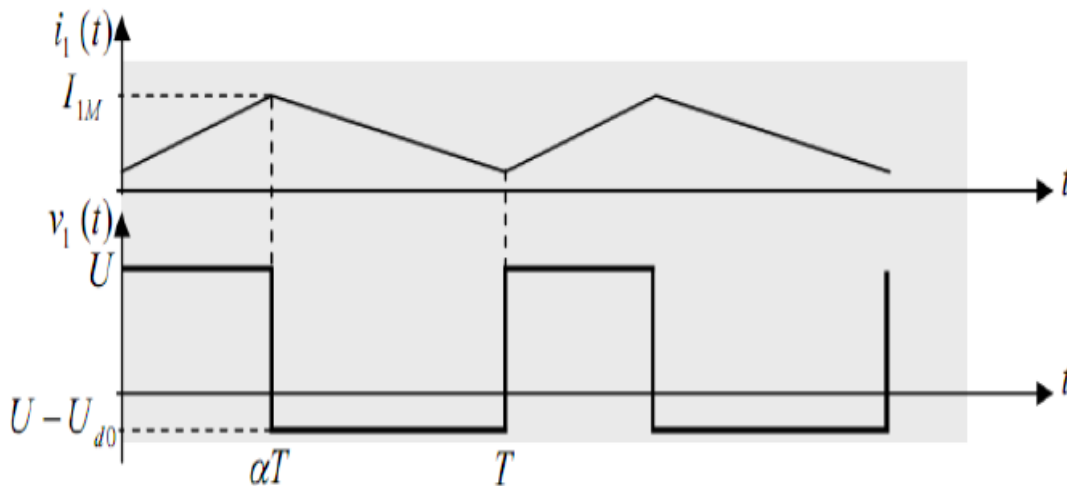


Figure 2.16 : Hacheur parallèle Limite du fonctionnement à courant de source ininterrompu

Les études faites sur le hacheur Boost, montrent que le hacheur Boost a un rendement élevé pour une grande partie du rapport cyclique [30], il est le plus utilisé dans les systèmes photovoltaïques car la puissance maximale que peut délivrer une source en l'occurrence du *GPV* est :

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

B) Dimensionnement et choix des composants *L* et *C* du hacheur Boost : [34]

La détermination des valeurs réelles de ces composants nécessite une étude largement étendue sur les paramètres imposés par le panneau solaire TENESOL TE505 d'une part, et d'autre part le dimensionnement du hacheur n'a pas été fixé par le cahier de charge donc on a choisi de faire une large étude selon la valeur de la tension de sortie hacheur (V_s).

Cette tension est généralement une sortie batterie, donc elle sera un multiple de 12V comme la plupart des batteries à grande autonomie sont de type 12V, sachant que :

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

- $V_{pv_{min}} = 10V$ avec $V_{pv_{nom}} = 12V$ (en charge)

- $P_{max} = 55W$ dans les conditions standards :

ensoleillement $G = 1000W/m^2$ à une température $T = 25^\circ C$

$$- C \geq \frac{\alpha_{max} \times P_{mac}}{f \times \Delta V_s \times V_s} = \frac{\alpha_{max} \times P_{mac}}{f \times 5\% \times V_s^2} \quad \text{et} \quad L \geq \frac{V_s}{4 \times f \times \Delta I_L}$$

$$\text{Avec } \alpha_{max} = 1 - \frac{V_{pv_{min}}}{V_s} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \Delta V_s \leq 5\% V_s \\ \Delta I_L \leq 0.1A \\ f = 5KHz \end{cases}$$

Le tableau ci-dessous expose les valeurs calculées et normalisées pour les deux éléments passifs du hacheur dans la gamme de tension de sortie $V_s = [24 \dots 120]$

$V_s[V]$	24	36	48	60	72	84	96	108	120
α_{max}	0,583	0,722	0,791	0,833	0,861	0,881	0,895	0,907	0,916
$C_{cal}[\mu F]$	222,8	122,6	75,59	50,26	36,54	27,46	21,38	17,11	14
$C_{norm}[\mu F]$	330	220	100	100	47	33	22	22	22
$L_{cal}[mH]$	12	18	24	30	36	42	48	54	60

Tableau 2.1 : Valeurs critiques minimaux calculées et normalisées des composants de l'hacheur

❖ **Constatation :**

Comme constatation sur le tableau de mesure :

- Il est bien remarquable que lorsque la tension de sortie voulue augmente les éléments passifs changent de valeurs.

Chapitre II

Notions sur le Système photovoltaïque

- Le changement de la valeur de capacité est inversement proportionnel au changement de la valeur de tension.
- Le changement de la valeur de l'inductance est proportionnel au changement de la valeur tension.

II-6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur les différents moyens de production d'énergie électrique, et nous nous sommes intéressés à la production photovoltaïque qui est à base d'un semi-conducteur (silicium), assurant la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, par la suite nous avons exposé brièvement quelques topologies de convertisseur à découpage (Boost), utilisées fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges dans cette travaille, le Boost est le meilleur choix car l'élévateur du gain et le rendement ainsi la simplicité du circuit.

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

III.1 Introduction : [13]

Les filtres actifs de puissance ont été étudiés pour compenser les harmoniques dans les systèmes de puissance industriels depuis le principe de compensation de base proposé en 1971 par Sasaki et Machida, Cependant, au début de l'année 1970, le domaine de filtres actifs de puissance ne connaissait presque pas de progrès au-delà du stade de test de laboratoire, parce que la technologie de ces circuits était très pauvre pour l'implantation pratique du principe de compensation.

Dans les années 80, un remarquable progrès des dispositifs de commutation rapide comme les transistors de puissance et les thyristors à induction statique a aiguillonné le centre d'intérêt dans l'étude des filtres actifs pour la compensation des harmoniques .

En plus de la technologie de commande (MLI) [Modulation de largeur d'impulsion] sophistiquée, le développement de l'étude théorique a rendu possible leur mise au stade de test pratique.

En 1990, le filtre actif (MLI) a connu un regain d'intérêt, Ses performances de compensation harmonique sont supérieures à celles du filtre passif LC classique.

III.2 Les filtres actifs :

III.2.1 principe :

Les filtres actifs sont des convertisseurs de puissance, agissant comme source de courants ou de tensions harmoniques, ces derniers sont injectés en série ou en parallèle sur les réseaux électriques en opposition de phase par rapport aux perturbations existantes, Cela permet d'éliminer les harmoniques polluants et d'obtenir le retour à la tension ou au courant fondamental.

Chapitre III Modélisation et commande du filtre actif parallèle

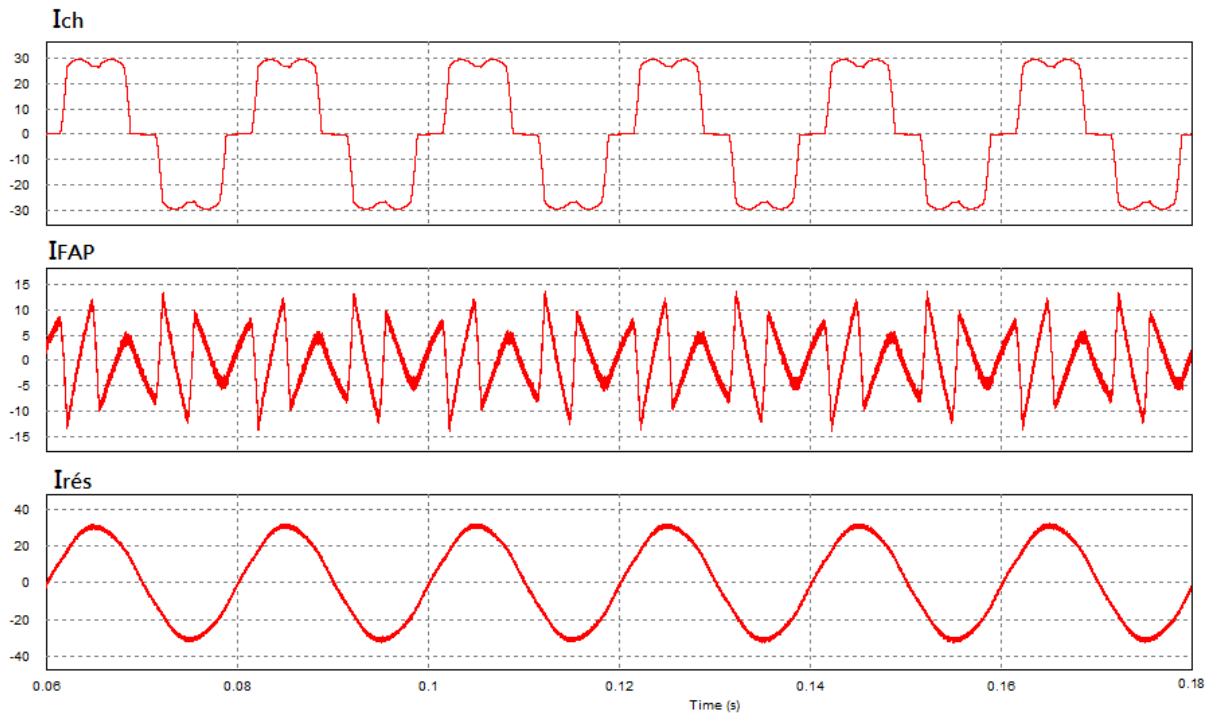


Figure III.1 : Le retour à la forme sinusoïdale du courant d'alimentation

Equation de courant :

$$i_{ch} + i_{FA} = i_{rés} \quad \dots\dots\dots (III.1)$$

III.2.2 Structure générale d'un filtre actif :

Un filtre actif est composé deux parties comme le montre la figure 3.2 la partie puissance est constituée d'un circuit de stockage d'énergie, d'un onduleur destiné à répartir le courant dans les différentes phases et un filtre de sortie destiné à réaliser l'interface entre le réseau et l'onduleur, La partie contrôle tient compte du circuit de stockage d'énergie, du filtre de sortie et des harmoniques sur le réseau et permet d'actionner le circuit onduleur. [7]

