

Introduction Générale

La prolifération de l'emploi des charges non linéaires, notamment les convertisseurs statiques, durant les 30 dernières années, a significativement stimulé la propagation et le déploiement des harmoniques dans les systèmes électriques de puissance.

Comme ces charges sont indispensables pour différents besoins domestiques et industriels (alimentations à découpage des micro-ordinateurs, alimentations sans interruption, les différents montages en pont utilisés surtout dans les systèmes à haute tension continue "HVDC", les démarreurs électroniques, les équipements à dispositifs à commutation cyclique, les équipements médicaux, les différentes protections intervenant contre les anomalies du réseau, etc...), de nombreuses recherches ont été lancées, ayant pour objectif de trouver une solution définitive aux problèmes engendrés par les harmoniques (augmentation du taux de distorsion harmonique "THD" des grandeurs électriques, dégradation du facteur de puissance, échauffements importants dans les transformateurs induisant des pertes considérables, vieillissement prématuré des batteries de condensateurs, interférences avec les circuits de télécommunication, etc...).

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-même (convertisseurs AC - DC à MLI). 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 .

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.

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. 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, c'est pour cela que ce travail a été consacré à l'étude d'un filtre actif constitué d'un onduleur de tension à deux niveaux commandé Par Hystérésis [AL-2002]. Le filtre actif parallèle peut être utilisé pour filtrer les courants harmoniques.

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 la définition du concept 'harmoniques' et à l'énumération des nombreux effets néfastes qu'ils engendrent.
- ✓ Un second chapitre consacré à l'exposition des différentes solutions proposées pour réduire les conséquences nuisibles des harmoniques.
- ✓ Un troisième chapitre concernant l'étude du cas spécial du filtrage actif parallèle à deux niveaux : Structure, Principe, Modélisation, Commande et Régulation.
- ✓ Un quatrième chapitre concernant à une simulation et interprétation des résultats,des commentaires.
- ✓ Et en termine avec une conclusion générale

Chapitre 1 Les harmoniques et ses effets sur les réseaux électriques

1.1 Introduction

L'utilisation croissante dans les appareils industriels ou domestiques de systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. Ces convertisseurs statiques apportent une souplesse d'utilisation, des fonctionnalités supplémentaires, une augmentation de la fiabilité, le tout avec un rendement élevé. De plus, avec la généralisation de leur utilisation les coûts de ces modules d'électronique de puissance ne cessent de baisser. L'inconvénient de ces dispositifs c'est qu'ils se comportent comme des charges non linéaires et absorbent des courants avec des formes d'ondes différentes des tensions d'alimentation. Dans ce cas, l'évolution des courants n'est pas liée directement aux variations sinusoïdales des tensions. Ces courants périodiques mais non sinusoïdaux circulent au travers des impédances des réseaux et donnent naissance à des tensions non sinusoïdales et des déséquilibres qui viennent se superposer à la tension initiale au point de raccordement. Ils peuvent générer aussi une consommation de puissance réactive. Ces perturbations périodiques régulières sont désignées comme des perturbations harmoniques. [1]

Ces perturbations ont des conséquences préjudiciables sur le bon fonctionnement des appareils électriques et ont des effets à la fois instantanés et à long terme. Il est donc important pour une installation donnée de savoir définir, analyser et quantifier les harmoniques. Dans ce premier chapitre, des notions élémentaires d'analyse harmonique, les origines et les conséquences de la pollution harmonique sont exposés.

1.2 Les Harmoniques

Ce sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impaires existent. Les principaux harmoniques présents sont le troisième, le cinquième, le septième et le neuvième.

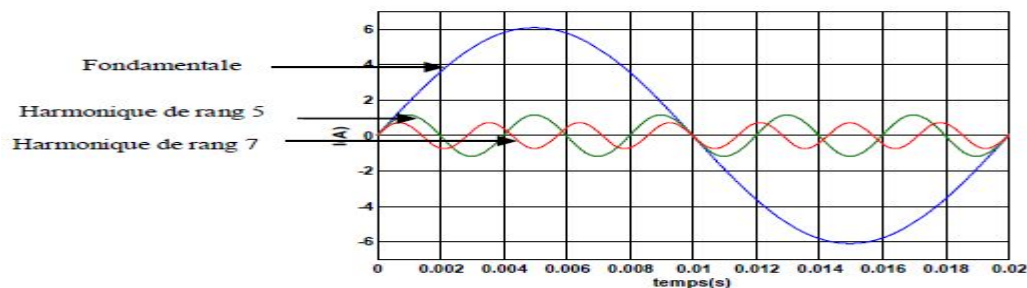


Figure 1.1 Décomposition d'un signal (fondamentale et harmoniques)

1.2.1 Source des Harmoniques

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique des réseaux électriques. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques.

Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et ainsi polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique.

1.2.1.1 Émission en tension

L'émission harmonique en tension due aux matériels de réseaux entre pour une faible part, et avec des taux généralement faible, dans la distorsion des réseaux. Elle est due aux imperfections de construction (dissymétrie, distribution non sinusoïdale du champ dans les alternateurs,

saturation des circuits magnétiques etc....) des bobinages des machines tournantes et des transformateurs.

a) Alternateurs

Les alternateurs des centrales de production fournissent une tension d'alimentation qui contient très peu d'harmoniques (< 0.5%). Le contenu harmonique de la tension générée par les alternateurs est lié à la qualité du bobinage et des pièces polaires qui assurent la forme sinusoïdale de l'onde. Sur un groupe électrogène, le taux de distorsion harmonique en tension est généralement inférieur à 5% à vide et inférieur à 1% lorsque le groupe électrogène débite à pleine puissance sur une charge linéaire.

b) Transformateurs

Les transformateurs peuvent être générateurs de tensions harmoniques lorsqu'ils fonctionnent en régime saturé. Sur les réseaux, le taux de distorsion harmonique en tension dû à ces appareils reste toujours faible.

c) Alimentations statiques interruptibles (ASI)

Ces dispositifs ont des performances très intéressantes pour la protection du matériel contre les creux de tension et les coupures. En revanche, ils ont parfois des limitations dans le domaine harmonique qu'il convient de connaître pour bien les maîtriser. En effet, le réseau protégé alimente généralement des charges non linéaires comme du matériel informatique.

Pour une ASI d'une puissance de 80KVA, le taux de distorsion harmonique en tension est inférieur à 4% pour une charge linéaire, est inférieur à 7% pour une charge non linéaire. En générale, le taux de distorsion harmonique en tension diminue avec l'augmentation de la puissance de L 'ASI. Il faut bien noter qu'en charge, le taux de tension harmonique est dû essentiellement aux courants harmoniques créés par les charges non linéaires qui sont alimentées par L'ASI.

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmonique pairs	
rang	$V_n(\%)$	Rang	$V_n(\%)$	Rang	$V_n(\%)$
5	6	3	5	2	2
7	6	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				

Tableau 1.1 Niveau de compatibilité des harmoniques en tension (CEI-1000-2-2)

1.2.1.2 Émission en courant

Les charges non linéaires consomment un courant qui n'est pas sinusoïdale. Elles représentent les principales sources d'émission en courants harmoniques sur les réseaux.

On peut distinguer quelque différents types des « charges perturbatrices élémentaires », et parmi ces charges on a :

- le redresseur triphasé à thyristors
- les charges non linéaires passives
- les appareils à arc électrique

a) Le redresseur triphasé à thyristors

Le redresseur triphasé à thyristors, en pont de Grétz, constitue l'un des montages de l'électronique de puissance les plus répandus dans le secteur industriel. Ils représentent 55% de la puissance des matériels électroniques. Les redresseurs triphasés à thyristors sont la principale source de pollution harmonique dans le secteur industriel.

b) Les charges non linéaires passives

On distingue trois types de charges passives non linéaires. Ce sont, d'une part, les lampes et les petits moteurs dans les secteurs tertiaire, domestique et industriel et, d'autre part, les fours à arc dans le secteur industriel.

c) Les appareils à arc électrique

Les appareils à arc électrique regroupent les fours à arc à courant alternatif, dont la puissance peut atteindre plusieurs dizaines de MW, et les machines de soudure à l'arc, à courant alternatif ou continu[2] .

Rang harmonique	Courant harmonique En % du fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2

Tableau1.2 Exemple de limitation des émissions de courants harmoniques

1.2.2 Conséquence néfastes des harmoniques

Les tensions et les courants harmoniques ont des effets indésirables et néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie de certains équipements électriques [3]:

- ✓ Alternateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et dans les amortisseurs liés à la circulation des courants harmoniques.
- ✓ Lignes : pertes ohmiques supplémentaires.
- ✓ Transformateurs : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet Joule et dans le noyau par courant de Foucault.
- ✓ Moteur à courant alternatif : pertes supplémentaires dans le fer et dans les enroulements plus-réchauffement du moteur.

