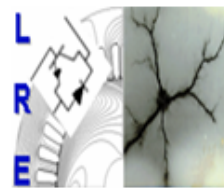


République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique d'Alger
Département d'Electrotechnique
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de Master en Electrotechnique

Présenté par :

HARIZ YASSINE DJEWED

L'Etude des contraintes et des préconisations relatives au raccordement d'une chaine de production PV au réseau national

Dirigé par :

L.Nezli Professeur à l'ENP
B.Bouziane Directeur de recherche à CREDEG
M.Khelif Directeur de recherche au CDER

Membres du jury :

Président : Dr H.Sahraoui (ENP)
Examineur : Pr M.O Mahmoudi (ENP)
Examineur : Dr T.Zebbadji (ENP)

ENP 2013

Laboratoire de Recherche en Electrotechnique (LRE) - Ecole Nationale Polytechnique (ENP)

10, Avenue des Frères Oudek, Hassen Badi, BP. 182, 16200 El Harrach, Alger, Algérie www.enp.edu.dz

ملخص :

عملية التحول الطاقوي في الجزائر، في الأونة الأخيرة إقتضت على القيام بدراسات تقنية و إقتصادية من أجل إنشاء مراكز لتوليد الطاقة الشمسية، الحرارية و الضوئية، في أفق 2030 من أجل تحقيق الإكتفاء الذاتي في مجال الطاقة. على سبيل المثال نذكر المشروع الضخم "ديزارتاك" الذي يقتضي على إستعمال الطاقة الشمسية و طاقة الرياح لتوليد الكهرباء و تزويد شمال إفريقيا، الشرق الأوسط، و أوروبا. تعتبر الطاقة الشمسية أهم مصدر طاقوي متجدد من ناحية حماية البيئة، الوفرة، و المردودية على المدى الطويل. من أجل ضخ الطاقة الكهربائية المولدة في المراكز الشمسية في الشبكة الكهربائية الوطنية، أصبح أساسيا دراسة كفاءات ربط هذه المراكز الشمسية بالشبكة الوطنية. من أجل هذا سنتقدم في هذا التقرير كفاءات تحسين سلسلة التحويل الشمسي، شروط إدماج مراكز التوليد بالشبكة الكهربائية و مختلف الإقتراحات.

كلمات مفتاحية : الطاقة الشمسية، MPPT، الفلتر المتوازي الناشط (FAP)، بطارية، مفرمة Buck-Boost، Hystérésis.

Résumé :

Le processus de la transition énergétique en Algérie a permis d'élaborer plusieurs études techniques et économiques portant sur la réalisation des centrales solaires thermiques et photovoltaïques d'ici 2030 et ce pour répondre à la demande croissante en énergie dans notre pays. À titre d'exemple, le gigantesque projet euro méditerranéen Desretec s'appuie sur l'énergie solaire et éolienne afin de fournir de l'énergie électrique aux pays du Maghreb, au moyen orient et à l'Europe. L'énergie solaire est considérée par les différents secteurs comme la source d'énergie la plus prometteuse en matière de contribution à la protection de l'environnement, de disponibilité et de rentabilité à long terme. En vue d'injecter l'énergie électrique produite par les centrales photovoltaïques dans le réseau national interconnecté, il est primordial d'étudier les contraintes liées au raccordement de la chaîne de production photovoltaïque au réseau national interconnecté. À cet effet, les moyens d'optimisation de la chaîne de conversion photovoltaïque, les contraintes liées au raccordement de cette dernière au réseau ainsi que les différentes préconisations seront traités dans ce rapport.

Mots clés : Panneau photovoltaïque (PV), MPPT, Filtre parallèle actif (FAP), batterie, hacheur Buck-Boost, bus continu, hystérésis, harmonique.

Abstract:

Energy transition process in Algeria has developed several technical and economical studies on the implementation of thermal and photovoltaic solar power plants by 2030 and to meet the growing supply for energy in our country. For example, the Euro-Mediterranean project Desretec relies on solar and wind energy to provide electrical energy to North Africa, to Middle East and Europe. Solar energy is considered by different sectors as most promising source of energy thanks to its contribution to protect environment, availability and profitability. In order to inject the electrical energy produced by PV plants in the national grid, it is crucial to study constraints of connecting the PV plants to the national grid. In this survey, the optimization means of PV plants, the constraints due to connection to grid and the various recommendations have been carried out.

Key words: Photovoltaic panel (PV), MPPT, Actif parallel filter (FPA), storage, Buck-Boost converter, DC bus, hysteresis, harmonic.

Remerciements

Au terme de ce travail,

Je remercie vivement le Docteur NEZLI Lazhar (Professeur à l'ENP) pour m'avoir confié et dirigé ce projet et qui n'a jamais manqué de me conseiller et m'orienter tout au long de mon projet de fin d'études.

Je tiens également à remercier Monsieur KHELIF Messoud, Directeur de recherche au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) qui au cours de mes nombreux déplacements au CDER, s'est montré très disponible et accueillant. Ses conseils judicieux, ses orientations pertinentes ainsi que son implication directe dans la partie simulation ont permis l'aboutissement de mon projet de fin d'études .

Je remercie aussi Monsieur Bouziane, directeur de recherche au centre de recherche et développement d'électricité et de gaz (CREDEG/SONELGAZ) pour l'intérêt qui l'a porté à mon projet ainsi qu'à l'ensemble du personnel de CREDEG.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance à l'égard du Professeur BOUBAKEUR Ahmed (Professeur à l'ENP) pour son appui scientifique et sa disponibilité durant la préparation de mon projet de fin d'études ainsi que pour tout le savoir qu'il m'a transmis tout au long de mon cursus académique.

Je tiens à remercier l'ensemble des enseignants de l'École Nationale Polytechnique spécialement ceux du département d'Électrotechnique, pour leur encadrement tout au long de ma formation.

J'en profite pour remercier « ami Salah » ainsi que tous ceux qui m'ont soutenus et ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

À mes chers parents pour leurs soutiens indéfectibles

À mon frère Rassim

À mon frère Yazid

À tous mes amis

D j e w e d Y a s s i n e

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Contraintes du raccordement d'une chaine de production PV au réseau	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Impact du raccordement d'une chaine de production PV au réseau interconnecté.....	3
I.3 Solutions et préconisations	9
I.4 Conclusion.....	15
Chapitre II : Conception d'un filtre parallèle actif commandé par MLI à hystérésis	
II.1 Introduction.....	17
II.2 Principe de fonctionnement	17
II.3 Partie puissance.....	19
II.3.1. Circuit de puissance	19
II.3.2. Bus continu de l'onduleur	19
II.3.3. Dimensionnement du filtre de sortie	20
II.4 Partie commande.....	21
II.4.1. MLI à bande d'hystérésis	21
II.4.2. Régulation du courant injecté par l'onduleur	22
II.4.3. Régulation de la tension continue	23
II.5. Résultats de simulation	23
Conclusion Générale	30
<u>Bibliographie</u>	

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 : Détermination de la chute de tension dans une ligne en présence de PV.....	4
Figure I.2 : Exemple de variations de tension sur un réseau BT en fonction de la présence de production PV.....	4
Figure I.3 : Surtensions sur le réseau BT en Espagne (source Iberdrola).....	5
Figure I.4 : Exemple de THD à haute et basse puissances pour un onduleur type du marché.....	7
Figure I.5 : Régulation de la tension au point de raccordement grâce au pilotage de la charge et de la décharge d'une batterie.....	10
Figure I.6 : Atténuation des variations rapides de puissance grâce à du stockage sur le site de Wakkanai au Japon.....	10
Figure I.7: Principe de la régulation du bus continu.....	11
Figure I.8: Boucle de régulation de la tension du bus continu.....	12
Figure I.9: Variation des Puissances en fonction de la charge (Charge/Décharge).....	13
Figure I.10: Tension du bus continu.....	13
Figure I.11 : Mise en évidence du filtrage actif des harmoniques avec la baisse du THD..... en phase de production de l'onduleur.....	14
Figure II.1 : Principe de fonctionnement d'un compensateur shunt.....	18
Figure II.2 : Modèle du filtre parallèle actif commandé par hystérésis établi Sous MATLAB Simulink.....	20
Figure II.3 : Modulateur MLI à bande d'hystérésis.....	21
Figure II.4 : Boucle de régulation du courant de l'onduleur établi sous Simulink.....	22
Figure II.5 : Courants harmoniques générés instantanément par l'onduleur avec une charge variable.....	24
Figure II.6 : Tension aux bornes du Bus Continu de l'onduleur.....	25
Figure II.7 : Synchronisation du courant injecté par l'onduleur et la tension du réseau.....	25
Figure II.8 : Courants transitant dans le réseau après le raccordement du FAP.....	26
Figure II.9 : Analyse spectrale du courant transitant dans le réseau.....	27
Figure II.10 : Courants pollués provoqués par la charge non linéaire (Redresseur triphasé à diodes).....	27

Figure II.11 : Analyse spectrale du courant pollué transitant dans le réseau avant le raccordement du FAP.....	28
Figure II.12: Puissances active et réactive absorbées par la charge polluant.....	28
Figure II.13 : Puissances active et réactive fournies par l'onduleur.....	28
Figure II.14 : Puissances active et réactive fournies par le réseau.....	29

Le présent rapport s'intéresse à l'énergie solaire qui constitue l'axe principal de développement des énergies non conventionnelles dans notre pays en vue de réaliser les futures centrales photovoltaïques et solaire thermiques à l'horizon 2030.

L'objet principal de ce mémoire est d'établir une étude sur l'impact de l'insertion des panneaux photovoltaïques sur le réseau national interconnecté, il sera évoqué dans le 1^{er} chapitre où nous essayerons de décrire et synthétiser les différentes contraintes techniques rencontrées lors du raccordement d'une chaîne de production PV au réseau. En vue de parer à ces contraintes, des préconisations accompagnées d'illustrations via Simulink seront développées.

Le 2^{ème} chapitre de ce travail se focalisera sur la contrainte principale du raccordement d'une chaîne de production PV au réseau à savoir *la pollution harmonique*. En effet, nous mettrons l'accent sur une technique de dépollution harmonique dans le réseau électrique engendrée principalement par l'étage de conversion photovoltaïque à savoir *le filtre parallèle actif commandé par hystérésis*.

Enfin, nous concluons par les interprétations des résultats obtenus lors de la simulation via l'outil Simulink/Matlab 12.0 et les perspectives d'optimisation de la chaîne de production photovoltaïque ainsi que les précautions à prendre lors d'un éventuel raccordement au réseau dans le cadre de la réalisation des futurs projets industriels énergétiques d'envergure dans notre pays.

Chapitre I

Contraintes du raccordement d'une chaîne de production PV au réseau

Pour connecter une centrale de production d'électricité au réseau bouclé interconnecté il faut qu'elle ait la même fréquence que ce dernier, et c'est pour cela qu'on trouve généralement des difficultés à intégrer les centrales de production à partir des énergies renouvelables à un réseau. En effet ces sources sont fluctuantes et ne sont pas stables.

L'intégration de l'énergie solaire au réseau national interconnecté qui constitue l'axe de développement principal dans le processus de la transition énergétique dans notre pays sera traitée dans ce chapitre.

I.1 Introduction

Du point de vue de la réglementation, les gestionnaires des réseaux de transport et de la distribution de l'énergie électrique doivent assurer le traitement qualitatif de l'alimentation des consommateurs en cette énergie. En effet, après sa production, l'énergie électrique doit être entretenue et suivie en raison des altérations subies pendant son transport et sa distribution. À ce stade, on peut distinguer différentes sortes de perturbations qui peuvent être présentes dans le réseau entraînant ainsi la dégradation de la qualité d'énergie : creux et coupures de tension, fluctuations de tension, déséquilibre du système triphasé de tension, variation de fréquence, bruit de fond électrique, pollution harmonique.

Cette dernière contrainte représente un problème majeur lors du raccordement des centrales photovoltaïques au réseau interconnecté classique, et ce pour les charges non linéaires présentes dans les chaînes de production PV. Cela n'empêche pas l'énergie solaire produite à partir de la technologie photovoltaïque d'être injectée au réseau interconnecté. Cependant, les contraintes développées dans ce chapitre liées au raccordement des PV au réseau imposent un taux de pénétration limité dans le réseau classique.