Chapitre III Modélisation et commande du filtre actif parallèle

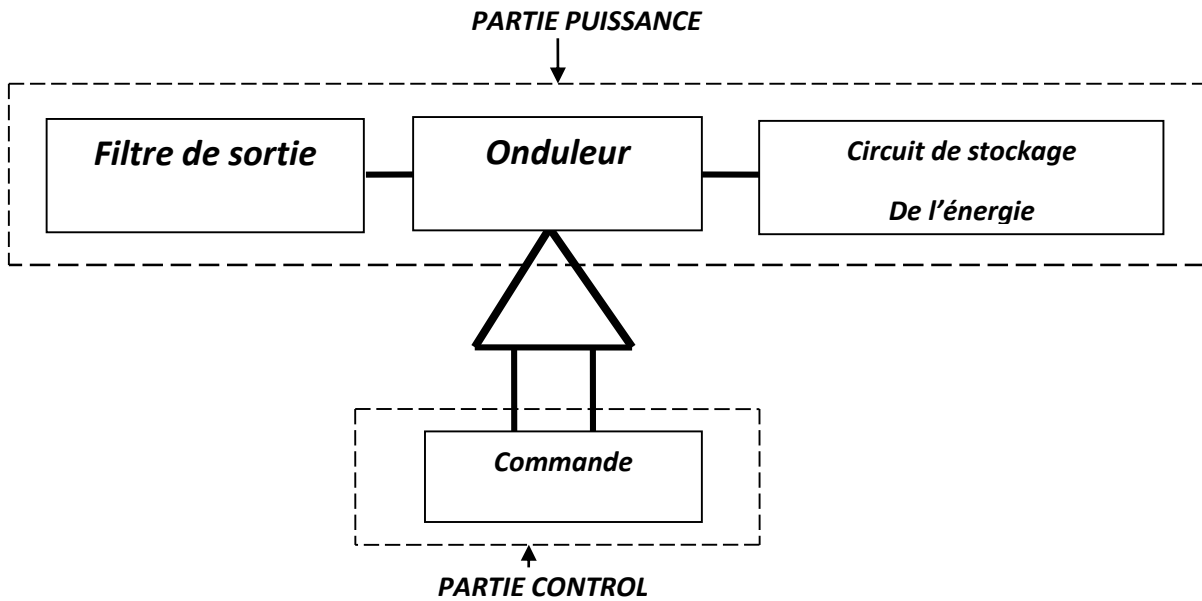


Figure III.2 : Structure générale d'un filtre actif

III.2.3 principales combinaisons possibles :

Les filtres actifs sont connectés en série ou en parallèle suivant qu'ils sont conçus respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, a cela on distingue trois types principales :

- a- Filtre actif parallèle ;
- b- Filtre actif série ;
- c- Filtre associant les deux (parallèle et série).

a- Le filtre actif parallèle :

Le filtre actif connecte en parallèle sur le réseau, comme le montre (La figure I.11) est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci, Le courant coté réseau est alors sinusoïdal, Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (FAP) consiste à empêcher les courants perturbateurs, produits par des charges

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. [3]

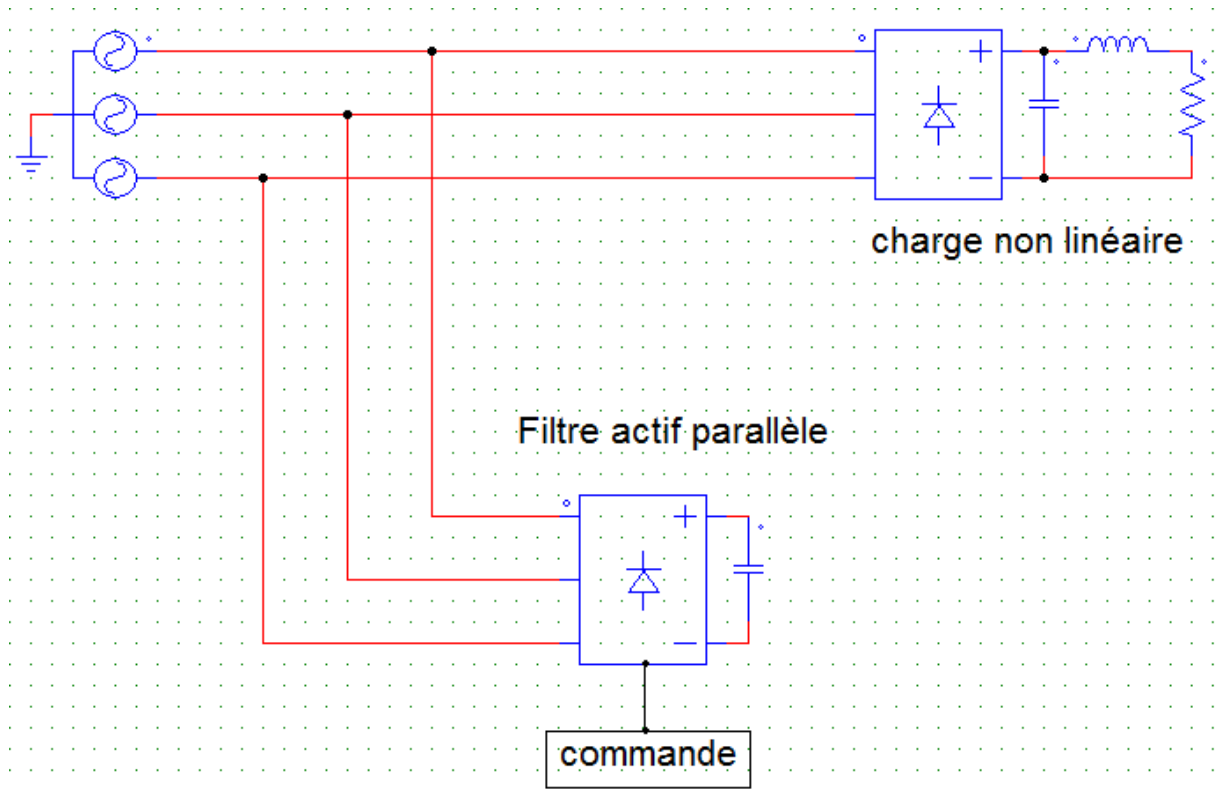


Figure III.3 : Filtre actif parallèle

b- Le filtre actif série :

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre (La figure I.12) comme un point de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau, ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale. [3]

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

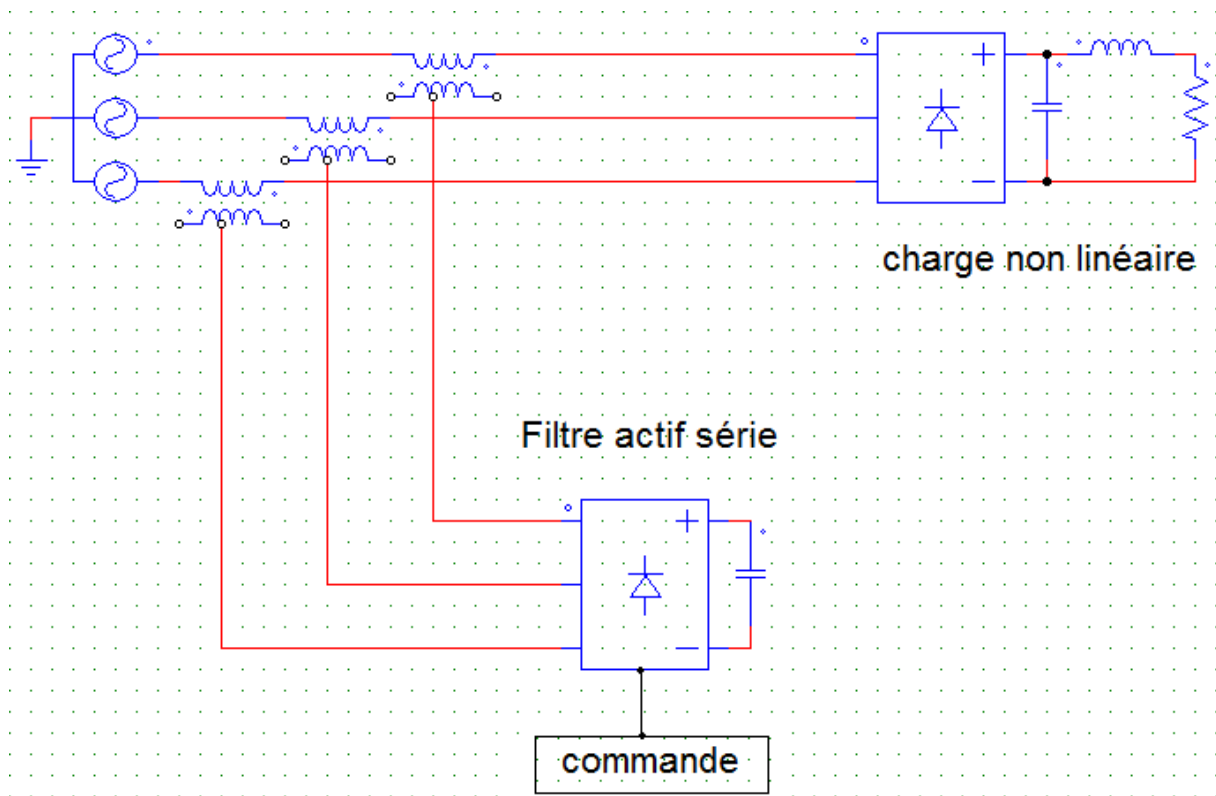


Figure III.4 : Filtre actif série

c- Le filtre actif série parallèle :

La combinaison parallèle série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci. [14]