1.2.3 Grandeurs Caractéristique

a) Grandeur harmonique

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation du grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental [4].

b) Rang d'harmonique

C'est le rapport de sa fréquence f_n à celle de la fondamentale (généralement la fréquence industrielle, 50 ou 60 Hz) :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (1.1)$$

Par principe, le fondamental f_1 a le rang un [5].

c) série de Fourier

Ceci revient à dire que : (tout signal périodiques de période $T = \frac{1}{f}$, peut se décomposé en

une somme infinie des termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f)

Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)) \quad (1.2)$$

la valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$.

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int_0^T s(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (1.3)$$

$$b_n = \left(\frac{2}{T}\right) \cdot \int_0^T s(t) \cdot \sin(n\omega t) dt \quad (1.4)$$

De plus, il existe quelques pré-requis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- ✓ si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_0 est nulle.
- ✓ si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls.
- ✓ si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls.
- ✓ si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls [5]

d) Valeur efficace d'une grandeur alternative

L'expression usuelle de la valeur efficace calculée à partir de l'évolution temporelle du grandeur alternative $Y(t)$ et identique a celle de l'expression calculée à partir de son contenu

$$\text{harmonique : } Y_{eff} = \sqrt{\int_0^T \frac{1}{T} Y^2(t).dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_N^2} \quad (1.5)$$

1.2.4 Spectre d'harmonique (de fréquence)

C'est la représentation de l'amplitude des harmoniques en fonction de leur rang, la valeur des harmoniques étant généralement exprimée en pourcentage du fondamental par un histogramme.[5]

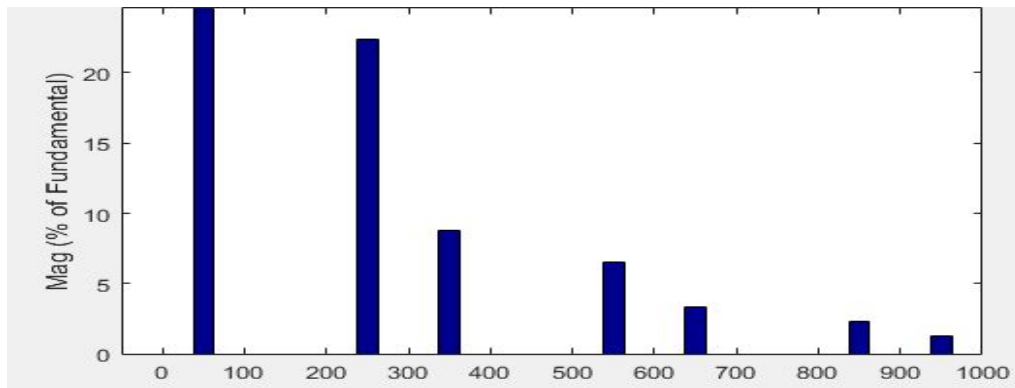


Figure 1.2 Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.

1.2.5 Taux de distorsion d'harmonique

Le taux de distorsion harmonique THD est un facteur très important dans la détermination de la pollution et de la dépollution harmonique il s'exprime par:

$$THD(\%) = 100 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \frac{C_k^2}{C_1^2}} \quad (1.6)$$

Où :

C_k : représente la composante harmonique de rang k.

C_1 : représente la composante fondamentale.

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz, ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténuées par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus, les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend généralement de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50 [6].

Deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

- Le taux de distorsion harmonique en courant, noté **THDI**.
- Le taux de distorsion harmonique en tension, noté **THDV**.

a) Taux de distorsion harmonique en courant THDI

Les harmoniques augmentent le courant efficace, ce qui conduit à :

- ✓ une augmentation des pertes, donc la réduction du rendement,
- ✓ des surcharges et échauffement,
- ✓ des risques de détérioration du courant (il ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge).

Le THDI traduit la déformation du courant. Pour cela, il doit être fortement réduit afin de limiter les effets des courants harmoniques.

Le taux de distorsion harmonique du courant s'exprime sous la forme :

$$THDI(\%) = 100 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_{ck}}{I_{c1}} \right)^2} \quad (1.7)$$

Différents taux de distorsion en courant sont proposés dans le tableau (1.3) [7].

Charge non linéaire	THDI(%)
Variateur de vitesse	80
Alimentation de micro-ordinateur	70
Tubes fluorescents	>100

Tableau 1.3 THDI pour diverses non linéaires

b) Le taux de distorsion harmonique de la tension THDV

La distorsion harmonique de la tension peut être définie comme étant le produit du courant harmonique et l'impédance à travers laquelle il circule. Cette distorsion est susceptible d'atteindre des valeurs élevées lorsque le courant harmonique rencontre lors de son passage un circuit résonant série ou parallèle [8].

La circulation des courants harmoniques dans l'impédance de source amène aussi une déformation de la tension d'entrée. Le taux global de distorsion en tension, ou THDV, qui en résulte, doit être limité (en général à 5%) pour que la déformation de tension ne perturbe pas d'autres utilisateurs connectés au même jeu de barre.

$$THDV(\%) = 100 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{V_{ck}}{V_{c1}} \right)^2} = 100 \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{|Z_{ccl}^K| I_{ck}}{V_{c1}} \right)^2} \quad (1.8)$$

V_{c1} : désigne la valeur efficace de v_{c1} .

$|Z_{SCC}^K|$: Module de l'impédance de court-circuit par l'harmonique de rang K.

Ainsi, plus les impédances Z_{SCC}^K ($k > 1$) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible, la réduction du THDV implique la réduction des courant harmoniques qui en sont la cause, si possible avec une solution indépendante de la source [9].

c) Normes imposées sur le THD

Les perturbations entraînent des déformations de tension, des pertes joules supplémentaires, influents sur les circuits environnants et, notamment créent des phénomènes de résonances et d'interférences avec des circuits de télécommunications. Il existe des normes pour éviter ou diminuer ces influences. Ces normes sont imposées par le réseau de distributeur, en France le réseau distributeur EDF impose les limitations suivantes **[10]**, pour chaque utilisateur pris séparément.

- ✓ Pour tous les harmoniques : $THD \leq 1.6\%$
- ✓ Pour tous les harmoniques pairs : $\left| \frac{V_{2k}}{V_1} \right| \leq 0.6\%$
- ✓ Pour tous les harmoniques impairs : $\left| \frac{V_{2k+1}}{V_1} \right| \leq 1\%$

Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains.

Si ces valeurs sont dépassées par l'utilisateur, il est indispensable, soit d'augmenter la puissance apparente court-circuit ou de bénéficier d'installation de filtrage qui ont pour objectif de baisser le taux de distorsion harmonique.

1.2.6 Influence des Harmoniques sur le Facteur de Puissance FP

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties active P, réactive Q et déformante D, cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques,

Avec :

Q : La puissance réactive associée au courant fondamental.

D : La puissance déformante due aux harmoniques du courant.

P : La puissance active.

S : La puissance apparente.

On a l'expression de la puissance active :

$$P = 3.U.I \cos(\varphi) \quad (1.9)$$

Et l'expression de la puissance réactive :

$$Q = 3.U.I \sin(\varphi) \quad (1.10)$$

Et on a :

$$D = 3.U.I \sqrt{\sum_{h=2}^n I_h^2} \quad (1.11)$$

Donc finalement l'expression de la facteur de puissance :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.12)$$

1.2.7 Effets des perturbations harmoniques

Il y a des nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités tels que les déformations des formes d'ondes entraînant des dysfonctionnements, l'augmentation des valeurs crêtes créant des claquages de diélectriques ou des valeurs efficaces induisant des échauffements.

Les effets de ces perturbations peuvent se classer en deux types **[11]**:

a) Les effets instantanés ou à court terme

- ✓ Il y a des pertes de précision dans les appareils de mesure (compteur d'énergie, instrumentation,...),
- ✓ Il y a des vibrations dans les moteurs électriques alternatifs à cause des couples mécaniques pulsatoires dus aux champs tournants harmoniques.

b) Les effets à long terme

- ✓ Vieillesse prématurée des moteurs électriques alternatifs du fait des pertes cuivre et fer supplémentaires, dû à la différence importante de la vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor.
- ✓ Échauffements et pertes joules supplémentaires des câbles et des équipement entraînant des déclassements du matériel avec des sur dimensionnements.
- ✓ Échauffements supplémentaires des condensateurs par conduction et par hystérésis dans le diélectrique qui peuvent conduire au claquage.
- ✓ Risque d'excitation de résonance ; Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de condensateurs sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance. Les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles et coïncider avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques qui peuvent entraîner des destructions[12].