I.2 Impacts de l'insertion d'une chaîne de production PV sur le réseau classique

I.2.1 Elévation locale du niveau de tension

Les variations de tension d'un réseau électrique dépendent des caractéristiques de ce réseau ainsi que du nombre et de la nature des installations électriques raccordés à ce réseau (Figure IV.1). Les installations consommatrices d'énergie auront tendance à provoquer des baisses de tension alors que les installations de production auront tendance à générer des hausses de tension. Cela implique de la part du gestionnaire du réseau de faire un choix en termes de gestion du plan de tension. Ces élévations de tension seront d'autant plus notables qu'il y aura beaucoup de PV et peu de charges (voir Figure IV.2) [14] [21]

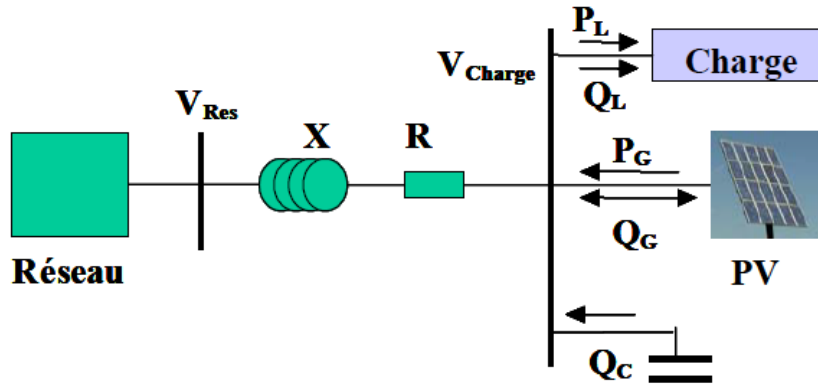


Figure I.1 : Détermination de la chute de tension dans une ligne en présence de PV [14]

Sur un réseau de distribution en présence d'installations PV, la chute de tension V entre le réseau amont et le point de raccordement d'une installation PV via une ligne est déterminée par la formule:

$$\Delta V = \frac{R(P_G - P_L) + X(\pm Q_G - Q_L + Q_C)}{V}$$

Où : R, X sont la résistance et la réactance totale de la ligne

- P_G, Q_G sont les puissances active et réactive fournies par le PV
- P_L, Q_L sont les puissances active et réactive de consommation
- Q_C est la puissance réactive du dispositif de compensation

Dans le réseau de distribution, la puissance active injectée par un système PV joue un rôle important dans la variation de la tension car la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique $R \gg X$.

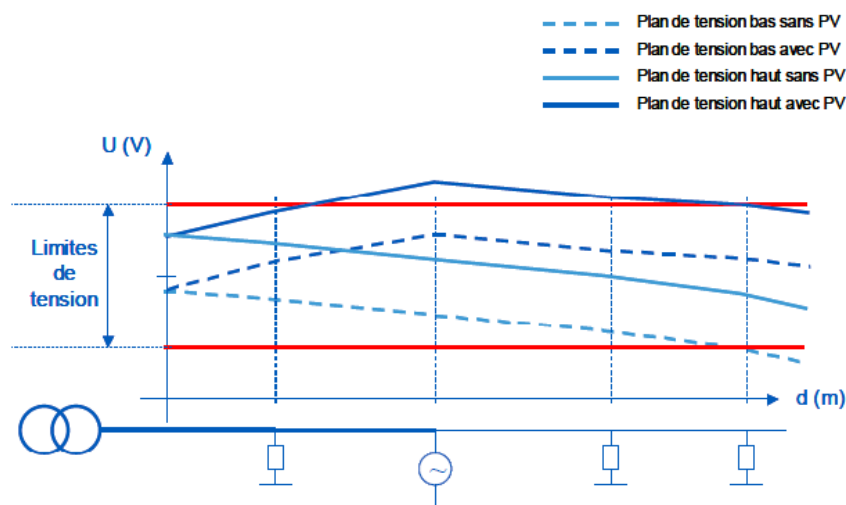


Figure I.2 : Exemple de variations de tension sur un réseau BT en fonction de la présence de production PV [14].

Ce phénomène de hausse localisée de la tension a un impact important des installations photovoltaïques sur les réseaux de distribution BT. Il peut être pris en compte et limité de différentes façons [14] [22] :

- En limitant le nombre des utilisateurs ou la puissance totale d'injection d'un départ afin de conserver en tout point du réseau une tension inférieure à la tension maximale Admissible.
- En modifiant la conception des réseaux BT pour prendre en compte la présence d'installations photovoltaïques. Cette prise en compte consiste notamment à régler la tension en tête des départs BT à un niveau plus faible qu'habituellement et à conserver une section de câble identique sur toute la longueur de la portion du réseau. Cette méthode présente néanmoins l'inconvénient de laisser moins de marge aux chutes de tensions admissibles dans le départ concerné.
- En autorisant le raccordement d'un nombre important d'installations photovoltaïques sous réserve que les onduleurs soient équipés d'une fonction de limitation de puissance injectée lorsque l'élévation de la tension du réseau devient trop forte comme cela est le cas au Japon .
- En autorisant le raccordement d'un nombre important d'installations photovoltaïques sous réserve que les onduleurs soient équipés d'une fonction de réglage de la puissance réactive adapté au problème de tension .

I.2.2 Bosses de tension

Une étude conduite en Espagne [14] rapporte que, durant ces dernières années, des dommages à des équipements électroniques, tels que des compteurs électriques, ont été constatés, et ce en corrélation avec l'implantation de centrales photovoltaïques. Il a été montré que ces dommages survenaient lorsqu'une coupure sur le réseau (BT ou HTA) était effectuée en amont des onduleurs (avec transformateurs), de telle sorte qu'un ou plusieurs onduleurs devenaient isolés du réseau. La surtension peut alors dépasser 200 % de la valeur nominale de la tension avant que le ou les onduleurs se déconnectent.

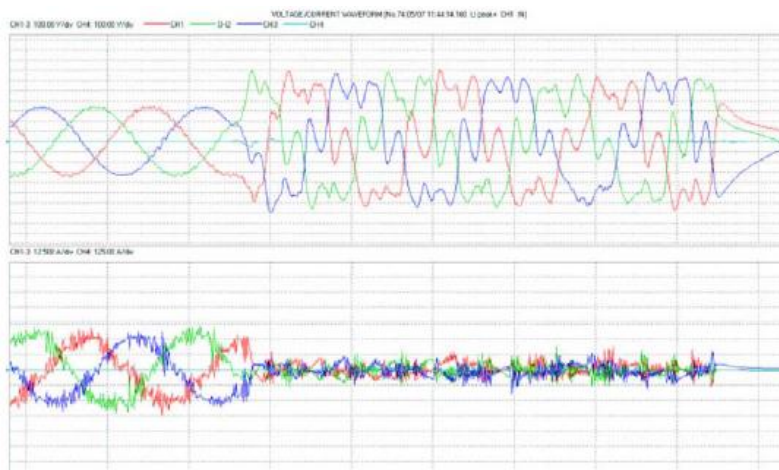


Figure I.3 : Surtensions sur le réseau BT en Espagne (source Iberdrola [14])

L'étude [14] citée n'apportant pas d'explications quant au phénomène observé, des simulations ont été effectuées dans le cadre du projet Esprit ; elles montrent que de telles surtensions peuvent survenir lorsque la production (photovoltaïque), au moment de la perte de réseau amont, est nettement supérieure à la consommation (charges) ; les surtensions sont d'autant plus fortes que le déséquilibre est élevé. Inversement, des sous-tensions apparaissent lorsque la production est très inférieure à la consommation [14].

I.2.3 Variations rapides de puissance

Diverses analyses de l'éclairement solaire ont montré que les variations rapides de l'éclairement sont en général limitées : 95% des variations en moins d'une seconde sont inférieures à 5 W/m² en Europe Centrale.

Une étude sur le site de tests Rokko au Japon a montré que plus l'installation n'est de taille importante, moins les variations de puissance sont rapides. Des variations maximales de puissance de près de 30 %/s sur une installation de 2 kW (2,4 m de large), et de 10 %/s sur la puissance totale de l'ensemble des 100 installations de 2 kW (réparties sur une largeur de 85 m) ont été constatées [14].

I.2.4 Harmoniques de courant [14] [23]

D'une manière générale, tout appareil électrique comportant de l'électronique est source d'harmoniques. Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques: troubles fonctionnels (synchronisation, commutation), disjonctions intempestives, erreurs de mesure sur des compteurs d'énergie.... Les échauffements supplémentaires induits peuvent, à moyen terme, diminuer la durée de vie des machines tournantes, des condensateurs, des transformateurs de puissance et des conducteurs de neutre.

Des mesures dans un quartier résidentiel au Danemark ont montrées que les harmoniques sur le réseau étaient générées principalement par les charges non-linéaires (en particulier les téléviseurs), et non par les générateurs PV. Cependant, les onduleurs contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant. Plusieurs études le montrent :

- Les onduleurs fonctionnent le plus souvent à puissance réduite, et un appareil fonctionnant à puissance réduite ne peut fournir la même qualité de courant qu'à puissance nominale et crée plus d'harmoniques

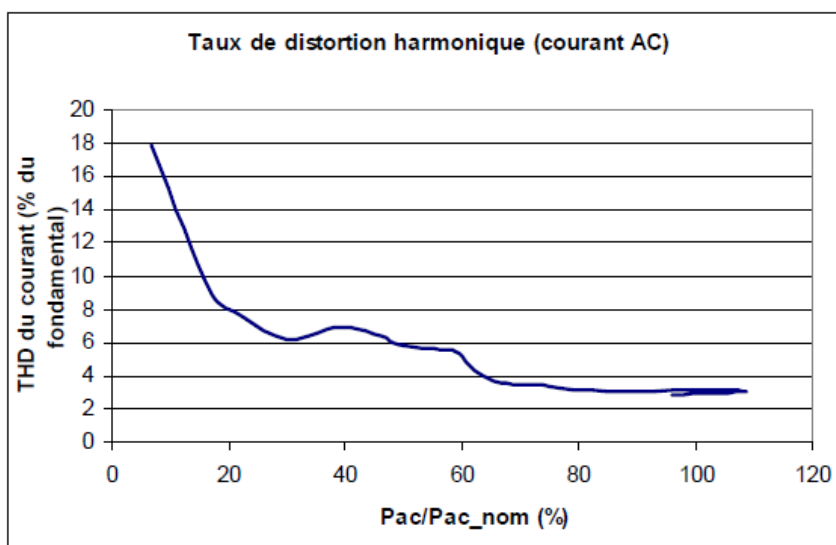


Figure I.4 : Exemple de THD à haute et basse puissances pour un onduleur type du marché [14]

- D'autres études montrent que la multiplication des onduleurs sur le réseau peut augmenter les harmoniques quand les onduleurs sont de même type alors que des onduleurs de types différents tendent à atténuer les harmoniques générés. Ceci s'explique par le dispositif de détection de perte du réseau amont qui nécessite, dans certains cas, une mesure de l'impédance du réseau. Celle-ci est réalisée en injectant, de manière cyclique, un pic de courant et en analysant la variation de tension résultante. Lorsque les onduleurs sont de même type, les pics de courants peuvent s'additionner et augmenter le taux d'harmoniques de courant.
- Des harmoniques ont été observées avec des onduleurs dont le condensateur d'entrée avait une capacité de valeur élevée, créant une résonance sur les lignes électriques. Cela a été observé sur un site, pendant les périodes de forte production PV. Un changement d'onduleur avec une capacité moindre valeur a résolu le problème.

I.2.5 Injection de courant continu [14] [24]

Une étude réalisée en Espagne [14], s'est intéressée à l'injection de courant continu d'une douzaine d'onduleurs du marché européen en distinguant les onduleurs avec transformateur haute fréquence (HF), les onduleurs avec transformateur basse fréquence (BF) et les onduleurs sans transformateurs. Elle montre que tous injectent une composante continue dans le réseau, y compris les onduleurs avec transformateur basse fréquence (même si le niveau d'injection est notablement plus faible). Dans le cadre du projet DISPOWER [14], des mesures en laboratoire du niveau d'injection de courant continu de 12 onduleurs de puissance comprise entre 0,2 et 4 kW utilisant la technique MLI/PWM ont été réalisées. Ces tests ont montré que, même en présence d'harmoniques paires d'amplitude relativement élevées, la composante DC produite par les onduleurs restait inférieure à 600 mA dans tous les cas et,

dans 8 cas sur 12, elle était inférieure, voire très inférieure, à 100 mA. Les auteurs pointent aussi la diversité des normes et recommandations existantes sur le sujet et le besoin d'harmonisation.

Une autre étude intitulée « DC Injection into Low Voltage AC Networks », réalisée par l'Université de Strathclyde en Angleterre [14] mentionne par ailleurs que la présence de courants DC dans les réseaux de distribution peut :

- Affecter le bon fonctionnement des dispositifs de coupure différentiel ;
- Créer des dysfonctionnements des compteurs d'énergie, (en ajoutant que des études complémentaires sur ce point seraient nécessaires) ;
- Affecter la durée de vie des composants du réseau notamment à travers une augmentation de leur corrosion.

Cette étude précise également que la présence de courant DC a également un fort impact sur le taux de distorsion harmonique pouvant aller jusqu'à une valeur de 40%, c'est à dire bien au delà des valeurs réglementaires. Enfin, toujours dans le cadre du projet DISPOWER, des tests ont été effectués sur l'influence de la composante DC sur le fonctionnement des transformateurs de distribution. La recommandation des auteurs est de garder la composante DC en dessous de 0,5 % du courant nominal de ces transformateurs.

I.2.6 Contribution aux courants de court circuit [22]

Dans le cas d'un court-circuit sur le réseau, le courant de court-circuit pourrait théoriquement être en partie apporté par le générateur PV, ce qui perturberait la détection du défaut par les dispositifs de protection prévus sur le réseau. Cette situation se présenterait plus particulièrement en bout de réseau, avec des lignes à forte impédance et une pénétration importante de PV.