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

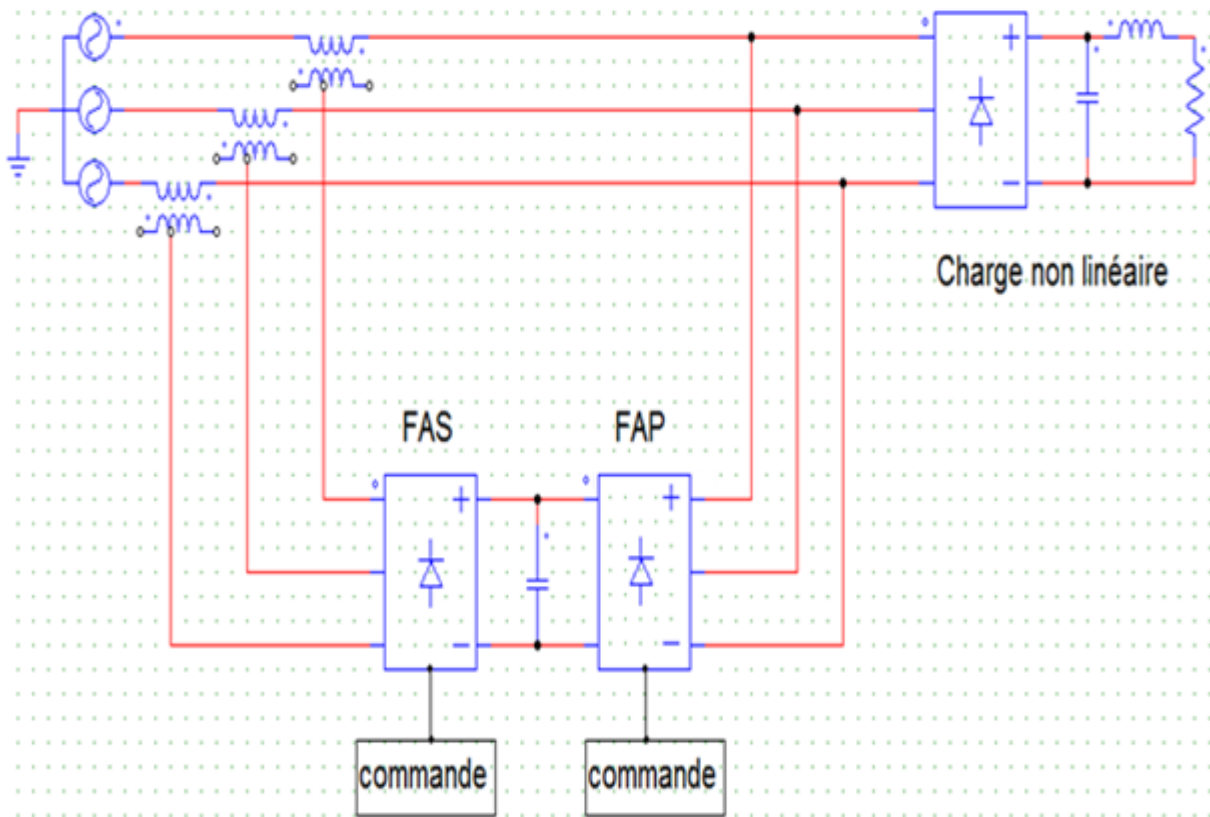


Figure III.5 : Filtre actif série parallèle (UPQC)

III.3 Les filtres hybrides :

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif, l'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques, le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge et du réseau, De plus, du point de vue économique, le filtre hybride permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs, on distingue alors plusieurs types d'association de filtres, actifs et passifs, par exemple :

- Filtre actif série avec la source / filtre passif parallèle avec la charge ;
- Filtre actif et filtre passif en parallèle avec la charge.

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

a- Filtre actif en série avec la source / Filtre passif en parallèle avec la charge :

Les filtres passifs sont accordés aux fréquences des harmoniques fortement présents sur le réseau, ils absorbent une grande partie des courants harmoniques créés par la charge non linéaire. Le filtre actif fournit une tension qui s'oppose à la tension harmonique venant du côté source et à la chute de tension harmonique due à la charge non linéaire de façon à contrôler la tension harmonique aux bornes de la charge. [15]

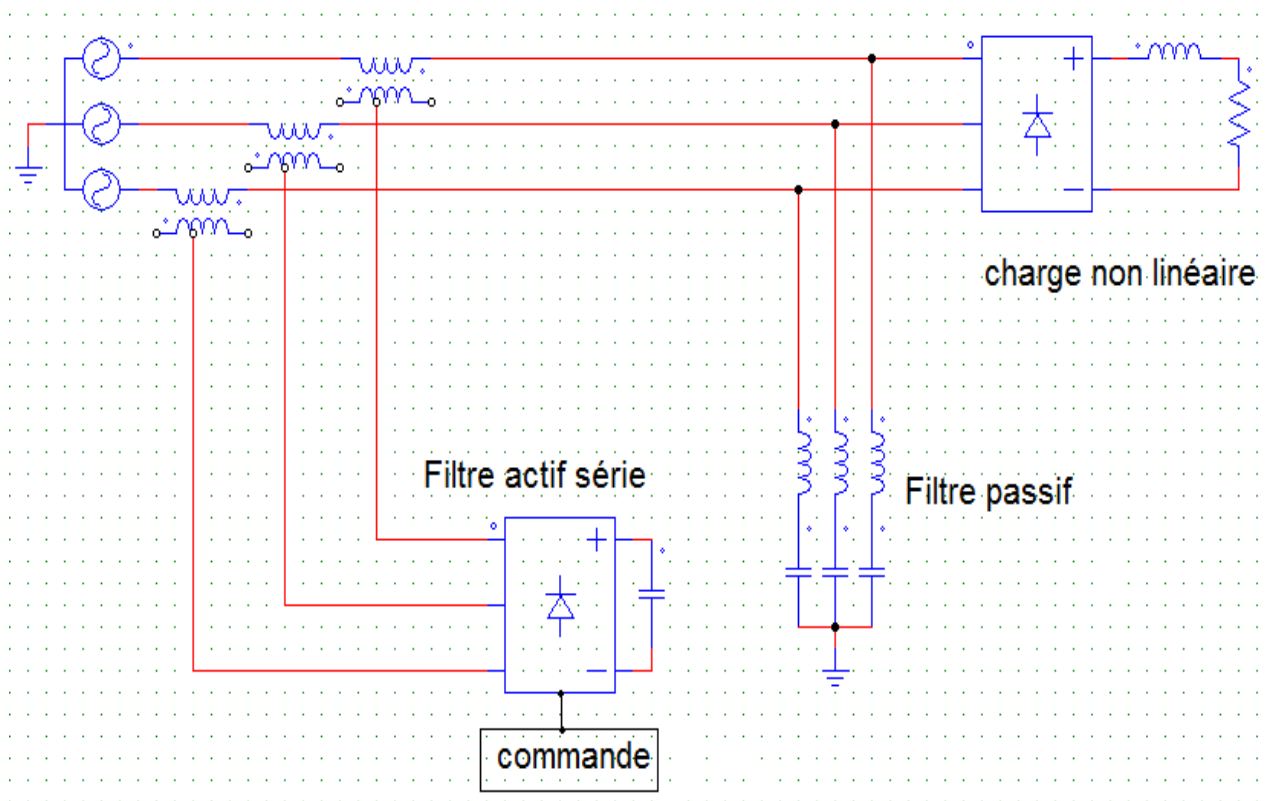


Figure III.6 : Filtre combiné actif en série avec la source / passif en parallèle avec la charge

b- Filtre actif et filtre passif en parallèle avec la charge :

Dans ce cas les éléments du filtre passif sont accordés sur une fréquence élevée afin de compenser les courants harmoniques de rang élevé tandis que le filtre actif s'occupe des harmoniques de basses fréquences [16,17], ce type de filtre a déjà été

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

appliqué à la compensation des courants harmoniques émis par un cyclo convertisseur de forte puissance. [3]

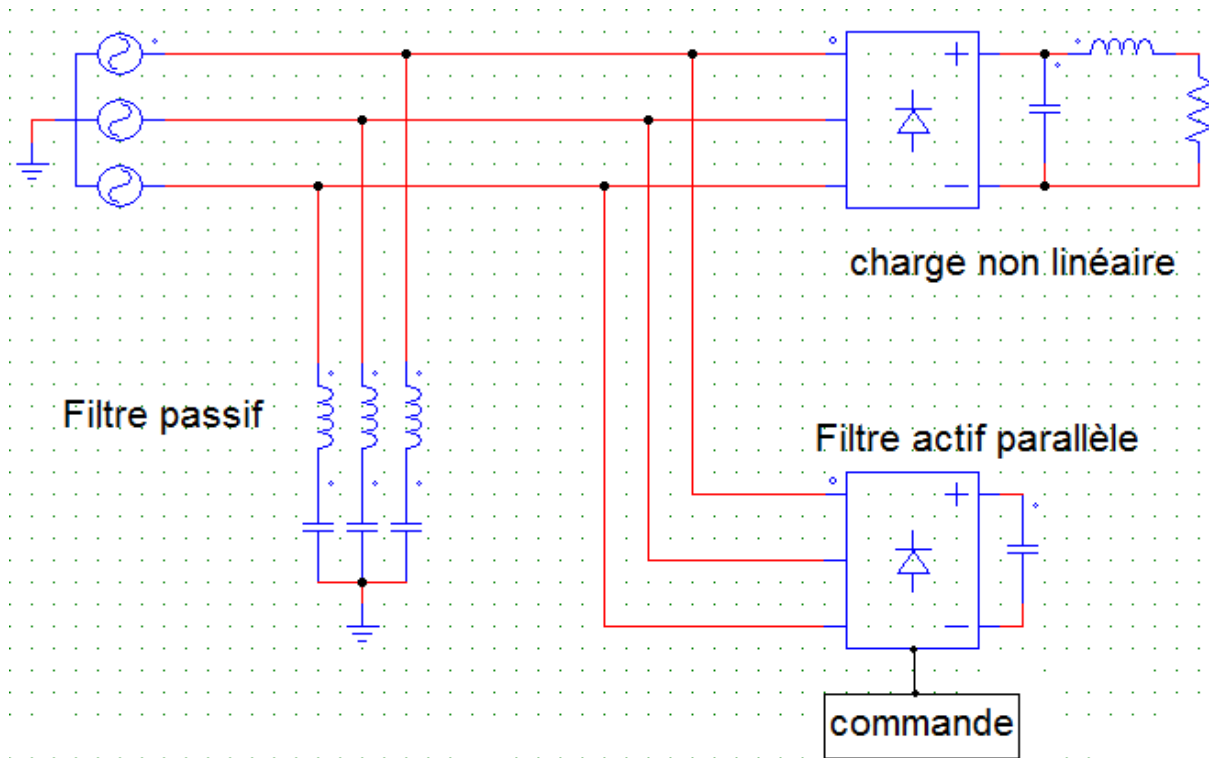


Figure III.7 : Filtre combiné actif et passif en parallèle avec la charge

III.4 Structure général d'un filtre actif parallèle :

Un filtre actif parallèle est composé principalement des deux blocs suivants :

- La partie puissante.
- La partie contrôle-commande.