1.3 Charges linéaires et non linéaires

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires).
- Les récepteurs non-linéaires (ou charges non-linéaires).

1.3.1 Charge Linéaire

Une charge est dite linéaire si est alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal. Cependant, le courant et la tension peuvent être déphasés. Les charges linéaires couramment utilisées sont constituées de résistances, de capacités et d'inductances.

1.3.2 Charge non Linéaire

Une charge est dite non-linéaire si l'on alimente par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans cette charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques.

1.3.3 Charge non linéaire raccordée au réseau

On considérons une source de tension sinusoïdale V_s connectée à une charge non linéaire

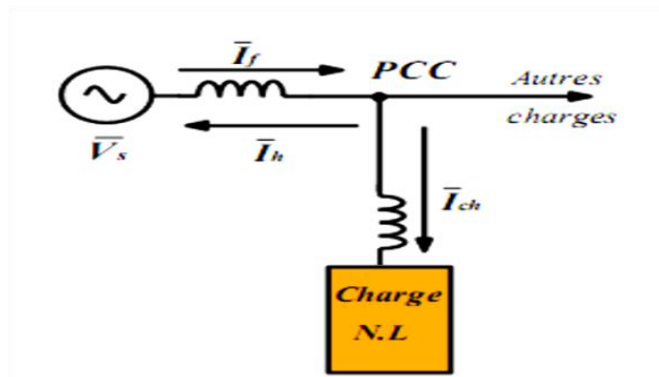


Figure 1.3 Alimentation d'une charge non linéaire

A cause de non linéarité de la charge, le courant I_{ch} ne sera pas sinusoïdal même si la source de tension est parfaite. Il contient donc une composante fondamentale I_f et des composantes harmoniques I_h .

Ces harmoniques de courant circulent dans la source de tension, en même temps qu'ils parcourent la charge. Le courant circulant dans la charge (Figure 1.5) peut donc se décomposer

$$\text{en une composante fondamentale. } I_{ch1} = I_{ch1} + I_{chh} \quad (1.13)$$

Avec:

$$\text{Pour le fondamental: } I_{ch1}(t) = I_1 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \phi_1) \quad (1.14)$$

$$\text{Pour les harmoniques: } I_{chh}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \sqrt{2} \cdot \sin(h \cdot \omega t + \phi_h) \quad (1.15)$$

La tension au point de raccordement s'écrit alors :

$$V_{ch} = V_s - Z_{cc} \cdot I_{ch} = V_{ch1} + V_{chh} \quad (1.16)$$

Avec:

$$\text{Pour le fondamental: } V_{ch1} = V_s - |Z_{cc}| \cdot I_1 \cdot \sin(\omega t + \phi_1 + \phi_{cc1}) \quad (1.17)$$

$$\text{Pour les harmoniques: } V_{chh}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} |z_{cc}| \cdot h \cdot I_h \cdot \sin(h\omega t + \phi_h) - \phi_{cc1} \quad (1.18)$$

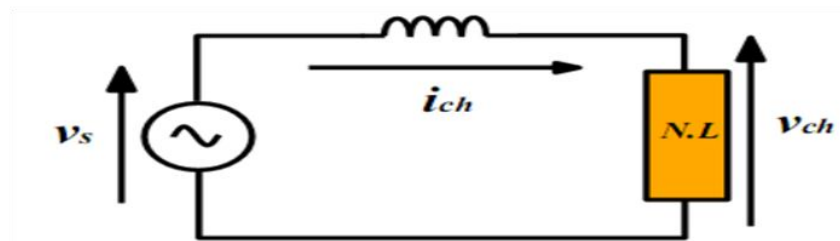


Figure 1.4 Circuit électrique équivalent d'alimentation d'une charge non linéaire.

1.4 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons donné une idée générale sur les perturbations des réseaux électriques, affectant l'onde de tension du réseau. Comme nous avons pu le constater, ces perturbations ont des effets néfastes sur les équipements électriques, ces effets peuvent aller d'échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction des équipements.

Les charges responsables de la propagation de la pollution harmonique sont les charges non linéaires qui englobent les convertisseurs statiques et les transformateurs, l'utilisation de ces charges est irremplaçable. Donc, il est impératif d'aller chercher les solutions aux problèmes d'harmoniques ailleurs sans avoir à éliminer ces charges.

La maîtrise des harmoniques est d'une importance capitale afin de mettre à l'utilisateur de trouver un réseau électrique propre et rendre les installations conformes aux normes.

La présentation des différentes solutions existantes, sera l'objet du second chapitre.

2.1 Introduction

Les harmoniques rencontrés sur les réseaux électriques ont un grand nombre d'effets, différents qu'ils sont instantanés ou termes mais dans tous les cas négatifs au fonctionnement des réseaux.

Pour limiter la propagation et l'effet de ces harmoniques, plusieurs solutions existent et d'autres sont encore sous le test.

Parmi les solutions qui sont applicables :

- Une organisation appropriée des réseaux, qui consiste à éloigner, et si possible séparer, les condensateurs des sources de courants harmoniques à fin d'éviter le risque d'amplification des harmoniques [13].
- L'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peut polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- L'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires [14].

2.2 Solutions classiques de dépollutions :

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

2.2.1 Ajout d'une inductance de lissage de courant

L'ajout d'inductances de lissage en amont des dispositifs polluants est une solution communément utilisée afin d'atténuer les harmoniques de rangs élevées puisque leurs

impédances augmentent avec la fréquence. Ces inductances réduisent donc la distorsion de la tension au point de raccordement mais induisent un coût supplémentaire [15].

2.2.2 Confinement des harmonique

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie de l'installation la plus limitée possible. Si le montage est un montage équilibré, les harmoniques de rang 3 sont en phase et en l'absence de conducteur neutre connecté, ces courants ne peuvent pas circuler. Pour éviter la circulation de ces courants de rang 3 sur l'ensemble du réseau, il est possible d'effectuer un découplage par transformateur. Par exemple l'utilisation d'un transformateur dont le primaire est couplé en étoile et le secondaire en zigzag (couplage YZN) permet d'éliminer au primaire les courants de pulsation 3h.

2.2.3 Les filtres Passifs

Le filtrage passif consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation, une impédance de valeur 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 [16].

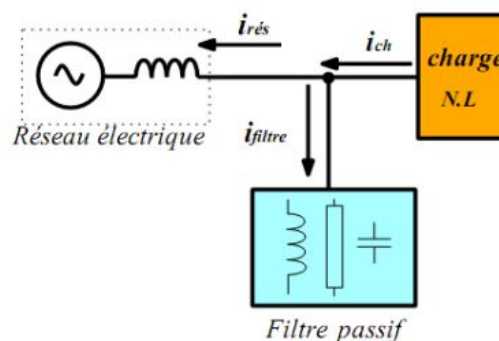


Figure 2.1 Filtre Passif

a) Filtre passif résonant

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série. La pulsation de résonance du filtre est :

$$\omega_a = 2.\pi.f_a = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.1)$$

L'impédance équivalent est :

$$Z_{cq} = \frac{1 - Lc\omega^2 + jrc\omega}{j\omega} \quad (2.2)$$

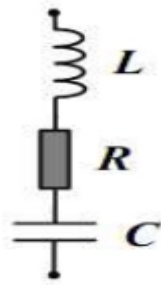


Figure 2.2 Filtre Passif résonant

b) Filtre passif amorti

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur.

$$\text{L'impédance équivalent est : } Z_{cq}(\omega) = \frac{1 - Lc\omega^2 + j\frac{L}{R}\omega}{\frac{1}{R}c\omega^2 + jL\omega} \quad (2.3)$$

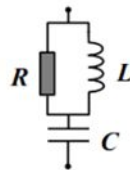


Figure 2.3 Filtre passif amorti

2.2.4 Inconvénients des filtres passifs

Il existe plusieurs inconvénients et parmi ces inconvénients on a :

- Antirésonance
- Vieillissement

a) Antirésonance

Ajouter un tel filtre à pour effet de modifier l'impédance de court-circuit du réseau.

Cette impédance devient alors :

$$Z_{cq}(w) = \frac{jLsw.(1 - Lcw^2)}{1 - (L + L_s).cw^2} \quad (2.4)$$

On peut alors constater qu'il existe une pulsation pour laquelle l'amplitude sera très amplifiée. De plus pour chaque filtre ajouté on crée une nouvelle pulsation d'antirésonance.

b) Vieillissement

Ces filtres avec le temps, ils n'assurent plus leurs fonctions de filtrage calibré sur un harmonique particulier.

2.3 Solutions modernes de dépollution

Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées. Les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques. En effet, ces solutions peuvent s'adapter aux évolutions de la charge et du réseau électrique et ceci sans toucher aux installations du fournisseur d'énergie et du consommateur [17].