En premier lieu les conséquences seraient principalement la mauvaise coordination du déclenchement des dispositifs de protection du réseau (fusibles et sectionneurs). De manière générale il est tout de même considéré que la contribution du PV au courant de court circuit est limitée par construction (choix des IGBT) du fait de la faible différence (10- 20%) entre le courant de court circuit fourni par l'onduleur et son courant nominal. Ces conclusions pourraient être à revoir si les onduleurs étaient équipés à l'avenir de fonctions additionnelles telles que le support à la tension du réseau.

I.2.7 Impact du PV sur les pertes dans les réseaux de distribution

Une étude d'EDF R&D [14] a montré que la production décentralisée générerait une augmentation des pertes dans les réseaux de distribution. Mais lorsque l'on s'intéresse uniquement à la part du PV dans ce résultat, on peut en déduire que globalement :

- Les fermes PV de plusieurs MW, généralement raccordées à partir de départs HTA dédiés, conduiraient à une augmentation des pertes ;
- Les installations PV de type résidentiel, plus proches des lieux de consommation, permettraient de réduire les pertes.

L'explication est simple. Les fermes PV de plusieurs MW nécessitent des constructions de nouveaux ouvrages (départs dédiés) et augmentent ainsi la longueur totale de lignes électriques. L'étude montre que la quantité de pertes générée dans ces nouveaux ouvrages est supérieure à la réduction des pertes au niveau du poste source. Le bilan conduit donc à une augmentation globale des pertes pour EDF.

En revanche, l'énergie produite par le PV résidentiel étant consommée quasiment sur place, elle contribue à réduire le transit d'énergie dans les réseaux BT et donc à diminuer les pertes pour EDF. Le scénario pris en compte pour cette étude est le suivant :

- 16 GWc de fermes éoliennes et 3.7 GW de cogénération, raccordés en HTA,
- 4 GWc de PV résidentiel raccordés en BT.

Si l'on ne considère que la part de production décentralisée raccordée en HTA, l'étude montre que les pertes augmentent de 887 GWh. Mais lorsque l'on tient compte du PV raccordé en BT, les pertes n'augmentent plus « que » de 647 GWh, soit 240 GWh de moins, à mettre au bénéfice du PV raccordé en BT. C'est pourquoi, si l'on substitue dans cette étude l'éolien à du PV, on peut en déduire que le PV raccordé en HTA aura pour effet d'augmenter les pertes pour EDF alors que le PV résidentiel contribuera à leur diminution.

I.3 Préconisations vis-à-vis des impacts du PV sur le réseau électrique interconnecté

I.3.1 Elévation du niveau de tension

a) Solution ne nécessitant pas de stockage d'énergie [14] [23]:

Au Japon où de fortes concentrations d'installations PV existent, les onduleurs ont également une fonction pour diminuer le productible lorsque l'élévation de la tension du réseau devient trop forte. Les onduleurs japonais commercialisés mesurent eux-mêmes la tension AC à leurs bornes ; si celle-ci dépasse un certain seuil (dit seuil de régulation de la sortie), l'onduleur réduit automatiquement sa puissance en diminuant le courant injecté de manière à éviter une surtension sur le réseau.

Dans ces conditions, le point de fonctionnement du champ PV sur la courbe caractéristique I-V est amené vers l'état de circuit ouvert.

b) Solution nécessitant un stockage d'énergie [9] [14] :

Au Japon, dans le cadre d'un important projet de recherche financé par le NEDO, environ 550 systèmes photovoltaïques d'une puissance moyenne de 3,85 kWc ont été installés en 2005. Un des objectifs de ce projet, nommé « Demonstrative research on clustered PV systems », a été de démontrer la possibilité de réguler la tension au point de livraison à une valeur de consigne. Pour ce faire, chaque système photovoltaïque a été équipé d'un parc de batterie d'une capacité de 4 700 Ah.

Ce projet a permis de dresser les conclusions suivantes :

- Un onduleur associé à un chargeur/déchargeur de batteries peut permettre de réguler activement la tension du réseau,

- La capacité du parc de batteries peut être diminuée grâce à l'augmentation de la qualité du contrôle de la charge et de la décharge de la batterie.

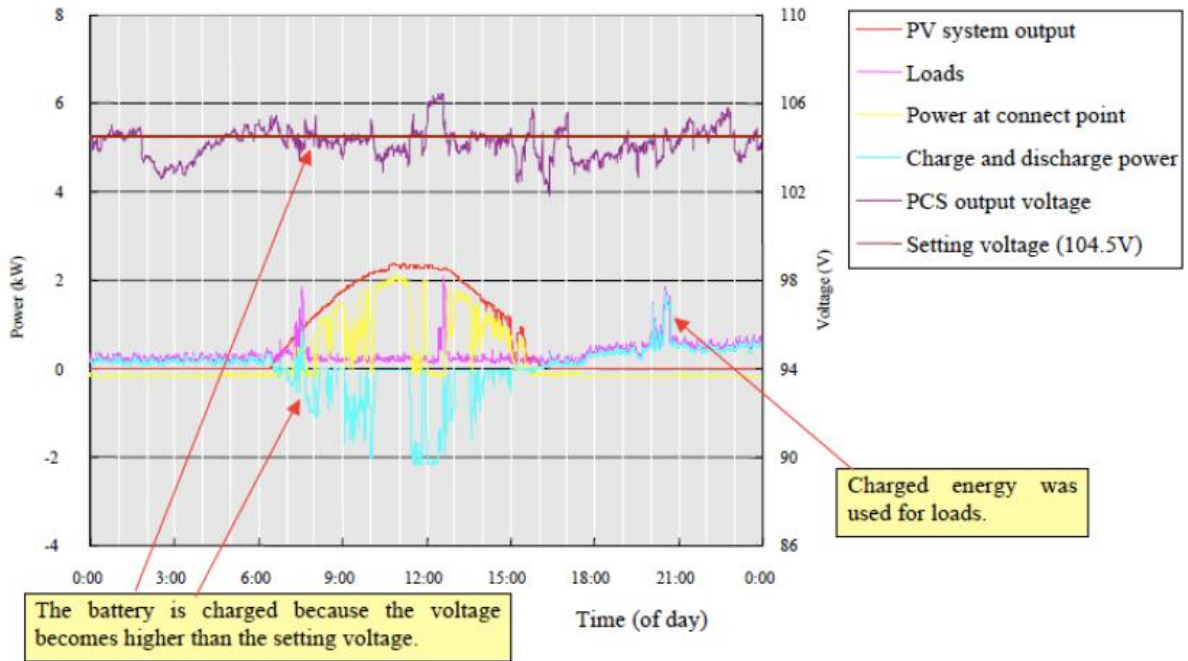


Figure I.5 : Régulation de la tension au point de raccordement grâce au pilotage de la charge et de la décharge d'une batterie [14]

- Sur le site de Wakkanai (Japon), le stockage permet de limiter les fluctuations de la puissance d'une installation photovoltaïque de 5 MW, comme le montre la figure suivante :

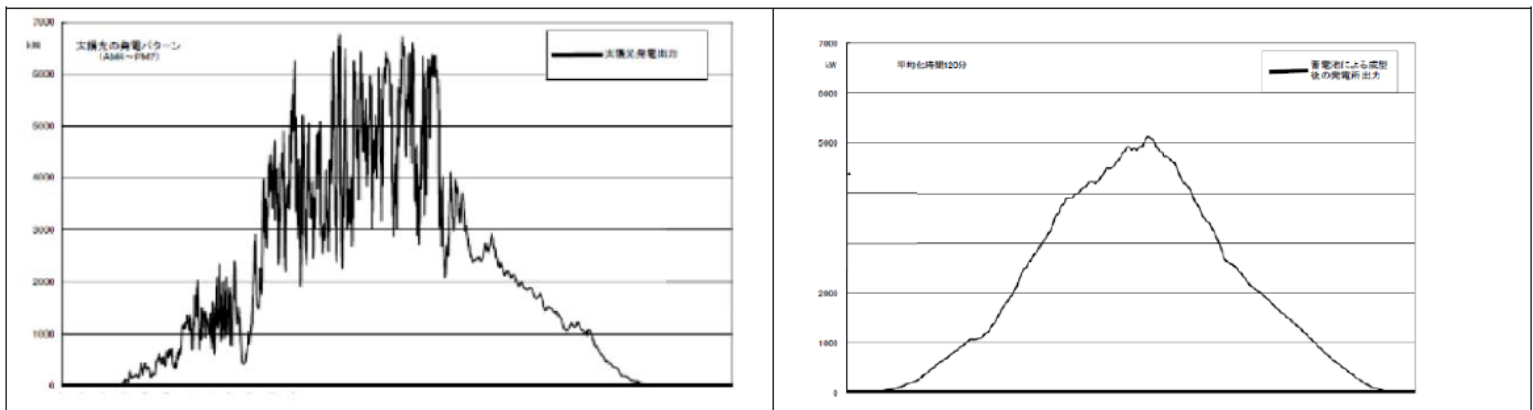


Figure I.6 : Atténuation des variations rapides de puissance grâce à du stockage sur le site de Wakkanai au Japon [14]

En complément avec cette technique de pilotage de charge et décharge de la batterie dans un système photovoltaïque, la mise en œuvre d'une commande à la fois robuste et

simple de la gestion de stockage d'énergie a été effectuée. Avant de présenter les résultats obtenus, on décrit brièvement le la conception du système de stockage à base de batterie Plomb-Acide.

Le système de stockage utilisé est composé d'un banc de batteries relié à un convertisseur réversible en courant ainsi que du système de control. Le système doit pouvoir permettre aux batteries soit de se charger lorsqu'il y a un excès d'énergie, ou bien de se décharger lorsque l'énergie produite est insuffisante pour alimenter la charge.

La batterie est connectée au bus continu à travers un hacheur Buck/Boos (Voir chapitre III.1), comme indiqué à la figure IV.7. La batterie sert à alimenter en puissance les besoins de la charge pendant une courte durée lors des fluctuations des irradianations ou encore les périodes de transitions. Le rôle principal du convertisseur de la batterie est de maintenir la tension V_{dc} aux bornes du bus continu égale à une valeur de référence $V_{dc_{ref}}$.

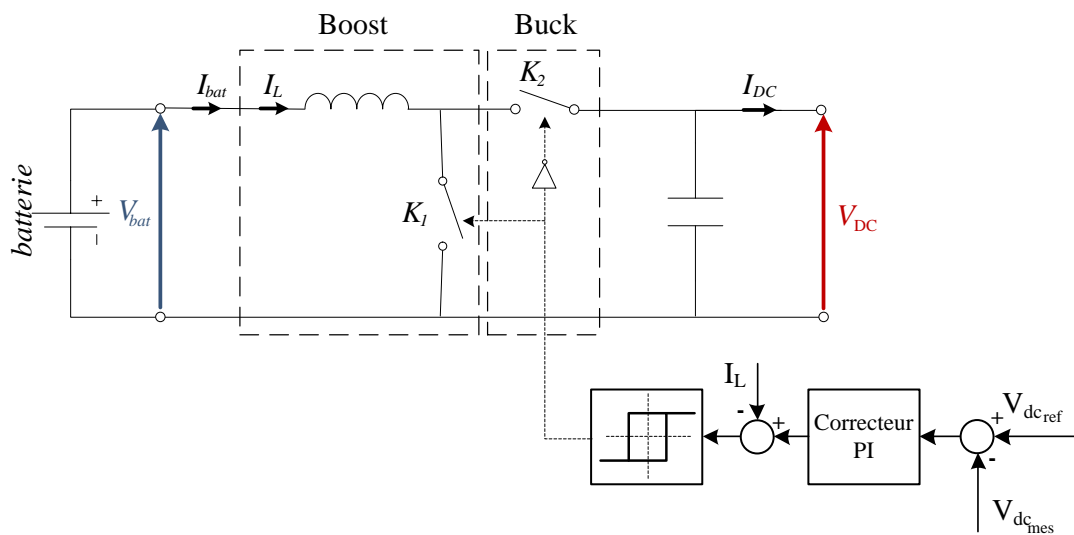


Figure I.7: Principe de la régulation du bus continu [9]

On utilise un régulateur PI pour assurer la régulation du bus continu de la batterie. Le correcteur PI génère un courant de référence qu'on va comparer avec le courant de la batterie, et grâce à un régulateur par hystérésis, on contrôle le rapport cyclique du hacheur réversible en courant.

Nous utiliserons la boucle de régulation suivante :

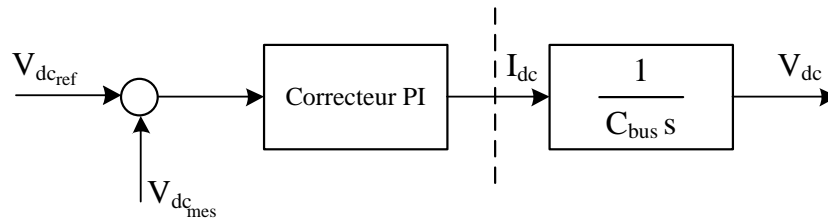


Figure I.8: Boucle de régulation de la tension du bus continu [9]

La fonction de transfert du régulateur est du type:

$$C(s) = K_p \frac{1 + sT_i}{sT_i}$$

Le principe de fonctionnement du système de stockage est comme suit : Lorsque la tension aux bornes du bus continu est inférieure à la tension de référence, le courant de référence généré par le régulateur PI est positif imposant ainsi une décharge de la batterie en actionnant l'interrupteur K_1 . Si la tension V_{dc} est plus grande que $V_{dc_{ref}}$, le courant de référence est négatif. L'interrupteur K_2 sera actionné permettant ainsi à la batterie de se charger.