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

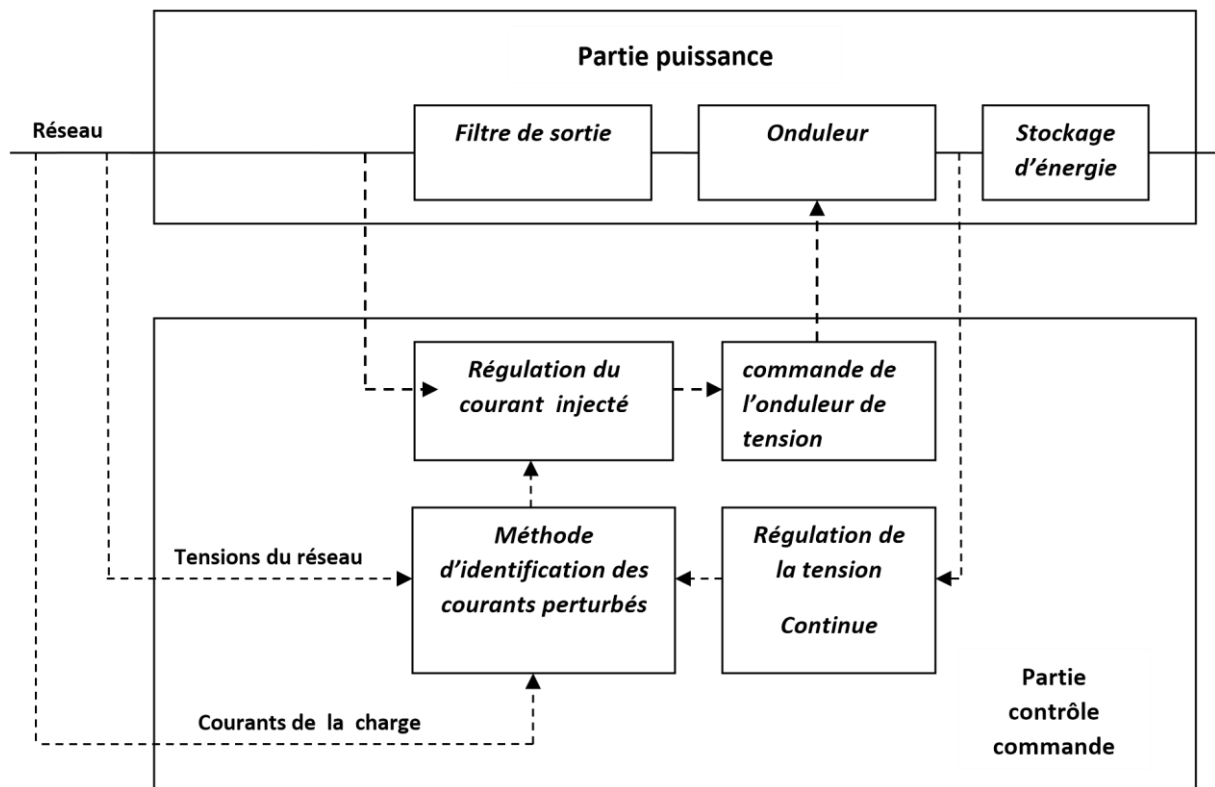


Figure III.8 : Structure général d'un filtre actif parallèle

III.4.1 La partie puissance : [18]

Est constituée :

- D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance , commandé à l'amorçage et au blocage (GTO,IGTB,..... etc.) avec des diodes en antiparallèle.
- D'un circuit de stockage d'énergie .
- D'un filtre de sortie.

A) Onduleur de tension :

L'onduleur triphasé à structure de tension se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'interrupteurs unidirectionnels (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle.

Cet onduleur de tension est représenté par (la figure 3.4)

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

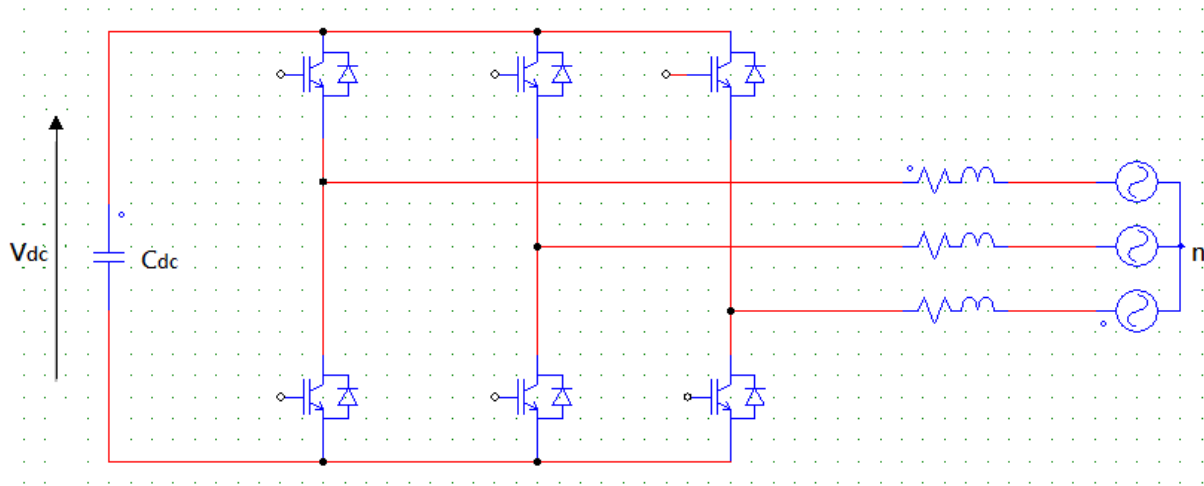


Figure III.9 : Onduleur de tension triphasé

A.1) Configurations :

Il y a deux configurations possibles pour l'onduleur de tension :

- L'onduleur à neutre raccordé
- L'onduleur sans neutre raccordé

a.1) L'onduleur à neutre raccordé :

Il consiste à connecter le neutre de la charge à un neutre créé au point milieu du bus continu de l'onduleur, Cette connexion autorise la circulation de courants homopolaires et permet de contrôler de façon découplée les tensions appliquées aux trois phases de la charge tout comme si elles représentaient trois systèmes monophasés, On utilisera donc cette configuration dans notre cas pour le filtrage des harmoniques.

a.2) L'onduleur sans neutre raccordé :

En cas de charge déséquilibrée, l'onduleur sans neutre raccordé n'est pas capable de fournir un courant homolaire (la somme de courants de ligne doit être forcément nulle). Ainsi, si la charge est déséquilibrée et couplée en étoile, les tensions de phase seront aussi déséquilibrées.

Chapitre III
Modélisation et commande du filtre actif parallèle

A.2) Équations de base :

L'état des interrupteurs supposés parfaits ,peuvent être défini par trois grandeurs logiques

$$s_i = (i = a, b, c) \text{ avec :}$$

$$s_i = 1 \text{ L'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.}$$

$$s_i = 0 \text{ L'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.}$$

En tenant compte du point o (neutre de l'onduleur),on peut exprimer les tensions v_{io} en fonction des signaux de commande.

On a:

$$v_{io} = E(s_i - \frac{1}{2}) \dots\dots\dots (III.2)$$

Soit n le point neutre du coté alternatif des trois tensions composées sont définies par :

$$u_{ab} = v_{an} - v_{bn}$$

$$u_{bc} = v_{bn} - v_{cn}$$

$$u_{ca} = v_{cn} - v_{an} \dots\dots\dots (III.3)$$

Avec :

$$v_{an} = \frac{1}{3}(u_{ab} - u_{ca})$$

$$v_{bn} = \frac{1}{3}(u_{bc} - u_{ab})$$

$$v_{cn} = \frac{1}{3}(u_{ca} - u_{bc}) \dots\dots\dots (III.4)$$

$$\text{En régime équilibré : } v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \dots\dots\dots (III.5)$$

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

En faisant apparaître le point o, les tensions composées peuvent d'écrire :

$$u_{ab} = v_{ao} - v_{bo}$$

$$u_{bc} = v_{bo} - v_{co}$$

$$u_{ca} = v_{co} - v_{ao} \dots\dots\dots (III.6)$$

Nous obtenons :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{an} = \frac{2}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \\ v_{bn} = -\frac{1}{3}v_{ao} + \frac{2}{3}v_{bo} - \frac{1}{3}v_{co} \\ v_{cn} = -\frac{1}{3}v_{ao} - \frac{1}{3}v_{bo} + \frac{2}{3}v_{co} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (III.7)$$

En utilisant : $v_{io} = E(s_i - \frac{1}{2})$, on aura

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{an} = \frac{2}{3}s_a \cdot E - \frac{1}{3}s_b \cdot E - \frac{1}{3}s_c \cdot E \\ v_{bn} = -\frac{1}{3}s_a \cdot E + \frac{2}{3}s_b \cdot E - \frac{1}{3}s_c \cdot E \\ v_{cn} = -\frac{1}{3}s_a \cdot E - \frac{1}{3}s_b \cdot E + \frac{2}{3}s_c \cdot E \end{array} \right\} \dots\dots\dots (III.8)$$

Sous forme matricielle, on obtient :

$$\begin{pmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{pmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{pmatrix} \dots\dots\dots (III.9)$$

B) Système de Stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie du coté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif ou photovoltaïque (les panneaux solaires) qui joue le rôle d'une source de tension continu Vdc .

Le choix des paramètres du système de stockage se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle.

Le système de stockage d'énergie utilisé dans notre travail est le photovoltaïque.

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

C) Filtre de Sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, Un filtre de sortie du premier ordre est le plus utilisé, Il est composé d'une inductance L_f comportant une résistance interne R_f , Une valeur relativement faible de inductance L_f pour avoir une bonne dynamique du filtre actif parallèle (FAP).

III.4.2 La partie contrôle-commande :

La stratégie de commande se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées :

- Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante,
- Identification à partir de la détection du courant de la source,
- Identification à partir de la détection de la tension de la source.

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes [3]. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

A) La méthode d'identification des courants harmonique :

Il existe deux différentes familles des méthodes d'identification des courants harmoniques qui sont :

- a) La première utilise la transformer de Fourier, rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adapté aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul. [10]
- b) La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basé sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisé pour compenser

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant totale. [7]

B) Méthode de la puissance instantanée P-Q : [7]

a) Définition :

La méthode des puissances instantanées est une méthode temporelle, elle a été utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre des méthodes fréquentielles telle que la méthode de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète), cette méthode a été introduite par H. Akagi, son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système diphasé (repère α - β) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées.