2.3.1 Filtrage actif

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent pas plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques. En effet, les méthodes dites "classiques" de filtrage ou de dépollution des réseaux électriques présentent un certain nombre d'inconvénient.

Le plus important d'entre eux est sans doute le fait d'être sensible aux évolutions de l'environnement. Ils voient leur efficacité baisser avec les variations des perturbations (variation des fréquences et des amplitudes des harmoniques).

La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveau composant à commutation forcée, comme les transistors bipolaires, les thyristors GTO et les transistors IGBT qui ont permis de réaliser de nouvelles structures qui permettent le contrôle de la fore d'onde de la phase du courant d'entrée.

Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques. Ainsi le filtrage actif tend à annuler les courants harmoniques en injectant dans la source perturbatrice des courants harmoniques d'amplitudes identiques, mais en opposition de phase à l'aide d'un pont onduleur. A cet, une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant à fournir. Nous citerons les configurations possibles des filtres actifs :

- Le filtre actif parallèle (FAP) : conçu pour compenses toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive.
- Le filtre actif série (FAS) : conçu pour compenses toutes les perturbations de tension comme les harmoniques, les déséquilibres et les creux de tension.
- La combinaison parallèle série actif : solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.
- Filtrage hybride.

a) Filtre actif parallèle (FAP)

Il est appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution figure (2.4). Il est habituellement commandé comme un générateur de courant. Son principe est d'injecter dans le réseau électrique des courants harmoniques I_{inj} égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire mais en opposition de phase, de telle sorte que le courant fourni par le réseau I_s soit sinusoïdale et en phase avec la tension simple correspondante. Ainsi, il empêche les courants harmoniques, réactifs et déséquilibrés de circuler à travers l'impédance du réseau. Par conséquent, Il améliore le taux de distorsion en courant et en tension [18].

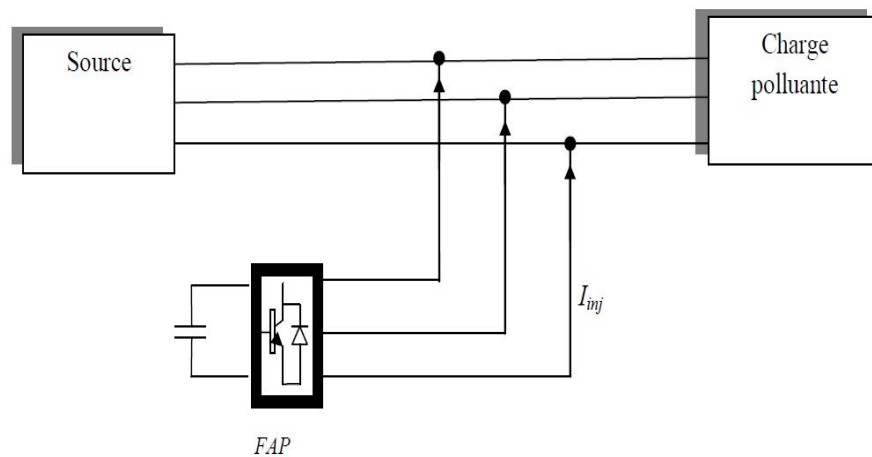


Figure 2.4 Montage d'un filtre actif parallèle

a.1) Principe du filtrage actif parallèle

Le schéma de principe du filtre actif parallèle est représenté sur (la figure 2.5), il doit fournir la puissance déformante et la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance active. Dans la mesure où c'est le filtrage actif parallèle qui est le plus répandu, la suite du travail portera sur la description détaillée du filtrage actif parallèle (ou shunt).

Comme il a été précédemment dit, connecté à un réseau alimentant des charges polluantes, le filtre actif a pour vocation, dans une configuration shunt, de dériver, de façon active, tout ou une partie des harmoniques de courant et/ou de la puissance réactive fondamentale absorbée par ces charges.

Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active i_{cha} , une composante réactive i_{chr} , et une composante harmonique $\sum_{h=1}^{\infty} i_{chh}$.

$$i_{ch} = i_{cha} + i_{chr} + \sum_{h=1}^{\infty} i_{chh} \quad (2.5)$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas de source active.

D'après la première loi de Kirchhoff, le courant fourni par la source est égale à :

$$i_s = i_{ch} - i_f \quad (2.6)$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge :

$$i_s = i_{ch} \quad (2.7)$$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante :

$$i_f = i_{chr} + \sum_{h=1}^{\infty} i_{chh} \quad (2.8)$$

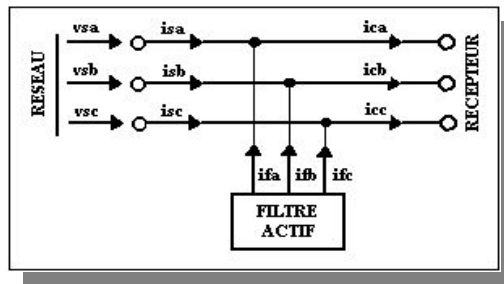


Figure 2.5 Les courants absorbés par un redresseur

b) Filtre actif série (FAS)

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau comme le montré la figure (2.7). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension du réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations qui sont sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par

la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, à des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

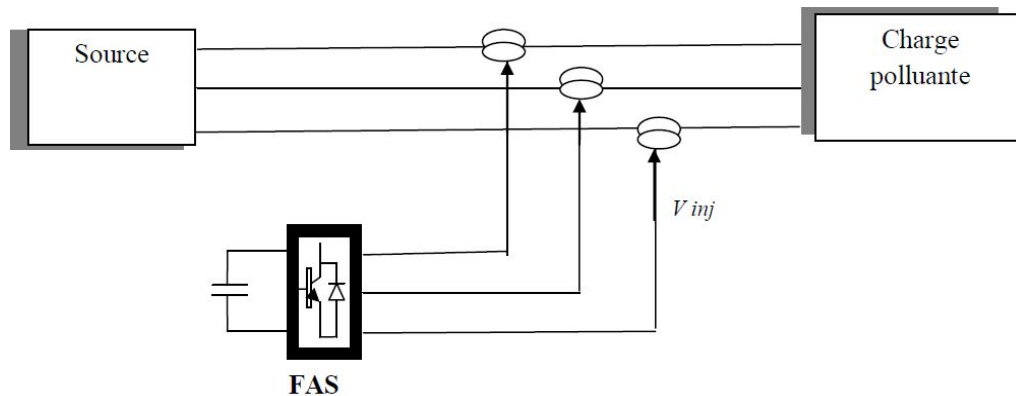


Figure 2.6 Montage d'un filtre actif série

c) La combinaison parallèle-série

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série. Donc, elle possède les avantages cumulés des filtres actifs parallèles et série. Cette nouvelle topologie est appelée combinaison parallèle série actif ou en anglais Unified Power Quality Conditioner(UPQC).

Un filtre actif série placé en amont du filtre actif parallèle, comme il est montré dans (la figure 2.8), permet de dépolluer la source des tensions perturbatrices; or s'il est placé en aval, il permet d'isoler la charge de la source perturbée [19].

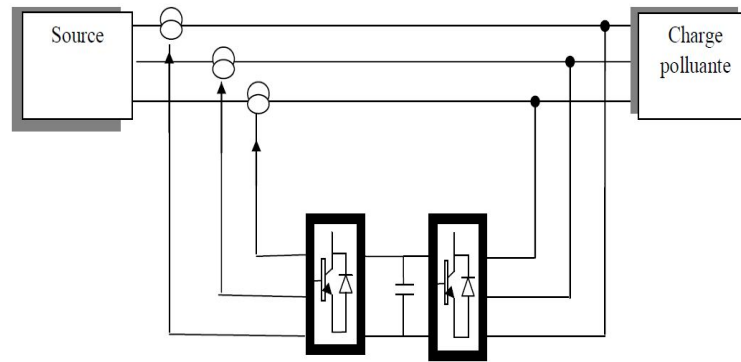


Figure 2.7 La combinaison parallèle-série (UPQC)

d) Filtrage hybride

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature [20] , les plus étudiées étant:

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

d.1) Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèle

Il empêche les courants harmoniques de circuler vers le réseau et les oblige à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.