- **Résultats de simulation**

On a considéré pour cette simulation une installation PV autonome composée de : module PV, hacheur Buck-Boost, étage MPPT, une Batterie plomb-acide, un régulateur de charge/décharge et le bus continu) dans des conditions de 1000 W/m^2 et 25°C pour une charge variable. La puissance nominale du panneau étant de 230 W . Les paramètres du régulateur sont déterminés de manière automatique à l'aide de l'outil Simulink afin d'obtenir un bon compromis entre efficacité et dynamique du système. La tension du bus continu ayant été fixée à 50V .

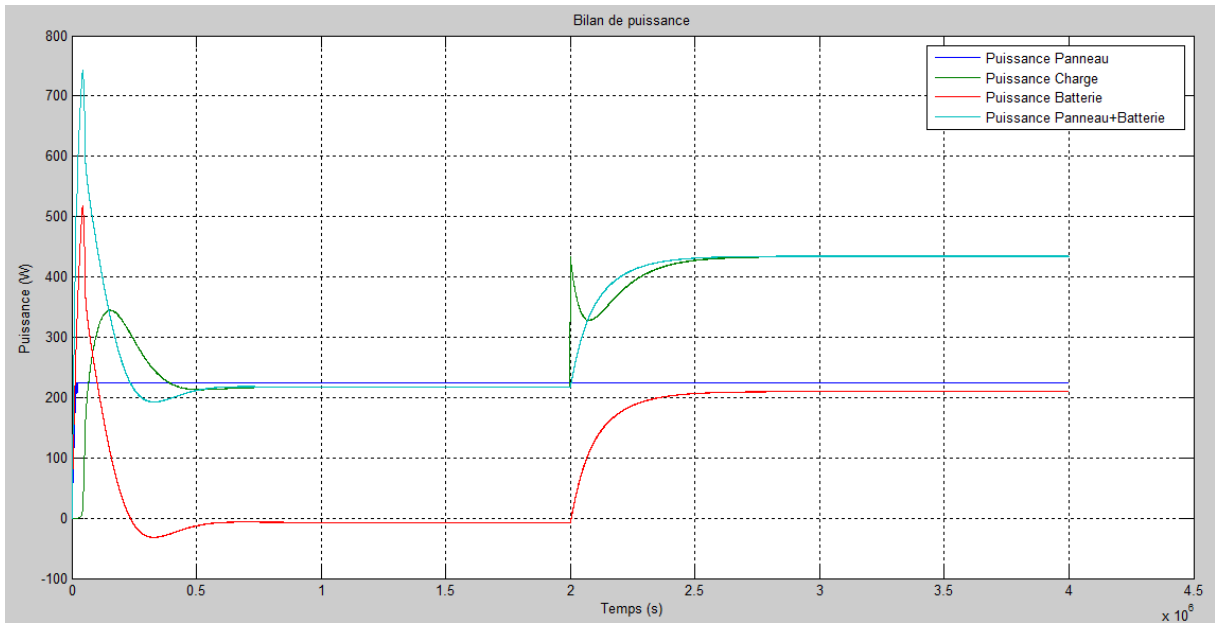


Figure I.9: Variation des Puissances en fonction de la charge

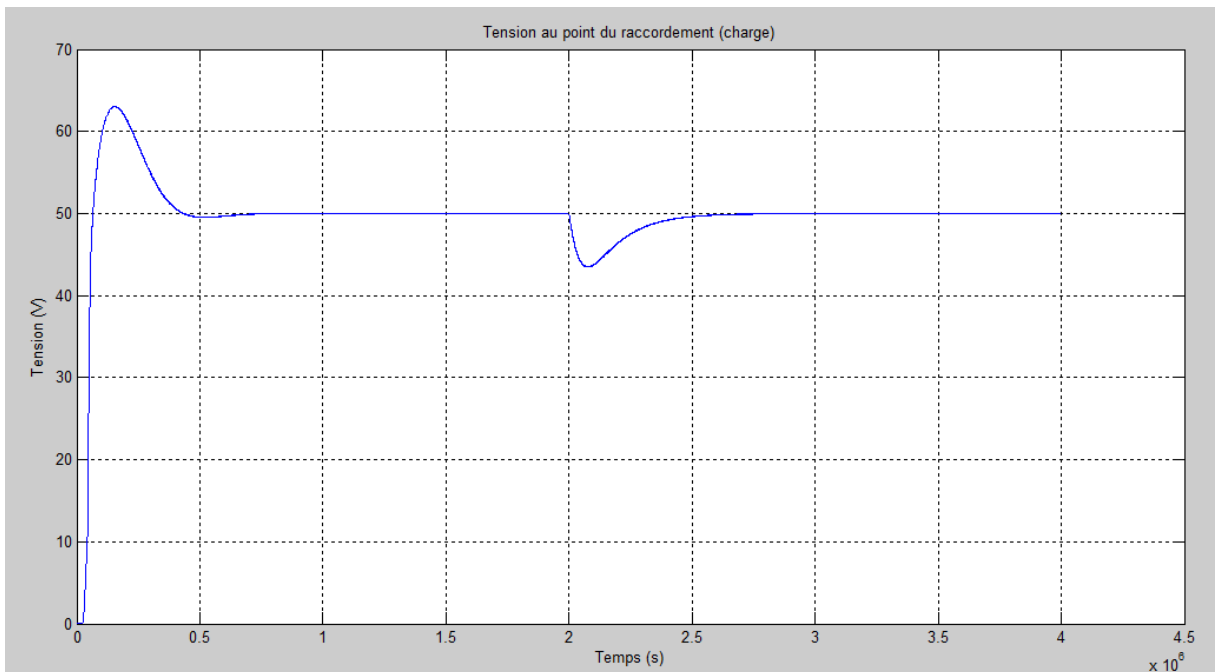


Figure I.10: Tension du bus continu

À partir des figures I.9 et I.10 et on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le système de gestion de stockage mis au point par un système de régulation simple et robuste a permis d'assurer la continuité de l'alimentation de la charge. Et ce dans les deux cas : Quand la puissance fournie par le panneau est suffisante pour alimenter la

batterie, l'excédent de l'énergie permet de charger la batterie. Si l'énergie fournie par le module PV est insuffisante pour couvrir le besoin en énergie de la charge, l'intervention rapide de la batterie pallie ce manque en se déchargeant avec rapidité.

- Tension du bus continu : La gestion de la charge et décharge de la batterie assurée par système de régulation simple et robuste permet de fournir une tension constante aux bornes de la charge. Une légère fluctuation survient lors du changement de mode de la décharge de la batterie vers la charge mais elle est rapidement régulée.

I.3.2 Bosses de tension

Il est proposé que les onduleurs intègrent une fonction de supervision de la tension AC afin de limiter la durée de ces surtensions en déconnectant l'onduleur dès détection de dépassement d'un seuil.

I.3.3 Harmoniques de courant [14] [22]

Plusieurs onduleurs commerciaux sont déjà équipés d'un dispositif de filtrage actif des harmoniques, mais peu l'implémentent de manière efficace. Un système de filtrage actif du THD a été testé sur une installation de 5 MWc composée de 13 onduleurs de 400 kVA située en Allemagne près de Leipzig.

Les observations effectuées montrent, qu'en présence d'un système de filtrage actif, le THD de la tension peut être diminuée lorsque l'onduleur est en phase de production. L'onduleur permet donc d'effectuer un filtrage actif des harmoniques.

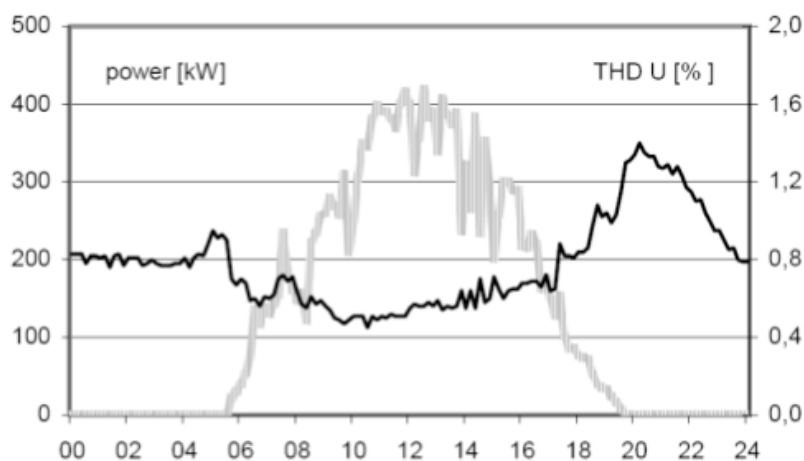


Figure I.11 : Mise en évidence du filtrage actif des harmoniques avec la baisse du THD en phase de production de l'onduleur [14]

La mise en œuvre d'un filtre parallèle actif raccordé au réseau et commandé par un onduleur permet de :

- Eliminer les harmoniques de courant générées par les charges non linaires de la chaîne de production PV.
- Compenser l'énergie réactive consommées par les différentes charges présentes dans une chaîne de production PV.

Cela permettrait d'une part de répondre aux exigences des clients et consommateurs en termes de qualité d'énergie, et d'autre part, de respecter les normes liées à la qualité de l'énergie fournie par les différents producteurs d'énergie et gestionnaires du réseau électrique (THD toléré, rang d'harmonique toléré, etc.)

I.3.4 Injection de courant continu

Selon La norme CEI 61727, le système PV ne doit pas injecter de courant continu d'une valeur supérieure à 1 % de celle du courant de sortie assigné de l'onduleur dans l'interface en courant alternatif de raccordement au réseau dans toutes les conditions de fonctionnement. Un transformateur d'isolement peut être utilisé pour satisfaire cette exigence.

Quelle valeur maximale de la composante DC injectée sur le réseau doit donc être retenue par onduleur et par installation photovoltaïque ? La réponse n'étant pas immédiate à ce jour, des recherches complémentaires sur ce point sont en cours [14].

I.3.5 Courant de court-circuit

Même s'il est considéré que la contribution du PV au courant de court circuit est limitée par construction, ce point doit être surveillé si les onduleurs subissent des modifications des structures dans l'avenir. Des études visant à déterminer l'apport en PCC qu'un système PV doit fournir au réseau doivent être menées [14].

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes contraintes liées au raccordement d'une chaîne de production PV au réseau électrique interconnecté. Etant donné l'importance de quelques contraintes parmi d'autres, on a développé celle rencontrée lors de l'élévation de la tension dans le réseau en présentant un modèle efficace de gestion de stockage d'énergie garantissant une tension constante au point de raccordement. Quant à l'autre contrainte en l'occurrence la pollution harmonique provoquée par les systèmes photovoltaïque, elle sera traitée dans le dernier chapitre.

Chapitre II

Conception d'un Filtre parallèle actif commandé par hystérésis

De plus en plus de récepteurs électriques, dans l'industrie, le tertiaire et même le domestique, sont des charges polluantes (non linéaires). Ils absorbent des courants non sinusoïdaux et ceux-ci, compte tenu des impédances de circuits, déforment l'onde sinusoïdale de la tension et entraîne la dégradation de la qualité de l'énergie. C'est la perturbation harmonique des réseaux. Le chapitre précédent a mis en évidence cette contrainte rencontrée lors du raccordement d'une chaîne de production PV au réseau électrique. En effet, la pollution harmonique demeure préoccupante que ce soit pour les distributeurs de l'énergie électrique ou pour les utilisateurs.

En comparaison avec les solutions classiques de dépollution, tels que le surdimensionnement des installations ou le filtrage passif, le filtrage actif est considéré par les spécialistes des réseaux comme étant la solution avant-gardiste pour filtrer les harmoniques. C'est une solution séduisante, souple, car auto-adaptative, qui peut être utilisée dans de nombreux cas en complément ou à la place d'autres remèdes. Le principal objectif de ce chapitre est de mettre en évidence les performances de l'un des types de ces filtres actifs, dans l'élimination des courants harmoniques et la compensation de l'énergie réactive, à savoir *le filtre actif parallèle*. Les résultats de simulation d'un système de filtrage actif parallèle utilisant un onduleur à deux niveaux commandé par hystérésis seront présentés à la fin de ce chapitre.

II.1 Introduction

Pour des installations électriques existantes, les filtres actifs parallèles sont à ce jour les solutions avancées de dépollution les plus adéquates. Actuellement, les solutions actives sont celles qui répondent au mieux aux contraintes de la production et de la distribution. Leur réponse est instantanée et elles s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations induites par les charges du réseau électrique. Que ce soit dans le secteur industriel, tertiaire ou domestique, les filtres parallèles actifs (FAP) s'insèrent facilement dans un réseau distribution électrique sans imposer un aménagement des installations du fournisseur d'énergie ou du consommateur [15].