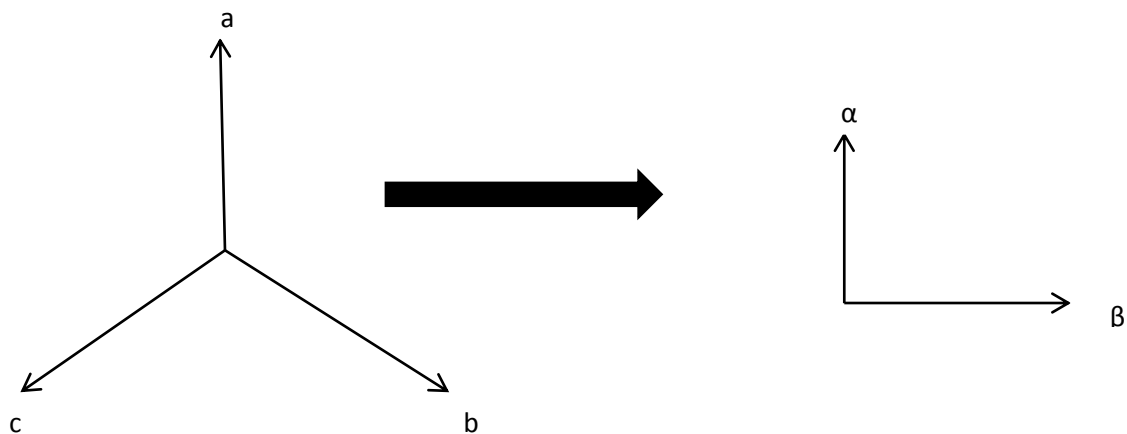


Figure III.10 : Transformation d'axe « abc » à « α - β »

b) Principe de fonctionnement :

La théorie (P-Q) met en œuvre une transformation d'un système de référence stationnaire en coordonnées abc, à un système de coordonnées (α , β), elle correspond à une transformation algébrique, connu sous le nom de la transformation de Clark, qui produit également un système de référence fixe, où les coordonnées (α - β) sont orthogonales les unes aux autres.

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

La transformation se fait à partir de la relation suivant :

$$\begin{bmatrix} X\alpha \\ X\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Xa \\ Xb \\ Xc \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.10)$$

Nous appliquons cette relation sur la tension de la source et le courant de charge nous trouvons :

$$\begin{bmatrix} V\alpha \\ V\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vsa \\ Vsb \\ Vsc \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.11)$$

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.12)$$

Après avoir obtenu les tensions v_α , v_β , et les courants i_α , i_β , nous utilisons des multiplicateurs et des additionneurs afin de déterminer les puissances instantanées réelles et imaginaires dans le but d'en extraire les composantes harmoniques.

$$\begin{cases} p = V\alpha i\alpha + V\beta i\beta \\ q = V\alpha i\alpha - V\beta i\beta \end{cases} \dots\dots\dots (III.13)$$

- Avec : p : la puissance instantanée réelle en [W].
- q : est la puissance instantanée imaginaire en [var]

Dans le cas où les tensions sont sinusoïdales et alimentent une charge non linéaire, les puissances instantanées p et q ont pour expression :

$$\begin{cases} p = p_c + p_h \\ q = q_c + q_h \end{cases} \dots\dots\dots (III.14)$$

Avec :

- p_c, q_c : puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant.
- p_h, q_h : Puissance alternative liées à la somme des composantes harmoniques du courant.

Chapitre III
Modélisation et commande du filtre actif parallèle

L'étape qui suit nous allons utiliser un filtre passe bas dans le but d'éliminer les composantes continues pour avoir seulement les composantes alternatives relatives aux composantes harmoniques recherchées.

L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification, des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés, dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre en vue de simplifier l'approche d'implantation numérique de ce dernier, en effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs ce qui peut être préjudiciable dans notre étude, la relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre :

$$F_{pb}(p) = \frac{\omega_n^2}{p^2 + 2\xi\omega_n p + \omega_n^2} \dots\dots\dots (III.15)$$

Avec :

P : opérateur de Laplace égal à $j\omega t$

ω_n : fréquence propre du filtre, sa valeur égale à : 314rad/s

ξ : est le dépassement ou le coefficient d'amortissement, sa valeur égale a : 0.4

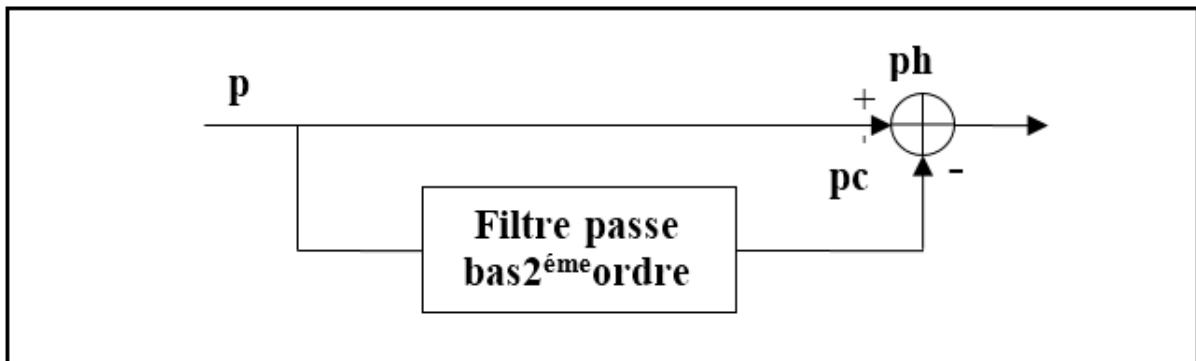


Figure III.11 : Principe de l'extraction des composantes alternative de p et q

On pose :

$$\Delta = V\alpha^2 + V\beta^2$$

Et à partir de l'expression (III.13) on a :

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta & \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.16)$$

On remplace (III.14) dans (III.16) on trouve :

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta & \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta & \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta & \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ph \\ qh \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.17)$$

Donc le courant harmonique sera déterminé par la relation :

$$\begin{bmatrix} i\alpha \\ i\alpha \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V\alpha - V\beta & \\ V\beta & V\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} ph \\ qh \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.18)$$

Pour obtenir les courants de référence nous avons appliqué la transformé inverse de Clark sur la matrice (3.9) :

$$\begin{bmatrix} iaref \\ ibref \\ icref \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} iaref \\ i\beta ref \end{bmatrix} \dots\dots\dots (III.19)$$

C) Commande d'onduleur par MLI :

La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre la tension mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation), la sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs, le schéma de principe la commande est donnée par la Figure (III.10) [19].

Chapitre III

Modélisation et commande du filtre actif parallèle

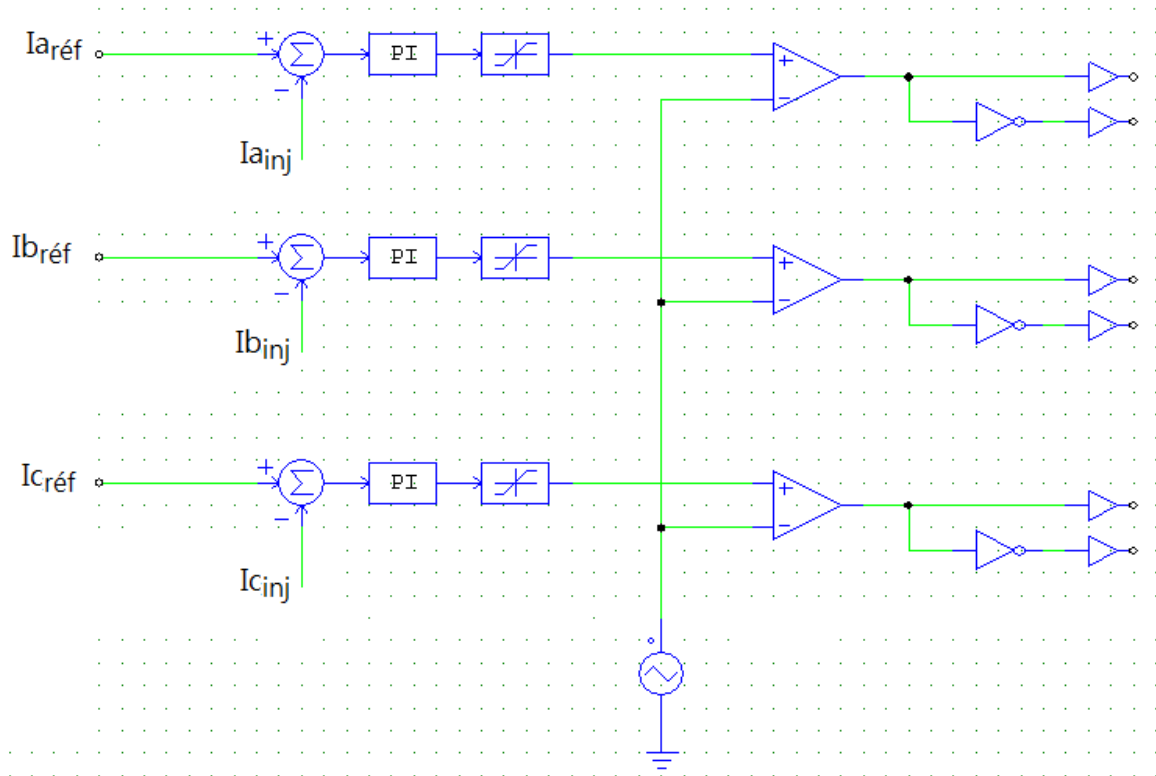


Figure III.12 : Principe de commande par MLI

III.5 Conclusion :

Dans ce troisième chapitre, on a commencé par l'explication du principe de fonctionnement du filtre actif, ensuite on a parlé sur leurs principales combinaisons possibles, après on a passé à la structure générale du filtre actif parallèle qui est composé de deux blocs l'un partie puissance et l'autre partie contrôle-commande et on a donné une idée générale sur chaque partie.

Chapitre IV Simulation et résultats du Filtrage

IV.1 introduction :

Dans ce travail on utilise le logiciel P-SIM pour analyser les formes d'onde du courant absorbé par la charge polluante, On s'intéresse particulièrement au taux de distorsion harmonique de ce courant et aux remèdes utilisés pour l'améliorer.