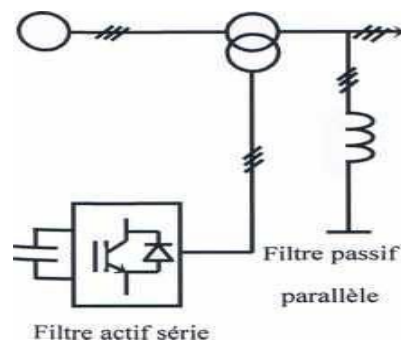


Figure 2.8 Filtre actif série avec filtre passif parallèle

d.2) Le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Il a le même principe que la combinaison d'avant avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

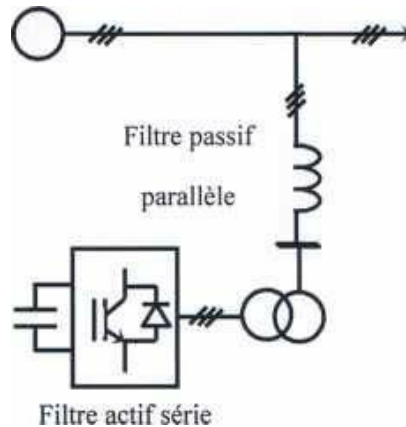


Figure 2.9 Filtre actif série connecté en série avec filtre passif parallèle

d.3) Le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

Il a le rôle de compenser des courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante. Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les courants harmoniques hautes γ' a compris ceux créés par le filtre actif parallèle.

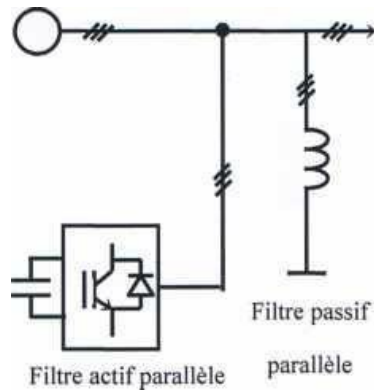


Figure 2.10 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

2.3.2 Les avantages des filtres actifs

Le filtre actif offre de nombreux avantages :

- ✓ Il s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau.
- ✓ Il peut compenser plusieurs rangs harmoniques.
- ✓ Il ne passe pas en surcharge lorsque le courant harmonique à compenser dépasse le dimensionnement du filtre actif. il limite son émission de compensation harmonique au maximum de ses capacités, mais il n'y a aucun de destruction.
- ✓ Il peut protéger des condensateurs de compensation par élimination des courants harmoniques générés par une charge.

Comparaison des différents filtrages

Le tableau (2.1) montre un récapitulatif des avantages et inconvénient du filtrage passif filtrage actif parallèle et du filtrage actif parallèle-série.

Principe	Avantages	inconvénients
Filtrage passif	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amélioration de la forme du courant 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Risque de résonance ✓ Pas d'adaptabilité
Filtrage actif parallèle	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amélioration de la forme du courant. ✓ Adaptabilité aux variations de la charge et du réseau. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amélioration de la tension pas toujours évidente
Filtrage actif série	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amélioration de la forme de la tension ✓ Adaptabilité aux variations de la charge et du réseau 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pas d'amélioration de la forme du courant
La combinaison parallèle-série actif	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Amélioration de la forme du courant ✓ Amélioration de la forme de la tension ✓ Adaptabilité aux variations de la charge et du réseau 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Réalisation difficile

2.4 conclusion

Dans ce chapitre, nous avons illustré, des solutions de compensation pour cette pollution harmonique. Plusieurs solutions classiques et modernes de dépollution ont été présentées.

Nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrements et de résonance. En revanche, la solution des filtres actifs parallèles et séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique.

Ainsi, le choix de la topologie du filtre actif parallèle se présente comme la solution la plus standard pour le filtrage des courants harmoniques c'est pour ça le prochain chapitre sera consacré pour la modélisation d'un filtre parallèle actif.

Chapitre 3 Modélisation et La Commande d'un Filtre Actif Parallèle

3.1. Introduction

Afin de réduire les harmoniques au niveau du réseau électrique, nous proposons dans ce travail le filtrage actif parallèle, par les avantages qu'il représente, tel que l'adaptation aux variations de la charge polluante.

Le filtre actif parallèle est un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions, il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux et en opposition de phase à ceux absorbés par la charge polluante. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant.

Dans ce chapitre nous étudierons la structure générale, les différentes stratégies de commande de l'onduleur de tension et le dimensionnement du filtre actif parallèle.

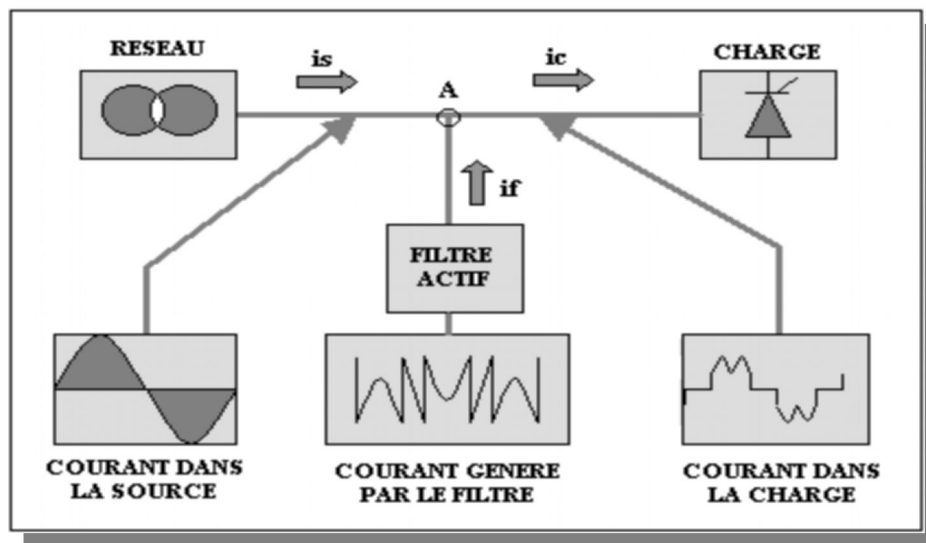


Figure 3.1 Schéma synoptique du filtrage actif parallèle

3.2 Structure d'un Filtre Actif Parallèle

Comme il a été dit lors dans l'introduction de ce troisième chapitre, les filtres actifs se basent dans leur conception sur des onduleurs constitués essentiellement de composants entièrement commandables:

- ✓ MOSFET pour les basses tensions et faibles puissances (≤ 30 kVA),
- ✓ IGBT pour les moyennes tensions et puissances (≤ 1000 kVA) ,
- ✓ GTO pour les hautes tensions et fortes puissances (≤ 30000 kVA).

Ceci est représenté par (la figure 3.2) qui montre l'évolution en matière de puissance apparente et fréquence de commutation, en particulier, de ces composants entre les années 1990 et 2000 .

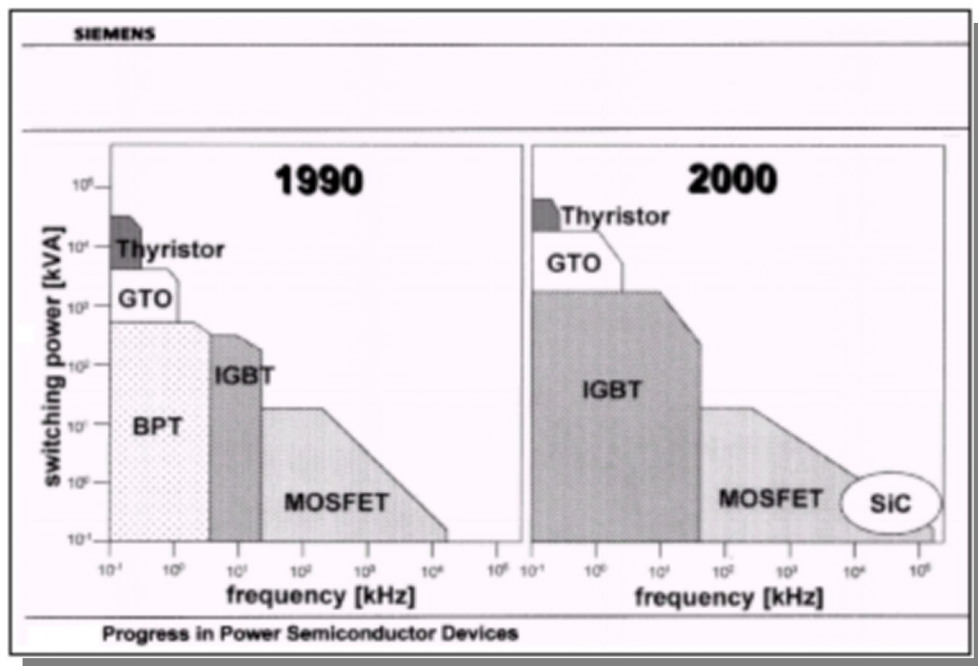


Figure 3.2 Progrès dans la technologie des semi-conducteurs

Un filtre actif parallèle est composé principalement des deux blocs suivants (voyez la figure 3.3) :

- La partie puissance.
- La partie contrôle-commande.