Le filtre actif parallèle, appelé aussi compensateur shunt, est connecté en parallèle sur le réseau électrique. Il est dimensionné uniquement par rapport à la puissance due aux harmoniques absorbées par la charge polluante. Son indépendance totale par rapport à la source et à la charge lui confère des propriétés avantageuses : auto-adaptabilité, fiabilité et efficacité.

Ainsi pour cette étude, c'est le filtre actif parallèle qui a été retenu car il répond principalement à la problématique des harmoniques de courant qui est la plus cruciale actuellement notamment pour un éventuel raccordement d'une chaîne de production PV au réseau. Et ce en restant simple à la mise en œuvre et offre de très bonnes performances.

Ce chapitre sera décomposé en trois parties. Dans une première partie, nous abordons le principe du fonctionnement de ce type de filtres actifs, dans la seconde partie nous étudierons d'une façon générale sa structure générale en présentant la partie puissance ainsi que la partie contrôle-commande. La dernière partie sera consacrée à une simulation réalisée à l'aide du logiciel MATLAB 12.0 accompagnée d'interprétations et commentaires sur les résultats obtenus.

II.2 Principe de fonctionnement [15] [17]

L'objectif de la mise en œuvre d'un filtre parallèle actif est de minimiser voire annuler au point de raccordement les harmoniques de courant. Il est donc équivalent à une source de courant commandée, placée en parallèle avec la charge non linéaire et qui permet d'injecter sur le réseau la somme des courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux générés par cette charge non linéaire (Voir figure V .1)

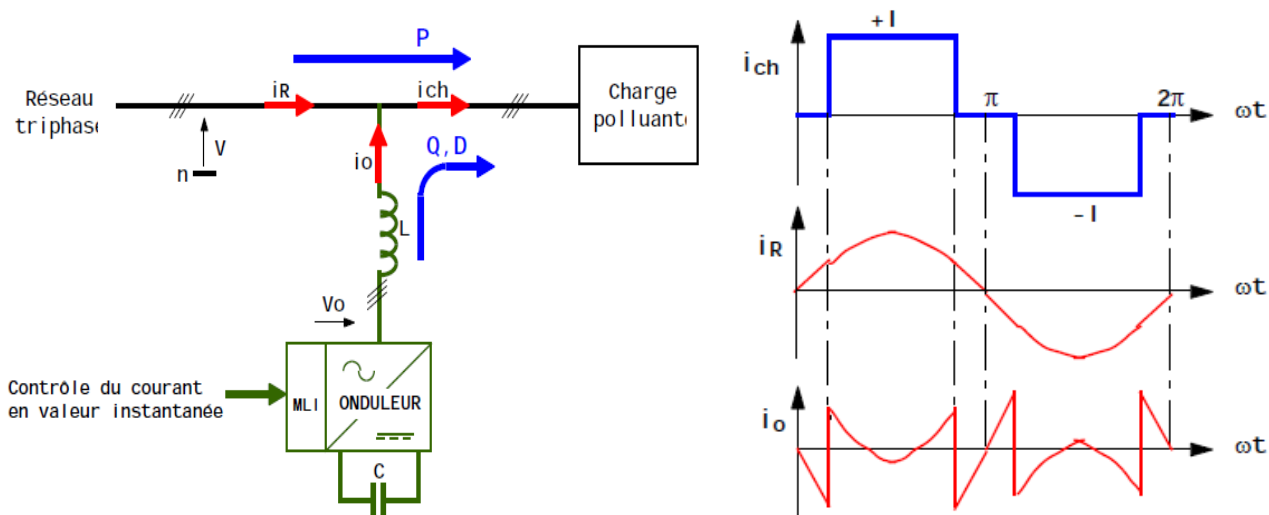


Figure II.1 : Principe de fonctionnement d'un compensateur shunt [17]

Relations fondamentales : $i_{ch} = i_R + i_o$ (1)

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{V_o - V}{L} \quad (2)$$

Sous réserve que le dispositif soit apte à injecter à tout instant un courant dont chaque composante harmonique est de même amplitude que celle du courant dans la charge, et de phase opposée, alors la loi de sommation des courants (voir Figure II.1) garantit que le courant fourni par la source est purement sinusoïdal.

Le filtrage actif parallèle constitue donc une source de courant indépendante de l'impédance du réseau et qui présente les caractéristiques intrinsèques suivantes :

- Sa bande passante est suffisante pour garantir la suppression des composantes harmoniques majoritaires (en terme statistiques) du courant de la charge. Typiquement, nous considérons que la plage $H_2 - H_{23}$ est satisfaisante ; car plus le rang est élevé, plus le niveau de l'harmonique est faible ;
- Son temps de réponse est tel que la compensation harmonique soit effective non seulement en régime établi, mais encore en régime transitoire « lent » (quelques ms) ;
- Sa puissance permet d'atteindre les objectifs de dépollution fixés, ce qui ne signifie pas nécessairement la compensation totale et permanente des harmoniques générés par la charge.

Sous réserve que ces trois objectifs soient simultanément atteints, alors le filtrage actif parallèle constitue un excellent dépollueur car auto-adaptatif et ne présentant aucun risque d'interaction avec l'impédance réseau.

Par ailleurs, ce filtre peut être décomposé en deux parties : la partie *puissance* et la partie *commande*. La première comporte un onduleur, un élément passif qui lui sert de source d'énergie et un filtre de découplage (ou filtre de sortie) reliant l'onduleur au réseau.

Ces deux derniers éléments déterminent la nature du filtre actif (structure tension ou courant) suivant qu'il est réalisé à l'aide d'un onduleur de tension ou de courant. En effet, l'onduleur peut être commandé en courant ou en tension et peut donc se comporter comme une source de tension ou de courant vis-à-vis du circuit extérieur. En pratique, suivant le type de correction à apporter au réseau, une structure sera préférée à l'autre si elle rend plus aisée et moins onéreuse la réalisation de l'ensemble convertisseur commande.

La source d'énergie composant le filtre peut être une source de tension ou de courant. Comme l'onduleur n'a pas à fournir de puissance active, cette source peut être un élément réactif, condensateur ou inductance, dans lequel on maintient constante la valeur moyenne de l'énergie stockée. Cet élément de stockage d'énergie n'a pas besoin d'être lui-même alimenté par une source continue. La raison est que le filtre actif parallèle peut être contrôlé de manière à suppléer aux pertes de sa source d'énergie à partir du courant fondamental généré par la source du réseau auquel il est connecté. Nous distinguons donc deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure à courant. Dans cette étude, nous nous intéressons uniquement au filtrage actif parallèle à structure tension.

La 2^{ème} partie en l'occurrence *contrôle-commande* du filtre actif parallèle tient compte de tous les éléments constituant la partie puissance ainsi que des harmoniques sur le réseau et permet d'actionner le circuit onduleur. Elle est constituée :

- De la méthode d'identification des courants perturbés ou harmoniques ;
- De la régulation de la tension continue appliquée à l'élément de stockage d'énergie ;
- De la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension
- De la commande de l'onduleur de tension.

II.3 Partie Puissance

L'onduleur utilisé est un onduleur à deux niveaux commandé par une MLI à hystérésis

- Il doit assurer la dynamique du réseau (D'une part, l'injection du courant harmonique par le FAP et d'une part, le courant harmonique de la charge)
- Il doit empêcher les composantes dues aux commutations des semi-conducteurs de l'onduleur de se propager dans le réseau.

On a utilisé dans cette simulation un filtre du premier ordre. Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature. Il est composé d'une inductance L_f et de résistance R_f . Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de découplage.

En effet, seule une valeur relativement de L_f peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant le premier critère. Cependant, une valeur faible de L_f permet à la majorité des composantes dues à la commutation de se retrouver coté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f va empêcher ces composantes de se propager dans le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera la qualité de compensation. Le bon dimensionnement du filtre du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du FAP.

II.4 Partie commande

II.4.1 MLI à bande d'hystérésis

La méthode de la bande d'hystérésis permet la commutation des interrupteurs du filtre actif lorsque l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne excède une amplitude fixée. Cette amplitude est communément appelée *fourchette* ou *bande d'hystérésis*. Comme illustré sur la Figure V.3 cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase. Dans ce cas, la fréquence de commutation ne peut être déterminée mais plutôt estimée.

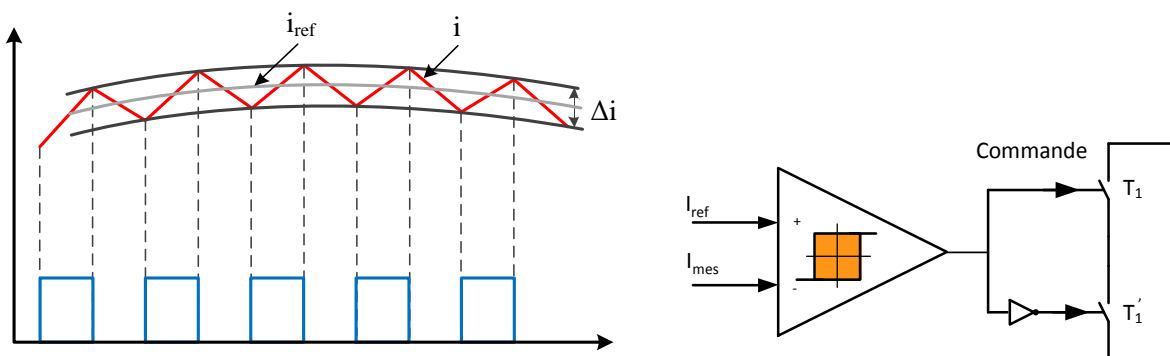


Figure II.3 : Modulateur MLI à bande d'hystérésis [16]

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon de façon à ce que l'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre $-H/2$ et $+H/2$ (c.-à-d. qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas. Par exemple, dans le cas d'un filtre actif parallèle, si l'erreur du courant généré se situe à l'intérieur de la bande, pas de réaction enregistrée de la part de la commande ; si l'erreur est trop élevée, la commande est positive et entraîne l'interrupteur à la fermeture. Par

conséquent, la tension générée est supérieure ou égale à zéro, condition nécessaire pour l'accroissement du courant. Analogiquement, lorsque le courant de sortie est trop élevé, ceci incite l'interrupteur à l'ouverture, donc la tension à être inférieure ou égale à zéro et ainsi le courant à décroître.

L'interaction entre les trois phases de l'onduleur constituant le filtre actif est un inconvénient. En effet, si la commande est positive dans l'une des phases dont l'objectif est d'accroître le courant, la tension s'accroît également sur cette phase, tandis qu'elle diminue dans les deux autres phases. Ceci peut être préjudiciable pour le contrôle du courant sur les deux autres phases. La commande par hystérésis est excellente dans la mesure où elle assure une bonne réponse de l'onduleur vis-à-vis des changements rapides des courants de référence, puisque les comparateurs à hystérésis ont une inertie et un retard négligeables [16].

II.4.2 la Régulation du courant injecté

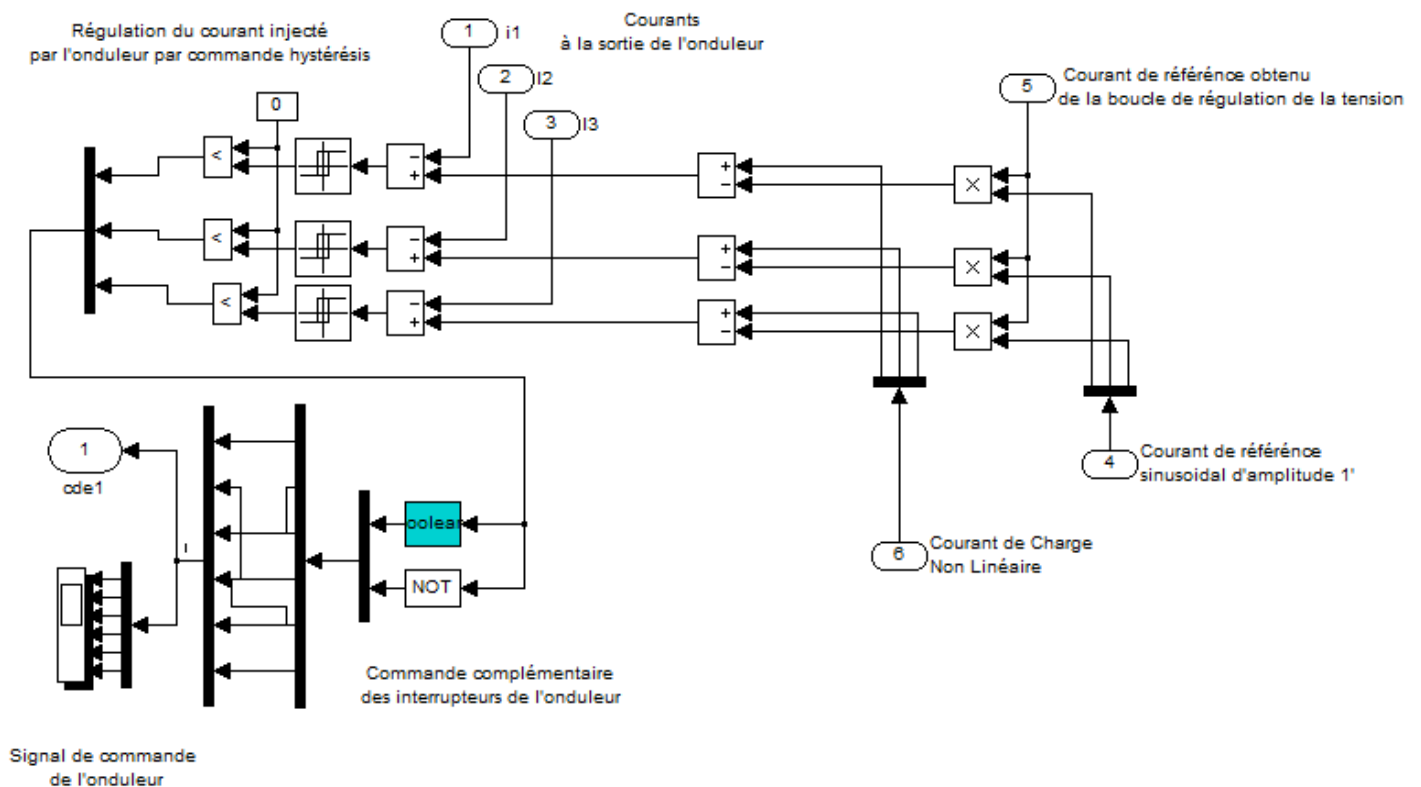


Figure II.4 : Boucle de régulation du courant de l'onduleur établi sous Simulink

Pour élaborer la boucle de régulation interne de l'onduleur, nous nous sommes basés sur le principe de la commande MLI par hystérésis (Voir II.4.1)