Notre travail est basé sur la configuration parallèle, utilisant un onduleur de tension triphasé commande par MLI, alimenté par un panneau photovoltaïque de tension fixe à travers un hacheur élévateur Boost, On utilise un switch triphasé entre le filtre et le réseau pour faciliter l'étude avant et après le filtrage.

Au début on a étudié la charge polluante sans filtre, et on montrera après l'allure du courant dans la source et son spectre harmonique contenant les informations sur le THDi.

Ensuite on modélise le filtre actif, puis l'ensemble charge polluante, réseau électrique et enfin le filtre actif de puissance. On montrera l'allure du courant électrique de la source, de la charge, et du courant injecté par le filtre actif suivi de son THDi après la compensation.

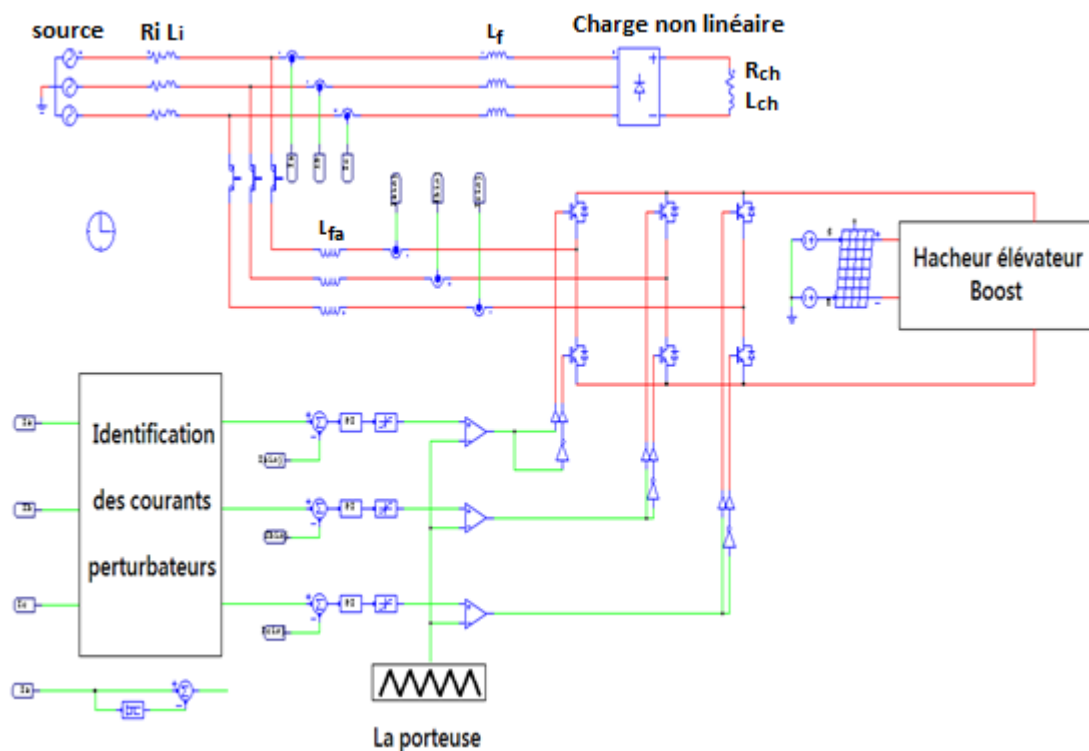


Figure IV.1 : schéma global du système

Chapitre IV

Simulation et résultats du Filtrage

Le système que nous avons étudié est constitué de :

- Un réseau électrique triphasé à trois fils.
- Une charge non linéaire triphasée (redresseur) alimentant une charge de type RL.
- Un filtre actif parallèle triphasé à structure tension alimenté par un panneau photovoltaïque à travers un hacheur élévateur Boost.

Systeme	Désignation	Valeurs
Source d'alimentation [20]	La tension de phase	$V = 230$ (v)
	La fréquence	$f = 50$ (HZ)
	La résistance interne	$R_i = 0.25 * 10^{-3}$ (ohm)
	L'inductance interne	$L_i = 19.4 * 10^{-6}$ (H) $L_f = 0.3 * 10^{-3}$ (H)
Charge non linéaire [20]	Pont redresseur triphasé Avec charge RL	$R_{ch} = 6.7$ (ohm) $L_{ch} = 25 * 10^{-3}$ (H)
FAP [20]	Inductance de couplage	$L_{fa} = 1.25 * 10^{-3}$ (H)
Stockage d'énergie	Panneau solaire	$N = 72$ $C = 20$ (μ F)
	Hacheur élévateur Boost	$L = 25$ (mH) $C = 18.4$ (μ F) $f_d = 10000$ (HZ)

Tableau IV.1 : Les paramètres de Simulation

Chapitre IV

Simulation et résultats du Filtrage

IV.2 : Résultats de la Simulation :

A) Tensions et courants du réseau électrique :

La charge dans notre cas est alimentée par un système triphasé équilibré de tension (230 V) comme est représenté sur (la figure IV.2).

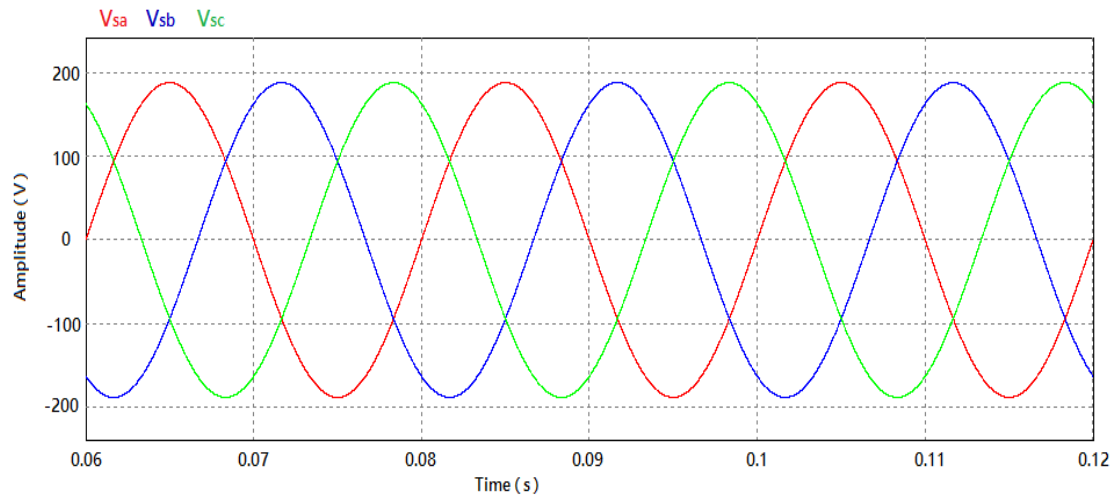


Figure IV.2 : Les trois tensions du réseau triphasé

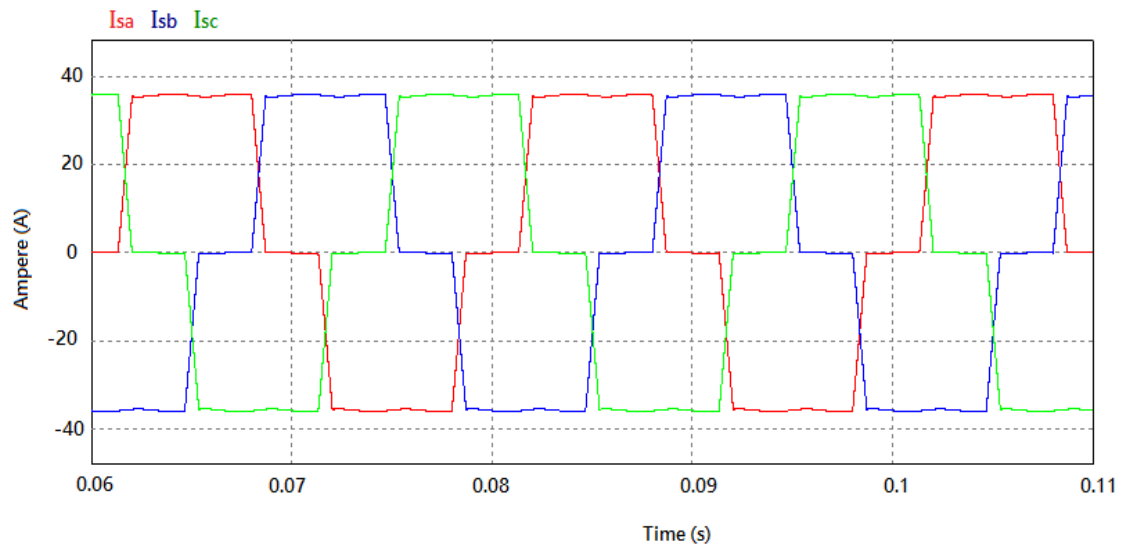


Figure IV.3 : Les trois courants de la source (i_{sa}, i_{sb}, i_{sc})