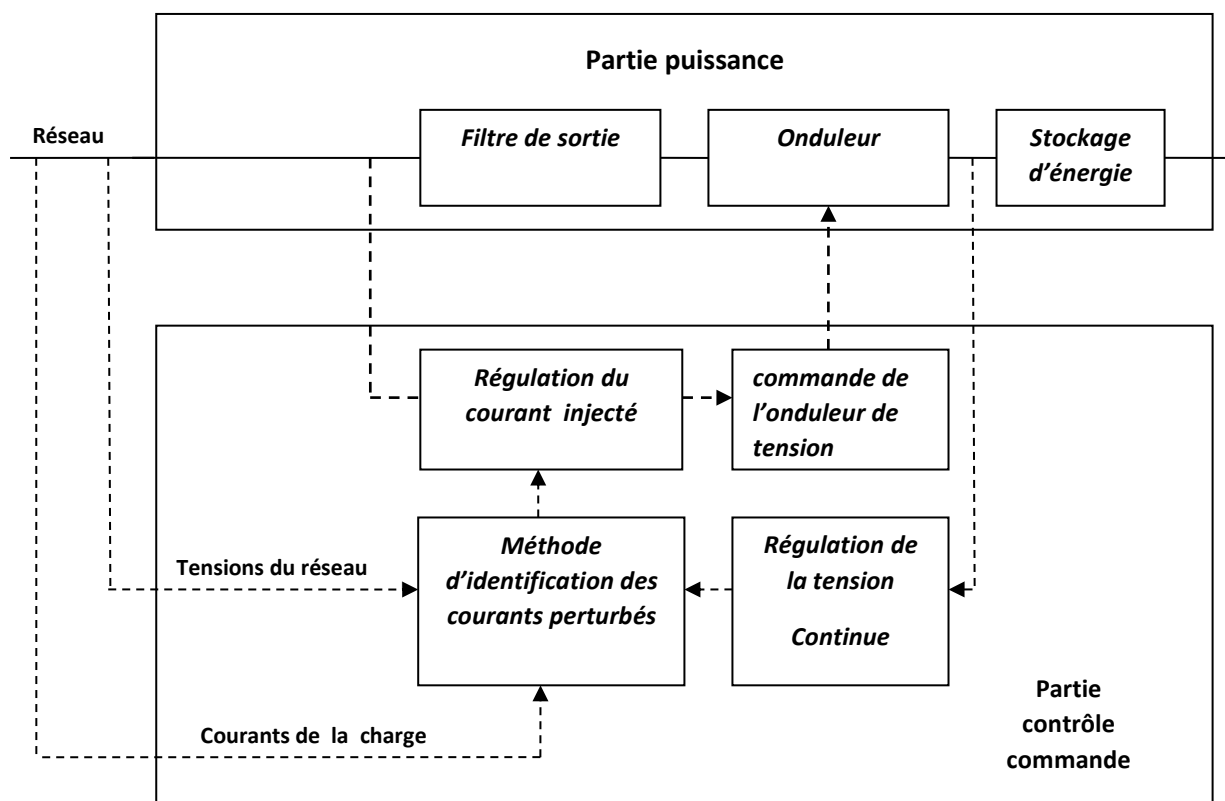


Figure 3.3 Structure générale du filtre actif parallèle

3.3.1 La partie puissance

Est constituée :

- D'un onduleur à base d'interrupteurs de puissance , commandables 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) :

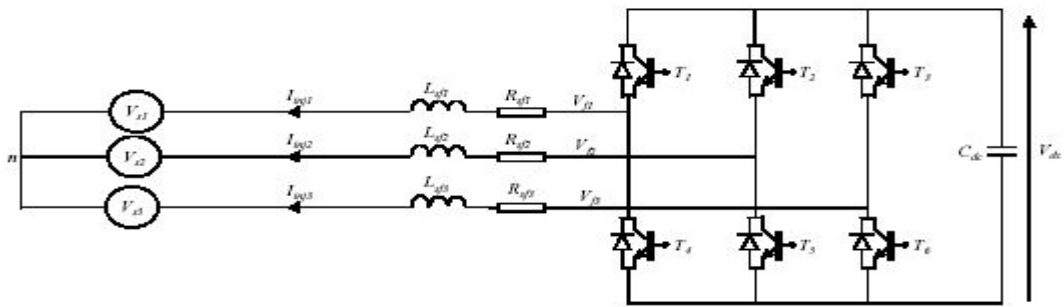


Figure 3.4 Onduleur de tension triphasé

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 homo-polaires 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 homo-polaire (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.

A.2) Équations de base

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

$S_i (i = a, b, c)$ avec:

$S_i = 1$, l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.

$S_i = 0$, 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:

$$V_{io} = E(S_i - \frac{1}{2}) \quad (3.1)$$

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

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_{an} - V_{bn} \\ U_{bc} &= V_{bn} - V_{cn} \\ U_{ca} &= V_{cn} - V_{an} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Avec:

$$\begin{aligned} V_{an} &= \frac{1}{3}(U_{ab} - U_{ca}) \\ V_{bn} &= \frac{1}{3}(U_{bc} - U_{ab}) \\ V_{cn} &= \frac{1}{3}(U_{ca} - U_{bc}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\text{En régime équilibré: } V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (3.4)$$

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

$$\begin{aligned} U_{ab} &= V_{ao} - V_{bo} \\ U_{bc} &= V_{bo} - V_{co} \\ U_{ca} &= V_{co} - V_{ao} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Nous obtenons:

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (3.6)$$

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

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}S_a \cdot E - \frac{1}{3}S_b \cdot E - \frac{1}{3}S_c \cdot E \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}S_a \cdot E + \frac{2}{3}S_b \cdot E - \frac{1}{3}S_c \cdot E \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}S_a \cdot E - \frac{1}{3}S_b \cdot E + \frac{2}{3}S_c \cdot E \end{cases} \quad (3.7)$$

Sous forme matricielle, on obtient:

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

B) Système de Stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté 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 V_{dc} .

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

Le soleil est une source énergétique quasiment illimitée, il pourrait couvrir plusieurs milliers de fois notre consommation globale d'énergie [21]. C'est pour ça, l'homme cherche depuis longtemps à mettre à profit cette énergie importante et diffusée sur l'ensemble de la planète, il est arrivé à réaliser ce but par le moyen dit cellule photovoltaïque.

B.1) Conversion d'énergie

Il existe principalement trois façons d'utiliser directement l'énergie solaire :

- thermodynamique,
- thermique
- Photovoltaïque

b.1) Solaire à concentration thermodynamique

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui chauffe jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C.

b.2) Solaire thermique

Le solaire thermique consiste à transformer les rayonnements solaires en chaleur, et à la récupérer principalement par chauffage de l'eau. Cette source d'énergie renouvelable commence à se développer sous nos latitudes dans les maisons individuelles.

b.3) Solaire Photovoltaïque

La lumière solaire (photons) transmet son énergie aux électrons contenus dans un semi conducteur (qui constitue une cellule photovoltaïque) capable de convertir le rayonnement solaire en électricité. Les électrons sont alors mis en mouvement, produisant ainsi un courant électrique.

B.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 [22]. 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.

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 polycristallin et enfin 7 à 8% pour le silicium amorphe en films minces.

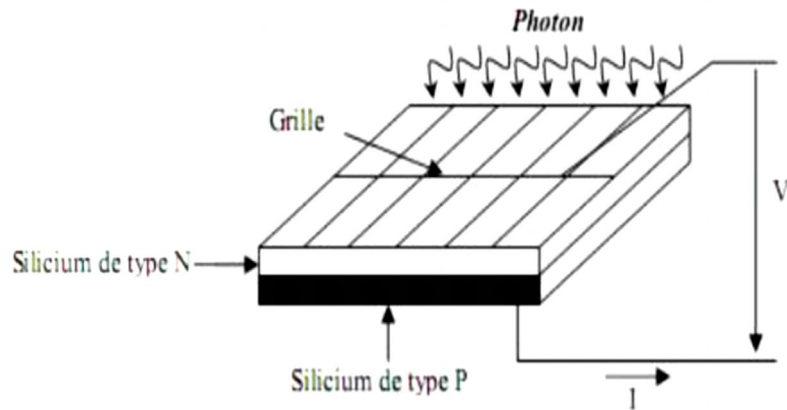


Figure 3.5 Schéma d'une cellule élémentaire

B.3) Caractéristiques de la cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé est représenté sur (la Figure 3.8):