II.4.3 Régulation de la tension continue

Dans cette application, on s'intéresse au courant fournis par l'onduleur puisque la tension de sortie du filtre raccordé à l'onduleur est imposée par le réseau au point du raccordement (On

peut également utiliser un transformateur abaisseur connecté à l'onduleur). Néanmoins, on se doit de fixer une tension suffisante aux bornes du bus continu pour générer les deux niveaux tensions désirées ainsi que les courants souhaités. On a utilisé un régulateur de type P dont le paramètre K a été automatiquement choisi par l'outil Simulink.

II.5 Résultats de la simulation

Les paramètres du système de simulation sont les suivant :

Tension Réseau : 220 V (tension simple)

Filtre de sortie de l'onduleur : $L_f = 1 \text{ mH}$, $R_f = 5 \Omega$.

Tension de référence du bus continu : 800V

Impédance Réseau : $R_s = 0.001 \Omega$, $L_s = 1 \mu\text{H}$

Bande d'hystérésis de l'onduleur : 0.2 A

Impédance coté DC :

- 1^{ère} charge : $R_r = 50 \Omega$, $L_r = 0.1 \text{ H}$
- 2^{ème} charge : $R_r = 100 \Omega$, $L_r = 0.1 \text{ H}$

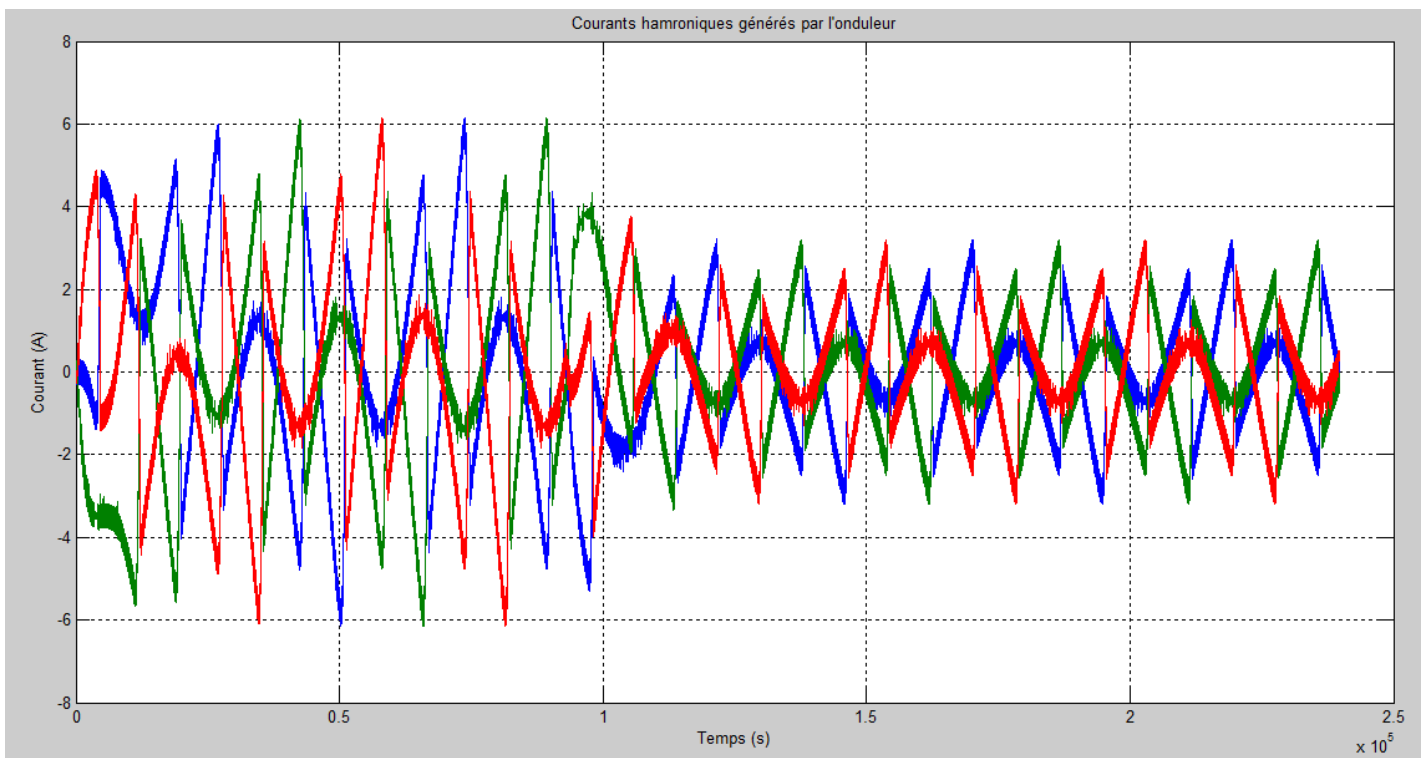


Figure II.5 : Courants harmoniques générés instantanément par l'onduleur avec une charge variable.

La figure II.5 présente les formes de courants générés par l'onduleur. On voit bien que la forme d'onde du courant injecté théoriquement par l'onduleur qui a été décrit dans la figure II.1 est identique ce qui prouve l'efficacité de cette commande. À l'instant $t=0.1$ s , on a introduit une charge supplémentaire au coté DC du redresseur (charge non linéaire) , on constate que l'onduleur a changé le courant de référence afin de diminuer le courant harmonique injecté de manière extrêmement rapide.

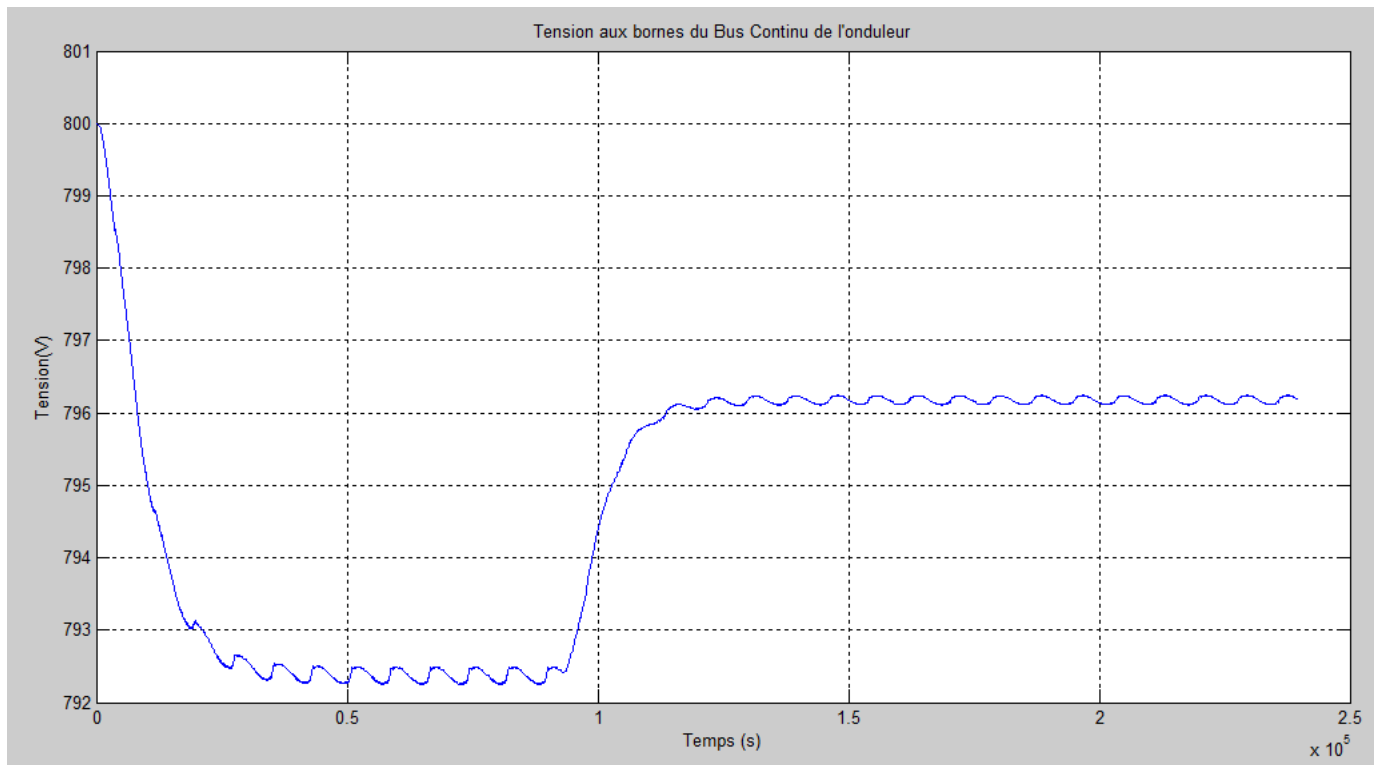


Figure II.6 : Tension aux bornes du Bus Continu de l'onduleur

La tension référence du bus continu de l'onduleur ayant été fixé à 800 V, on constate que le correcteur commet une légère erreur de l'ordre 7.5V pour la charge initiale , et 3.5V pour la seconde charge qui intervient à l'instant 0.1 s.

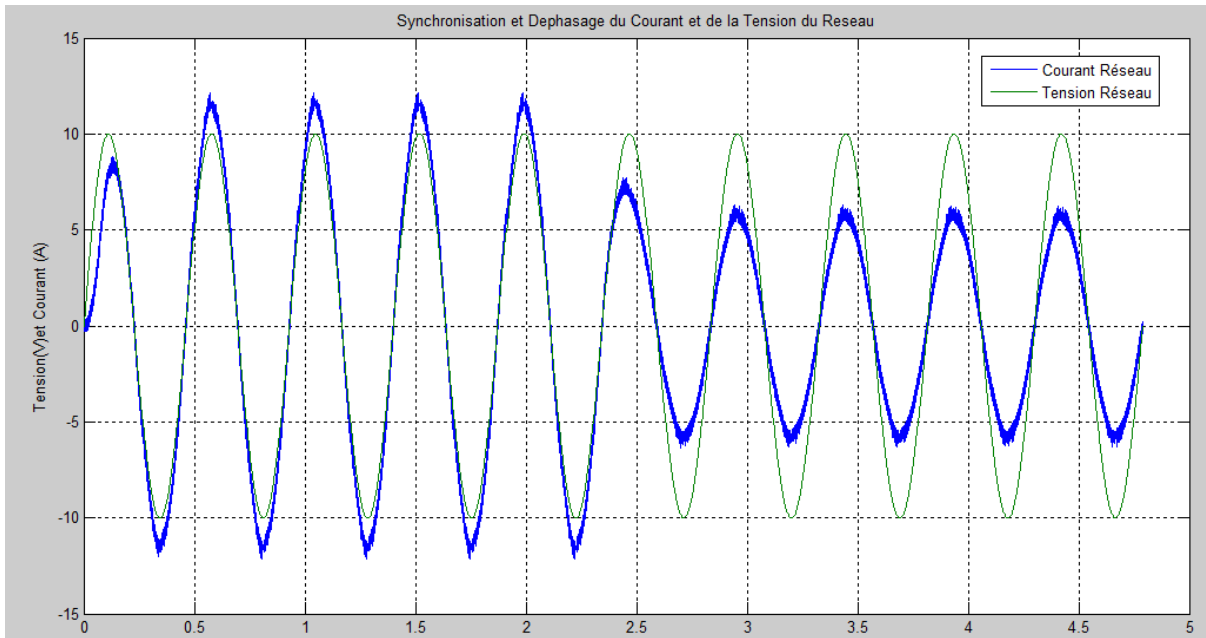


Figure II.7 : Synchronisation du courant injecté par l'onduleur et la tension du réseau

La figure II.7 présente la synchronisation de la tension du réseau et du courant transitant dans le réseau après le raccordement du FAP (fréquence et phase identique). Le système de contrôle-commande mis en place permet de maintenir la tension et le courant dans le réseau synchronisé en phase et en fréquence et ce quel que soit la charge du côté DC ou AC.