Chapitre IV

Simulation et résultats du Filtrage

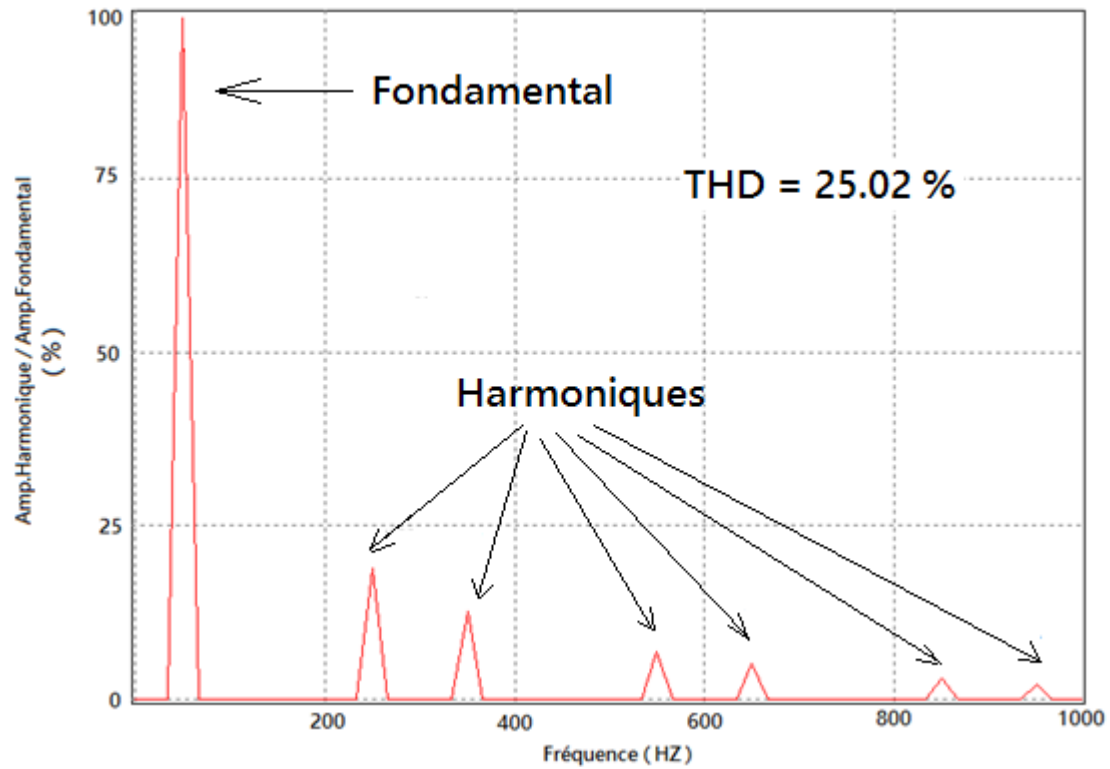


Figure IV.4 : Spectre harmonique du courant pollué

B) Le courant de la charge polluante :

La charge polluante que nous avons étudiée est un pont de diode triphasé qui alimente une charge continue RL.

Les courants triphasés absorbés par cette charge sont :

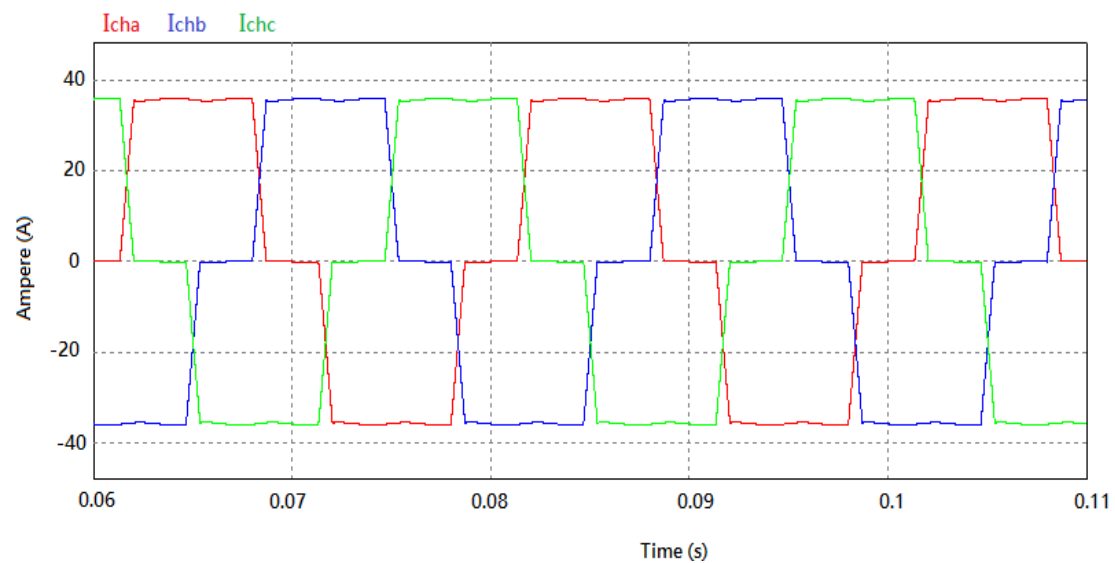


Figure IV.5 : Les courants de charge (i_{cha} , i_{chb} , i_{chc})

Chapitre IV

Simulation et résultats du Filtrage

C) Identification des courants Perturbés :

Les courants de référence pour la compensation des harmoniques sont identifiés par la méthode coupe-bande ou « notch filter » est représenté dans (la figure IV.6) :

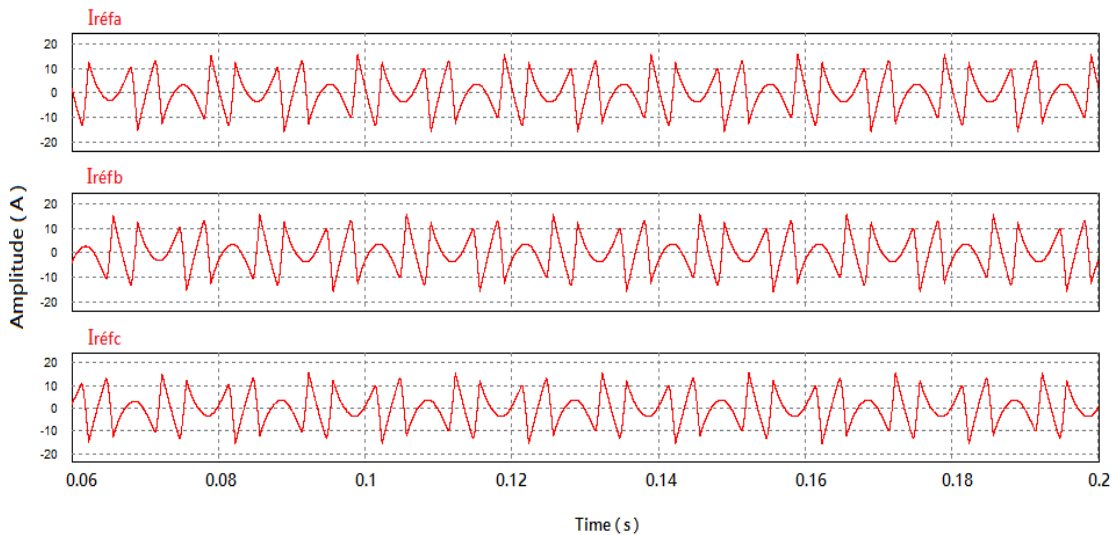


Figure IV.6 : Les courants des référence ($i_{réfa}$, $i_{réfb}$, $i_{réfc}$)

D) Le courant généré par le filtre actif :

On représente dans (la figure IV.7) le courant généré par le filtre actif :

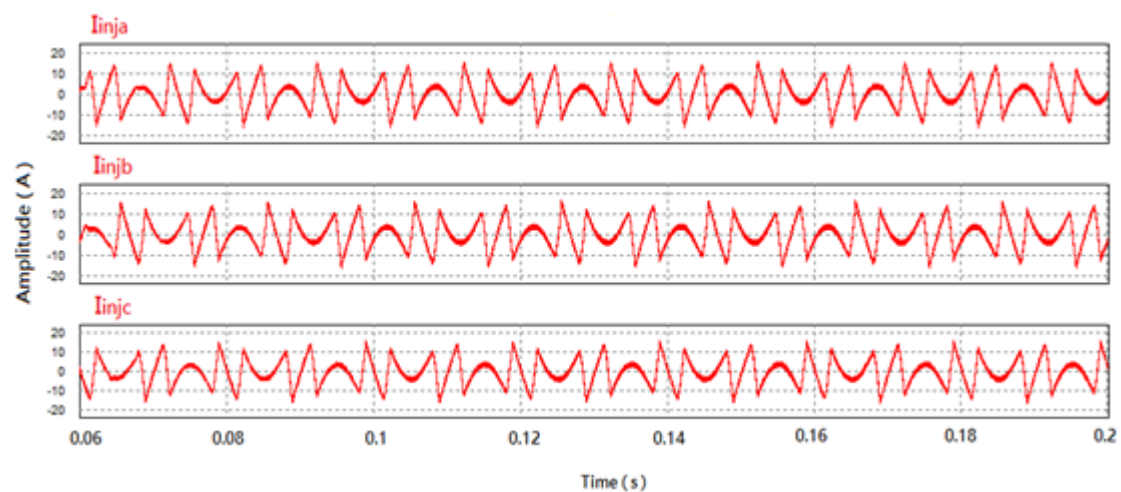


Figure IV.7 : Les courants injectés (i_{inja} , $i_{inj b}$, $i_{inj c}$)

Chapitre IV

Simulation et résultats du Filtrage

- Le courant injecté par le filtre est en opposition de phase par rapport le courant de référence, il élimine le courant pollué qui généré par la charge non linéaire.

E) Le courant filtré :

Après l'injection le courant reproduit par le filtre dans le réseau, on obtiendra le courant compensé qui présenté sur (la figure IV.8) :

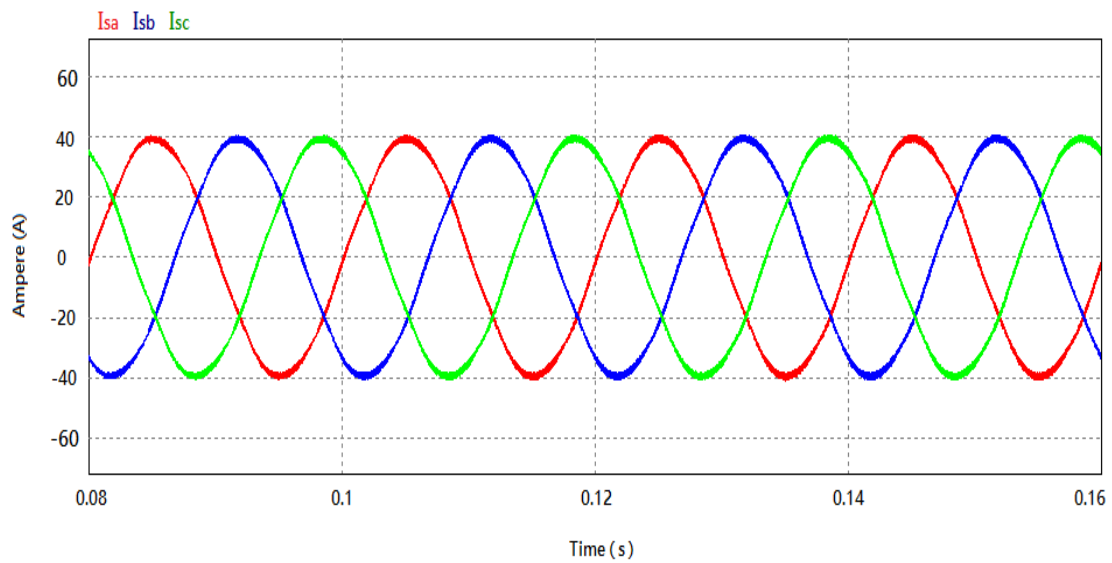


Figure IV.8 : Les courants filtrés (i_{sa} , i_{sb} , i_{sc})