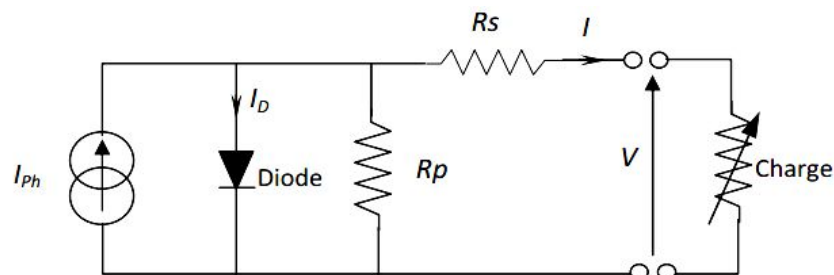


Figure 3.6 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

Comme montre (la figure 3.8) une cellule photovoltaïque comporte en réalité une résistance série R_s et une résistance shunt R_p . Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I-V de la cellule:

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

B.4) Paramètres d'une cellule PV

Les deux importants paramètres d'une cellule PV sont:

- Le courant de court-circuit I_{cc}
- La tension de circuit ouvert V_{co}

b.1) Le courant de court-circuit

il est plus grand valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit où $V=0$.

b.2) La tension de circuit ouvert

est la tension à travers la jonction/diode PN où $I=0$ et elle représente la tension de cellule[23] et peut être exprimé comme suit :

$$V = V_{co} = \frac{m.k.T_c}{q} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (3.9)$$

B.5) Le panneau solaire

C'est un ensemble des cellules photovoltaïques :



Figure 3.7 Panneau photovoltaïque

On a utilisé pour notre étude des panneaux solaires qui permettent de délivrer une tension continue ,qui ces derniers ont pu remplacer les anciens condensateur de stockage ,Le panneau utilisé est de référence (1STH-215-P),dont les paramètres suivant :

- ✓ La tension de circuit ouvert $V_{co} = 36,3(v)$.
- ✓ La tension maximal $V_{Max} = 29(v)$.
- ✓ Nombre des cellules $N = 60$.
- ✓ Le courant de court-circuit $I_{cc} = 7,84(A)$.
- ✓ Le courant maximal $I_{Max} = 7,35(A)$.

Pour obtenir la tension désirée , on' a prend un système d'alimentation à base de 16 panneaux solaires en séries.

b.1) caractéristique d'un panneau solaire

Le panneau caractérisé par deux caractéristiques principales $(I - V)$, $(P - V)$:

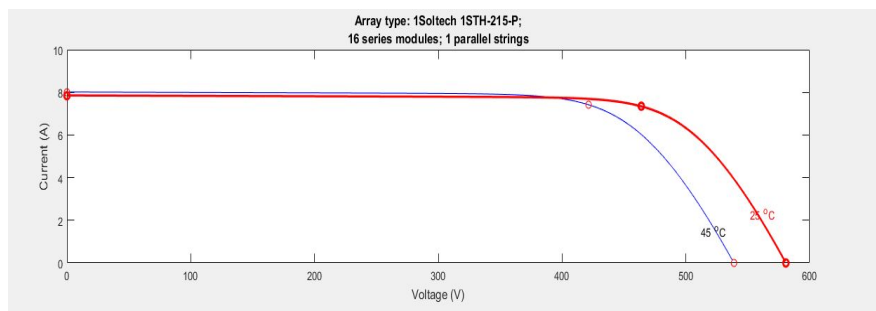


Figure 3.8 Courbe caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque

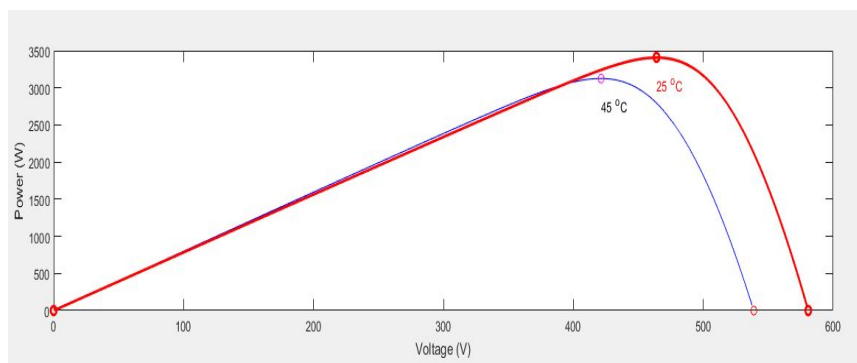


Figure 3.9 Courbe caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque

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).

Cependant, une faible valeur de L_f permet à la majorité des harmoniques induits par les commutations, de passer du côté réseau et d'affecter ainsi les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f empêche ces harmoniques de se propager sur le réseau électrique mais nécessite une tension V_{dc} plus élevée afin de garantir les performances du filtre actif.

Pour limiter la propagation de ces harmoniques, un filtre passif auxiliaire peut être ajouté à la sortie de l'onduleur ou en amont (coté réseau) pour absorber ces harmoniques liés au découpage.

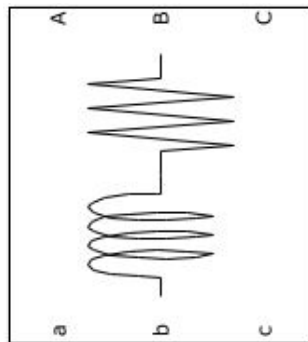


Figure 3.10 Filtre de Sortie

3.3.2 La partie contrôle-commande :

Elle est constituée :

- La méthode d'identification des courants perturbés.
- La régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
- La régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
- La commande de l'onduleur de tension

A) La Méthode d'identification des Courants Perturbés

Le courant absorbé par la charge polluante est composé d'un fondamental et d'harmonique. Le filtre actif sert à générer des courant harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux existant dans la charge. Pour cela, il faut identifier les courants harmoniques de la charge.

L'objectif de la commande que soit à MLI ou bien par Hystérésis ou par une autre méthode est de générer les ordres d'ouverture/fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant de filtre soit le plus proche de sa référence.

Donc, premièrement on va voir comment déterminer cette référence . Les méthodes d'identifications des harmoniques références sont classées en deux types :

- Méthode du domaine fréquentiel.
- Méthode du domaine temporel.

a.1) Méthode du domaine Fréquentiel

Les méthode du domaine fréquentiel utilisent l'analyse de Fourier par identifier les harmoniques de courant. Ces méthodes sont bien adaptées aux charges ou le contenu harmonique varie lentement. par ailleurs, elles ont l'avantage d'identifier les harmoniques individuellement : elles permettent donc une compensation sélective.

Les inconvénients les plus importants de ces méthodes sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérables.

a.2) Méthode du domaine Temporel

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide que les méthodes précédentes. Le principe de ce type de méthode est séparation du fondamentale ou de certains harmoniques de reste des harmoniques par filtre.

Les méthodes les plus importantes sont :

- La théorie P-Q de la puissance instantanée
- Algorithme du repère référence synchronisé (SRF).
- Algorithme de la détection synchronisé (SDA).

Les trois méthodes précédentes ont des avantages et inconvénients:

- ✓ La méthode de la théorie (P-Q) a l'avantage d'être assez simple pour la mettre en application sous forme analogique puisqu'elle a besoin seulement des opérations de multiplication et de filtrage simple.
- ✓ L'inconvénient le plus évident de cette méthode est qu'elle s'exécute mal dans des conditions non équilibrées de tension d'alimentation, parce que l'algorithme suppose que les tensions d'alimentations sont sinusoïdales et équilibrées.
- ✓ Un avantage de la méthode (SRF) est qu'elle s'exécute bien avec n'importe quelle forme d'onde du courant.
- ✓ Un inconvénient de cette méthode est que l'algorithme est assez complexe et exige un circuit PLL pour fonctionner correctement.
- ✓ Pour la méthode (SDA), l'exécution est bonne pour les conditions de la tension d'alimentation en cas de déséquilibre.
- ✓ Un inconvénient de cette méthode est qu'elle suppose que les courants dans chaque phase sont égaux, ou bien la charge est équilibrée.

A.2) La Méthode des Puissance instantanées

Cette approche d'identification des courants harmoniques, plus simple consiste à éliminer la composante continue des puissance active et réactive instantanées ce qui est relativement facile à réaliser. On exploite la transformation de Concordia pour obtenir les puissances active et réactive nécessite de tension sinusoïdale à la fréquence fondamentale [24].

En présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties : puissance active (P), puissance réactive (Q), puissance déformante (D), comme le montre la relation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.10)$$

Cette méthode exploite la transformation pour obtenir les puissance réelles et imaginaire. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) , les composantes orthogonales du repère (α, β) associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courant absorbé par la charge polluante (I_s).