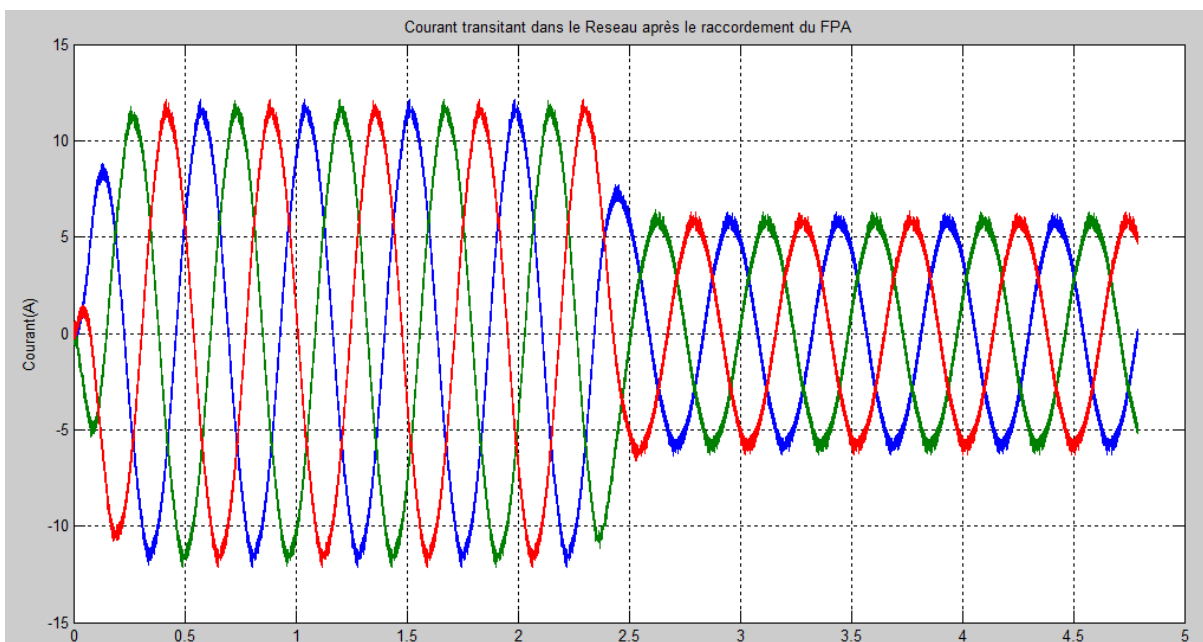


Figure II.8 : Courants transisant dans le réseau après le raccordement du FAP

Le courant transitant dans le réseau est parfaitement sinusoïdal comme le montre la figure II.8. On constate que même s'il y a une variation de charge dans le réseau, ou n'importe quel appel de courant, le filtre parallèle actif maintient le courant dans le réseau sinusoïdal. Par ailleurs, on observe une légère oscillation autour de la courbe du courant et c'est ce qui caractérise la commande MLI par hystérésis. En effet, la fourchette aperçue de l'oscillation dépend du circuit d'hystérésis utilisé. On a choisit une fourchette de 0.2A.

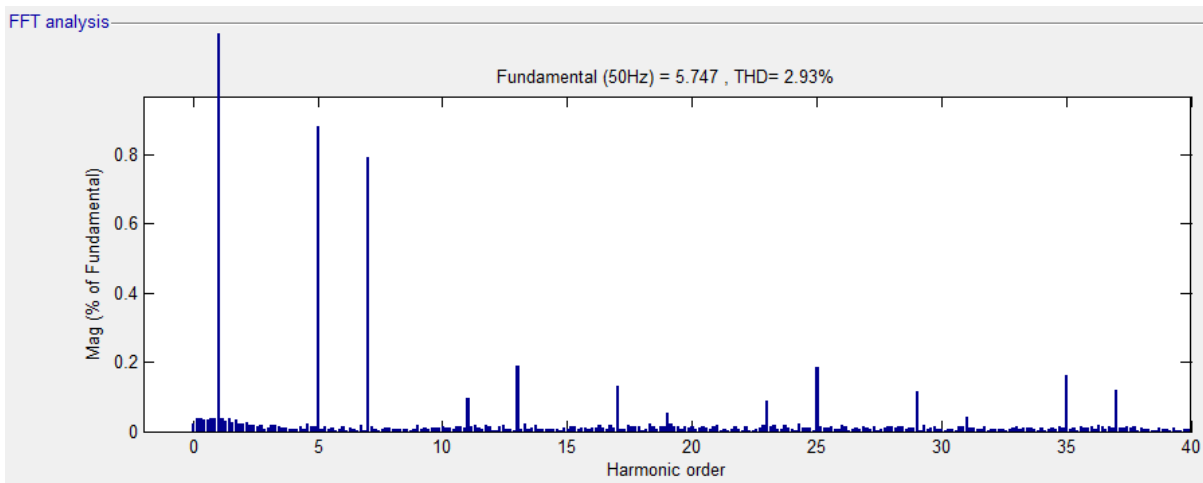


Figure II.9 : Analyse spectrale du courant transitant dans le réseau

L'analyse spectrale du courant transitant dans le réseau présente un assez bon THD (taux de distorsion d'harmoniques) de l'ordre de 2.93%. On aperçoit toutefois des amplitudes faibles des harmoniques de rang 5 (0.85% du fondamental) et de rang 7 (0.75% du fondamental).

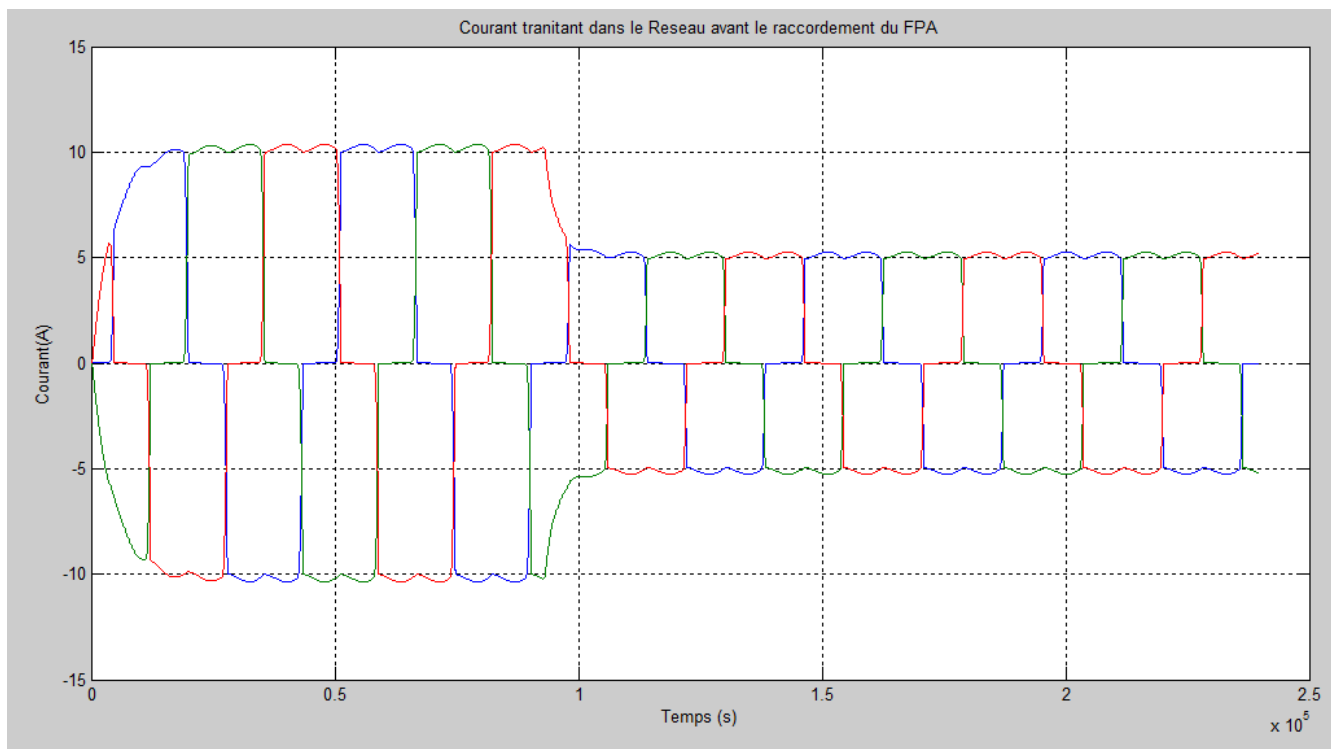


Figure II.10 : Courants pollués provoqués par la charge non linéaire
(Redresseur triphasé à diodes)

La figure II.10 présente la forme du courant pollué provoqué par la charge non linéaire .Son Analyse spectrale (Figure II.11) confirme la pollution du courant transiant dans le réseau avec un THD de l'ordre de 28.61%. On observe également des amplitudes non négligeables des harmoniques notamment de rang 5 (21% du fondamental) , de rang 7 (13% du fondamental).

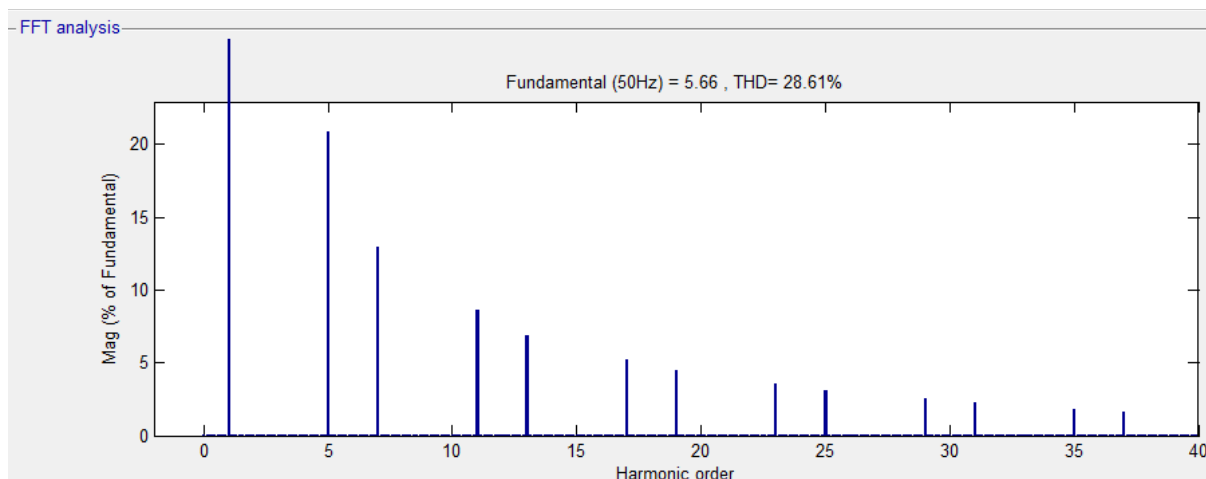


Figure II.11 : Analyse spectrale du courant pollué transiant dans le réseau avant le raccordement du FAP.