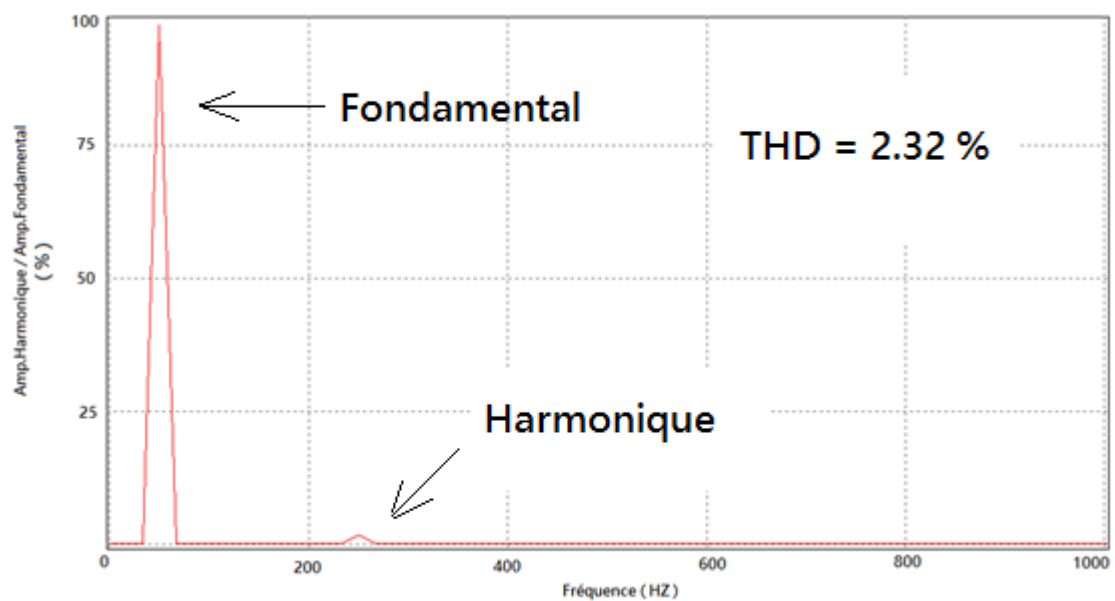


Figure IV.9 : Spectre d'harmonique du courant filtré

IV.3 Interprétation des résultats :

D'après les résultats de simulations obtenues, Figure IV.3 montre l'effet des harmoniques sur les courants de la source avant le filtrage, selon son spectre harmonique représenté dans Figure IV.4 montre que son THD vaut 25.02 %.

La figure IV.8 montre Le courant de sortie après avoir met le filtre actif parallèle on remarque que le FAP assure parfaitement sa fonction et dépollué les courants de la source, par injecté convenablement des courants de compensation qui est illustrés dans La figure IV.7, le THD diminue jusqu'à 2.32 % après le filtrage comme il est montré sur la figure IV.9.

IV.4 Conclusion :

Dans ce travail on s'intéresse à la modélisation du filtre actif parallèle commandé en MLI et alimenté par une source de tension photovoltaïque suffisante et constante à travers un hacheur élévateur Boost.

Au début on a modélisé la charge polluante sans filtre, nous avons vu l'influence de cette dernière sur le courant fourni par le réseau, puis on a modélisé l'ensemble réseau-charge polluante, filtre actif parallèle dont les ordres de commutation ont été envoyés par la commande à MLI.

Les résultats obtenus permettent de montrer l'efficacité de ce filtre par La chute de Taux de distorsion harmonique (THD) remarquable de 25.02% jusqu'à 2.32%.

Conclusion générale :

Ce travail présente l'étude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur (GPV).

L'objectif de ce système qui se compose d'un filtre actif parallèle et un GPV et de compenser les perturbations générées par les charge dite non-linéaire (les courant harmoniques).

Dans un premier temps, nous avons présenté les caractéristiques générales des perturbations électriques leurs effets sur le réseau électrique, en présentant les différentes types des solutions pour les réduire.

Dans la première partie du second chapitre nous avons présenté le principe de la génération photovoltaïque, modélisation, et leur fonctionnement, dans la deuxième partie une étude sur les convertisseur (DC/DC) et en particulier l'hacheur élévateur Boost.

Dans Le troisième chapitre nous avons présenté le principe de fonctionnement du filtre actif, ensuite on a parlé sur leurs principales combinaisons possibles, après on a passé à la structure générale du filtre actif parallèle.

Enfin le quatrième chapitre qui est consacré à la simulation à partir du logiciel P-SIM, les résultats de la simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générée par la charge non-linéaire.

Bibliographie

- [1] B. Saïd et M.D. Adel , « Commande non linéaire de l'UPQC » , Thèse de Magister, Université de Mohammed Boudiaf-Msila, 2015.

- [2] D. Benouadah, F. Hasnaoui « Etude et commande d'un filtre actif série » Thèse de Master en génie électrique université Saad Dahlab de Blida, 2016/2017.

- [3] M. A. E. Alali « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension » Thèse de doctorat Université Louis Pasteur, Strasbourg 1, France, 2002.

- [4] N. Mendalek, « Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation » , Thèse de doctorat, Ecole de technologie supérieur Université de Québec, 2013.

- [5] D.O.Abdeslam, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les système électrique application au filtrage parallèle dans les réseaux électrique basse tension » , Thèse de doctorat Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2005.

- [6] Douar Hakim « Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques » thèse de magister en génie électrique université M'Hamed Bougara, Boumerdes 2006.

- [7] A.Fellague Chebra, A. Fellag « Etude et simulation d'un filtre actif parallèle multi-niveaux » thèse de master en génie électrique université Saad Dahlab de Blida, 2018.

- [8] Cahier technique n°152 « Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement ».

- [9] A.Chaoui « Filtrage active triphasé pour charges non linéaire » thèse de doctorat en génie électrique université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [10] K. Djazia « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus » thèse doctorat université Ferhat Abbas. Sétif 1. (UFAS) Algérie, 2015.
- [11] N.Midoune, H. El-Mehdi « Étude par simulation des effets des harmoniques et de la puissance réactive sur le réseau électrique » thèse de master en Génie électrique université Kasdi Merbah, Ouargla, 2016.
- [12] Schneider Electric « élimination des harmoniques dans les installations » édition 09/2015.
- [13] R. Sanae « étude de méthode de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution » Mémoire pour l'obtention d'un diplôme de maitre en science appliqués en génie électrique, université du Québec à Trois-Rivières, 2002.
- [14] Y. Elmaalmy, Salami Gouya « Etude et analyse des harmoniques générées dans le réseau électrique » Projet de fin d'études Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Maroc, 2014.
- [15] R. Sanae « étude de méthode de filtrage des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution » Mémoire pour l'obtention d'un diplôme de maitre en science appliqués en génie électrique, université du Québec à Trois-Rivières, 2002.
- [16] T. Deflander, M. Philippe « Les harmoniques sur les réseaux électriques » Electricité de France(EDF) –Direction des études et recherches, Edition Eyrolles, France 1998.

- [17] N. BRYANT « Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles : Compensation globale ou sélective des harmoniques : Régime équilibré ou déséquilibré » Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1999.
- [18] F. Hamida, B. Beziou « Etude et simulation d'un filtre actif parallèle alimenté par un système photovoltaïque » thèse de master en électrotechnique université Saad Dahlab de Blida, 2017.
- [19] H. Sakkou, "Conception d'un compensateur actif multifonctions corrigeant toutes les perturbations en tension générées par les charges non linéaires et Les fours à arc", masters, École de technologie supérieure-Montréal, 2007.
- [20] H. DJEGHLOUD « Filtrage actif de puissance » Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, 2007.
- [21] Dr. Belaid Lalouni Sofia, cours énergie solaire photovoltaïque.
- [22] Antonio Luque And Steven Hegedus, "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [23] Les panneaux solaires photovoltaïque, solutions for low energy Neighbourhoods.
- [24] Leonard Leslie, "Design and analysis of a grid connected photovoltaic generation system with active filtering function", Blacksburg, Virginia, March14, 2003.
- [25] L.Protin and S. Astier. " Convertisseurs photovoltaïques", Technique d'ingénieur, D 3360, 1996.
- [26] Tadjer. Sid Ahmed." Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque" Mémoire de magistère, Université M'hamed Bougara-Boumrdes, 2008.

- [27] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. SadaSy, le pompage photovoltaïque : Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens. Université d'Ottawa, institut de l'énergie des pays ayant en commun l'usage du français.
- [28] F. Bouchtoucherfa « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT » Mémoire de magister, Ecole National Polytechnique Elharach, 2004.
- [29] T. Markvart et L. Castaber, "Photovoltaics Fundamentals and applications". Preface Guide to Usage of the Handbook by Professional Groups.
- [30] Tadjer. Sid Ahmed. "Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque" Mémoire de magistère, Université M'hamed Bougara-Boumrdes, 2008.
- [31] S. Ouchen, A. Betka, S. Abdeddaim, and A. Menadi, "Fuzzy-predictive direct power control implementation of a grid connected photovoltaic system, associated with an active power filter," *Energy Convers. Manag.*, vol. 122, pp. 515–525, 2016.
- [32] M. Seyedmahmoudian, B. Horan, T. K. Soon, R. Rahmani, A. M. Than Oo, S. Mekhilef, and A. Stojcevski, "State of the art artificial intelligence-based MPPT techniques for mitigating partial shading effects on PV systems - A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 435–455, 2016
- [33] S. Ouchen "Contribution à la commande directe de puissance dédiée au filtrage actif associé à une source photovoltaïque" Mémoire de Doctorat, Université Mohamed khider-Biskra, 2017.

[34] S. Naffouti « Dimensionnement et commande d'un hacheur parallèle alimenté par une source photovoltaïque » Projet de fin d'étude pour obtenir le diplôme national d'ingénieur, Université de Monastir, Tunisie, 2012.