- **Bilan de puissance**

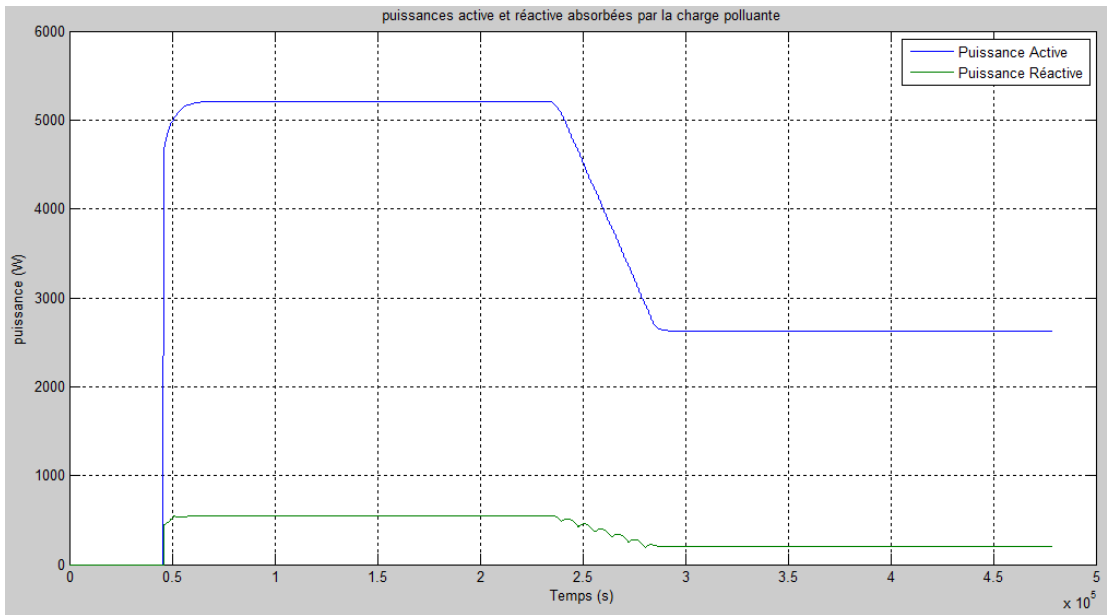


Figure II.12: Puissances active et réactive absorbées par la charge polluante

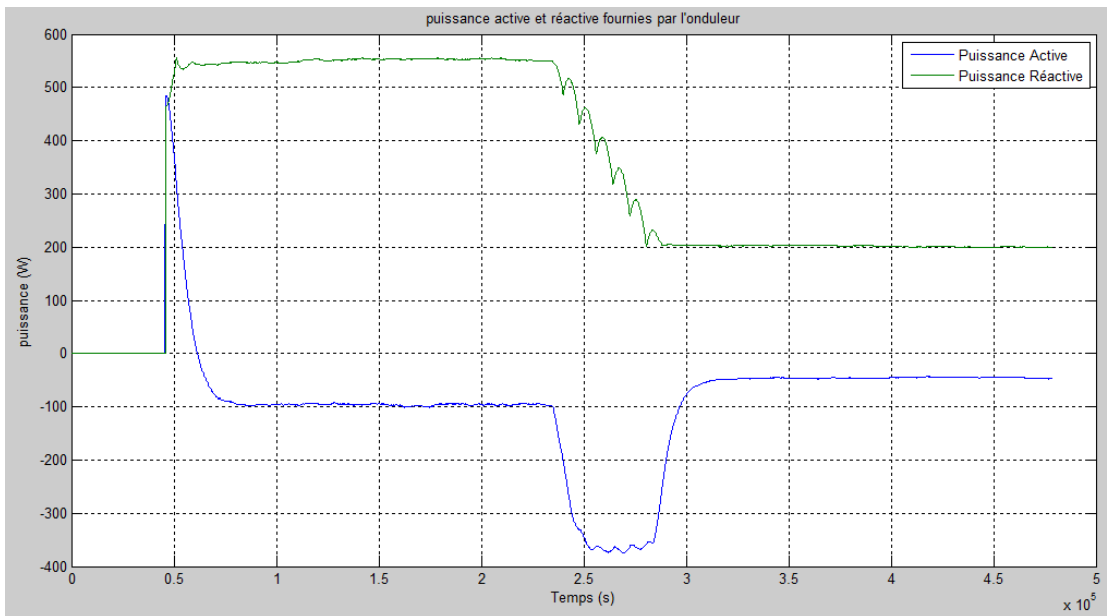


Figure II.13 : Puissances active et réactive fournies par l'onduleur

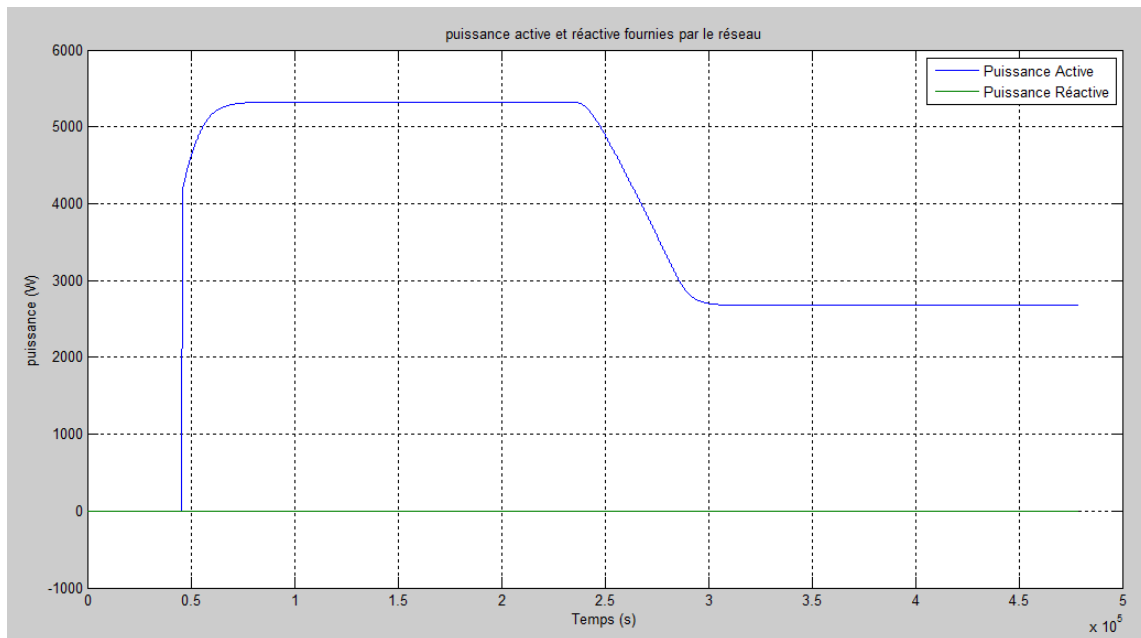


Figure II.14 : Puissances active et réactive fournies par le réseau

Les figures II.14 .13.12 présentent le flux d'énergie transitant dans le réseau. Le rôle du FAP ne se limite pas à réduire les harmoniques de courant uniquement, il permet de compenser l'énergie réactive absorbée du réseau par les différentes charges connectées au point de raccordement du FAP. En effet, on voit bien que l'énergie réactive fournie par le réseau est nulle. Le filtre parallèle actif fournit l'énergie réactive demandée par la charge non linéaire (550 Var pour la charge initiale) et (200 Var pour la seconde charge qui intervient à l'instant 2.4 s) . Par ailleurs, on observe une légère consommation de l'énergie active par le FAP (100W) qui est due aux différentes résistances des semi-conducteurs utilisés dans l'onduleur. Quant à l'énergie active requise par la charge, c'est uniquement le réseau qui la fournit.

Conclusions Générales et Perspectives

Le travail effectué dans le cadre de ce projet de fin d'études nous a permis d'étudier et de simuler le fonctionnement d'un système photovoltaïque connecté au réseau. On a donc, commencé par une présentation de l'état de l'art des multiples technologies associées aux constituants d'une chaîne photovoltaïque dans le but d'étudier le fonctionnement de ces systèmes.

Dans cette optique, nous avons apporté une attention particulière à l'élaboration des différents modèles des composants constituant le système. Les modélisations considérées ont été choisies de manière à simuler le fonctionnement de chaque équipement, en optant pour des modèles à la fois simples et performants.

Quant au chapitre IV, Il a été consacré à l'étude des contraintes rencontrées lors du raccordement au réseau d'une chaîne de production PV. En outre, on a décrit les différentes préconisations adoptées particulièrement en Europe et au Japon. On a développé l'une de ces contraintes techniques en l'occurrence l'élévation de la tension engendrée par une forte production photovoltaïque lors d'une faible consommation industrielle ou domestique, où on a présenté un système de stockage simple et fiable permettant d'assurer la gestion de l'énergie et le maintien d'une tension constante au point du raccordement au réseau.

Dans le dernier chapitre, nous avons mis l'accent sur la contrainte principale du raccordement d'une chaîne PV au réseau à savoir la pollution harmonique. Pour parer cette dernière, on a mis au point un filtre parallèle actif qui permet :

- D'obtenir un courant transitant dans le réseau parfaitement sinusoïdal avec un très faible THD ;
- D'assurer la synchronisation du courant et de la tension de réseau (en fréquence et en phase) ;
- De compenser l'énergie réactive soutirée du réseau.

Ce travail non exhaustif offre quelques perspectives que nous présentons ci-dessous :

- Le rendement maximal théorique des cellules de troisième génération obtenu en laboratoire tourne autour de 45%, ce qui fait rêver les industriels autant que les chercheurs. Les filières : multi-jonctions, organiques, et à concentration... représentent une importante piste à explorer afin de rentabiliser le photovoltaïque.
- Un travail approfondi pourra être consacré à l'étage de conversion entre les panneaux PV et le bus continu afin d'explorer de nouvelles structures de convertisseurs présentant des pertes moins importantes et donc des rendements plus élevés.
- Au niveau du stockage, la technologie lithium-ion est à l'heure actuelle prometteuse en raison d'une meilleure tenue en nombre de cycle ainsi que de meilleurs rendements annoncés en charge comme en décharge. Cette piste est intéressante à explorer notamment, pour les systèmes autonomes.
- Pour la production photovoltaïque connectée au réseau, les études actuelles prouvent que la rentabilité de cette dernière sera atteinte lors de l'association d'un système de stockage approprié et une bonne gestion de puissance qui assurera la constance de la puissance fournie.
- Quant aux contraintes liées au raccordement d'une chaîne de production PV au réseau, d'autres recherches sont en cours afin de parer à toutes les contraintes citées dans le chapitre IV pour voir un jour une contribution significative de l'énergie solaire photovoltaïque dans l'approvisionnement énergétique national et étranger.

Bibliographie

- 1 : Programme énergie CNRS GAT/PRI-5.1 « Gestion de l'électricité », LEG/INPG, 2011
- 2 : M. GUEZZANE Said Revue semestrielle «CREDEG» n°3 décembre 2011.
- 3 : M. Belhamel, Directeur du CDER « Algérie : De l'ambition pour un programme censé assurer la transition », lien :
http://www.kgnlephare.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2531&Itemid=53
- 4 : http://www.nealdz.net/index.php?option=com_content&view=article&id=150&Itemid=132&lang=fr
- 5 : B. MULTON « Production d'énergie électrique par sources Renouvelables ». Techniques de l'ingénieur base documentaire : généralités sur les réseaux électriques, thème : Réseaux électriques et applications, univers : Énergies.
- 6 : Ministère de l'énergie et des mines, Conception et réalisation SATINFO, Société du Groupe Sonelgaz : « Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique ».
- 7 : L.ABBASAN «Etude de la connexion d'une centrale photovoltaïque au réseau », Mémoire de magistère, 05/05/2011.
- 8 : A.Filloux, F.Dastot, « Intégrer les énergies renouvelables – Choisir, intégrer et exploiter les systèmes utilisant les énergies renouvelables », CSTB, Paris, 2010.
- 9 : A.Bisker et M.Chiri, « Etude et commande d'un système photovoltaïque en mode isolé et connecté au réseau », projet de fin d'études, ENP 2012.
- 10 : A .LABOURET, P.CUMUNEL, J .BRAUN et B.FARAGGI « Cellules solaires , la base de l'énergie photovoltaïque », 5^{ème} édition , ETSF Paris 2001.
- 11 : A.BOUHARCHOUCH et A.B.BOUABDALLAH « Etude et dimensionnement d'une centrale hybride photovoltaïque-éolienne », Projet de fin d'études, ENP 2010.
- 12 : I.VECHIU , « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, Université du Havre , Décembre 2005.
- 13 : E.SHELL, J.ROYER, T.DJIAKO, B.SADA « Le pompage photovoltaïque», Manuel de Cours Université d'Ottawa 1998.
- 14 : H. COLIN, C. DUVAUCHELLE , G. MOINE, Y. TANGUY, B. GAIDDON, T. TRAN-QUOC « Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension », Projet ESPRIT, Avril 2010.
- 15 : R.AMIR et F.AKKACHE « Filtrage actif d'harmoniques de courant d'un réseau électrique » Mémoire de post-graduation spécialisée, Février 2010, ENP, Alger.

16 : H.DJEGHLOUD, « Filtrage actif de puissance », thèse de doctorat , Constantine, décembre 2007.

17 : P.LADOUX et G.Ollé « Compensateur d'harmonique et de puissance réactive » Publication RESELEC 2002.

18 :D.MEEKHUN « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique », Thèse de doctorat, Université de Toulouse.

19: S.TALBI ET R.RIAH « Comparaison et Synthèse d'un nouvel algorithme robuste pour une chaine de production photovoltaïque », Projet de fin d'études, ENP, juin 2011.

20 : R.DRARINI et Z.OUAHRANI « Commande d'un aérogénérateur à base d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau à travers un convertisseur AC-DC-AC », mémoire de fin d'études, ENP , 2009.

21: M.ADOUANE « Etude et conception d'une stratégie de commande d'un onduleur connecté au réseau électrique », Mémoire de magister, ENP, 2008.

22 :F.CHERFA « Etude et réalisation d'une centrale photovoltaïque connectée au réseau de distribution électrique BT » Mémoire de magister, ENP,2004

23 : Y. RIFFONNEAU, F. BARRUEL ET S. BACHA « Problématique du stockage associé aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau » Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 407 – 422, France.

24: S.ERIK « Fundamentals of Grid Connected Photo-Voltaic Power Electronic Converter Design », Master Of Science In Energy and Environment, Norwegian University of Science and Technology, 2007.