La transformation $\alpha - B$ triphasé permet d'écrire les relations des tensions et courants[

En exprime les tensions dans le repère (α, β) et on aura :

$$\begin{pmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

En exprime les courants dans le repère (α, β) et on aura :

$$\begin{pmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{s1} \\ I_{s2} \\ I_{s3} \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

La puissance active instantanée, notée $P(t)$ est définie par la relation suivante.

$$\begin{cases} P(t) = V_{s1} * I_{s1} + V_{s2} * I_{s2} + V_{s3} * I_{s3} \\ P_0(t) = V_{\alpha} * I_{\alpha} \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec:

$P(t)$: la puissance réelle instantanée

$P_0(t)$: la puissance homo-polaire instantanée

L'avantage de la transformation $\alpha - B$ est la séparation des séquences homo-polaire du système de courant ou de tension.

De la même manière , la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante[25]:

$$\left\{ q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{s1} - V_{s2}) * I_{s3} + (V_{s2} - V_{s3}) * I_{s1} + (V_{s3} - V_{s1}) * I_{s2}] \right\} \quad (3.14)$$

Les expressions des puissances instantanées réelle et imaginaire sont données par le système matriciel[26].

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Dans le cas général, chacune des puissance soit active ou bien réactive comporte une partie continue et une autre partie alternative.

Avec :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (3.16)$$

\bar{p} : La puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.

\bar{q} : La puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.

\tilde{p}, \tilde{q} : Des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de tension.

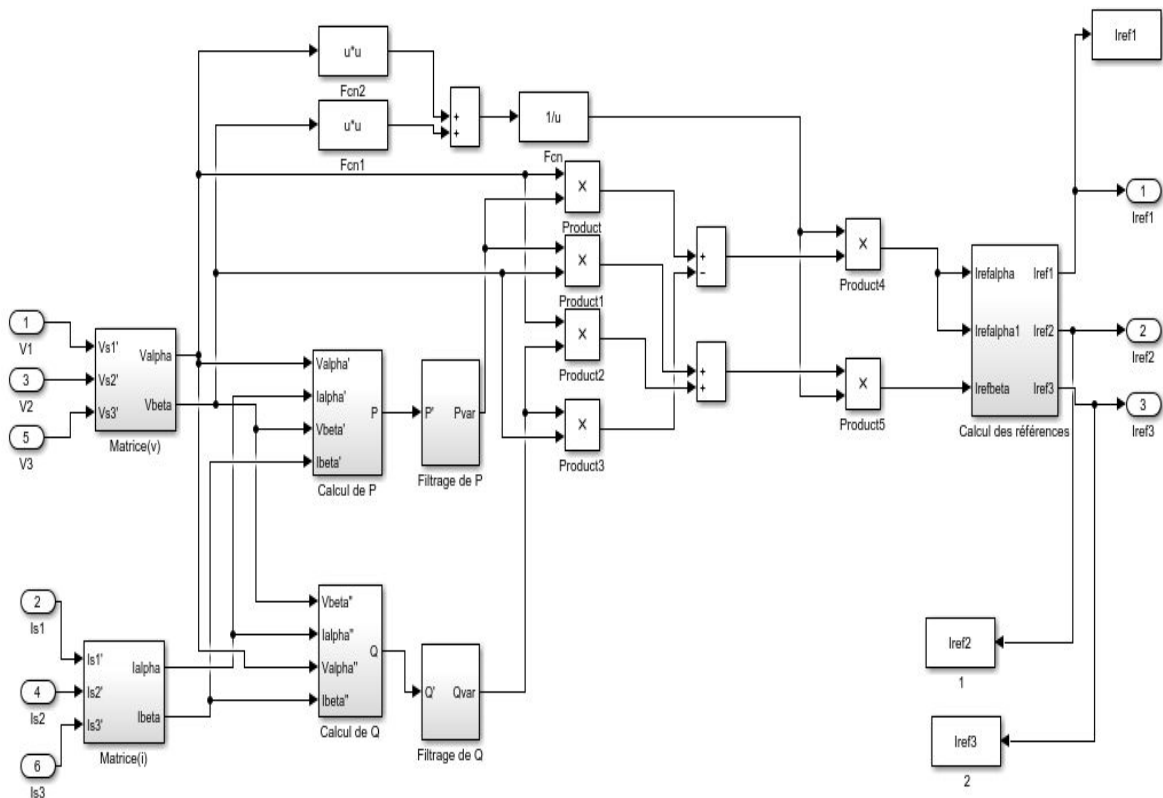


Figure 3.11 Principe de la Théorie P-Q pour déterminer les Courants de références

A.3) Séparation des Puissances Perturbatrices

Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre actif de puissance chargé d'isoler les puissances actives et réactive conventionnelles peut être dimensionné.

Un circuit constitué d'un filtre passe bas avec un soustracteur peut être employé.

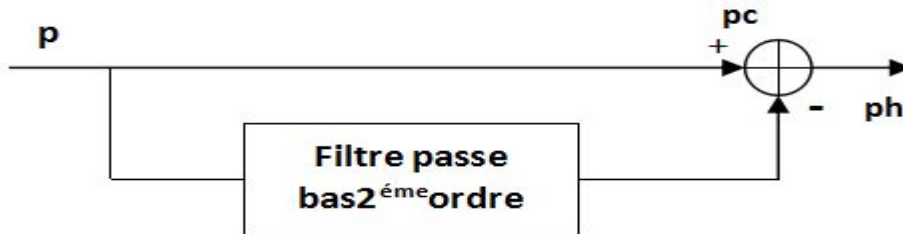


Figure 3.12 Filtre passe bas 2^{ème} ordre

L'ordre de ce filtre passe bas définit la dynamique, l'efficacité de la méthode d'identification.

A.4) Calcul des Courants Perturbés

On peut calculer les courants dans la repère α, β comme le montre l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Nous pouvons séparer le courant dans le repère α, β en trois composantes : active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques:

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} * \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Avec: $(\Delta = V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2)$

Les courants perturbateurs triphasé qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation inverse (α, β).

$$\begin{pmatrix} I_{ref1} \\ I_{ref2} \\ I_{ref3} \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_{p\alpha} \\ I_{p\beta} \end{pmatrix} \tag{3.19}$$

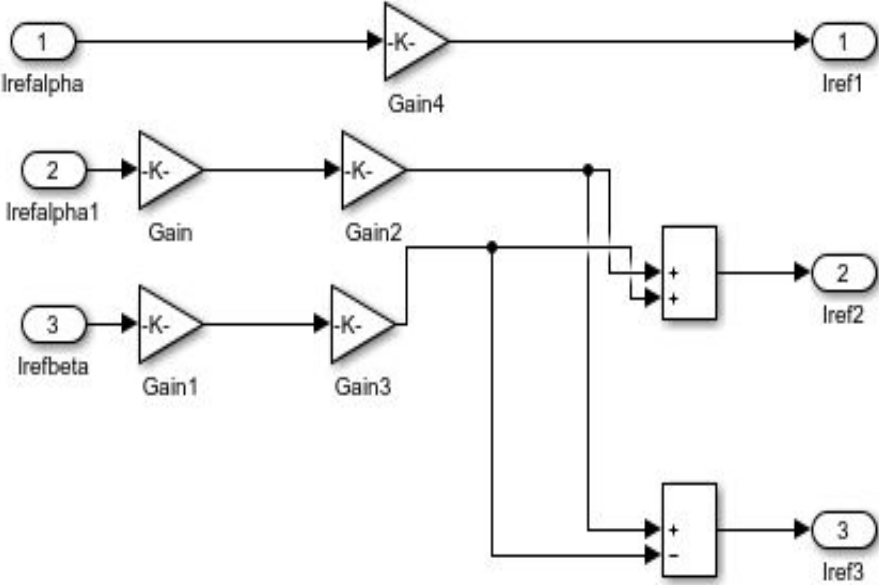


Figure 3.13 Calcul des Courants de Références

B) Régulation de la tension continue

Dans l'état équilibré, la puissance réelle fournie par la source doit être à la demande de la puissance réelle de la charge . plus une petite puissance pour compenser les pertes dans le filtre.[27]

Le panneau solaire sert à deux principes :

- ✓ Sert comme une tension continue.
- ✓ Sert comme un élément de stockage d'énergie.

Dans l'état d'équilibre, la puissance réelle fournie par la source doit être égale à la demande de la puissance réelle de la charge, plus une petite puissance pour compenser les pertes dans le filtre actif.

C) Commande de l'Onduleur

Le but et l'objectif de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqué aux divers interrupteurs de puissance.

Il existe plusieurs commandes pour commander l'onduleur et permet ces commandes on' a deux principales familles de commande des convertisseurs statiques :

- Commande par hystérésis.
- Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

C.1) Commande Par Hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur.

La différence entre le courant de référence et celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit l'ordre de commande du bras correspondant du pont.

L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieure de la bande. [28]

Le principe de la commande à hystérésis est représenté par (la figure 3.17):

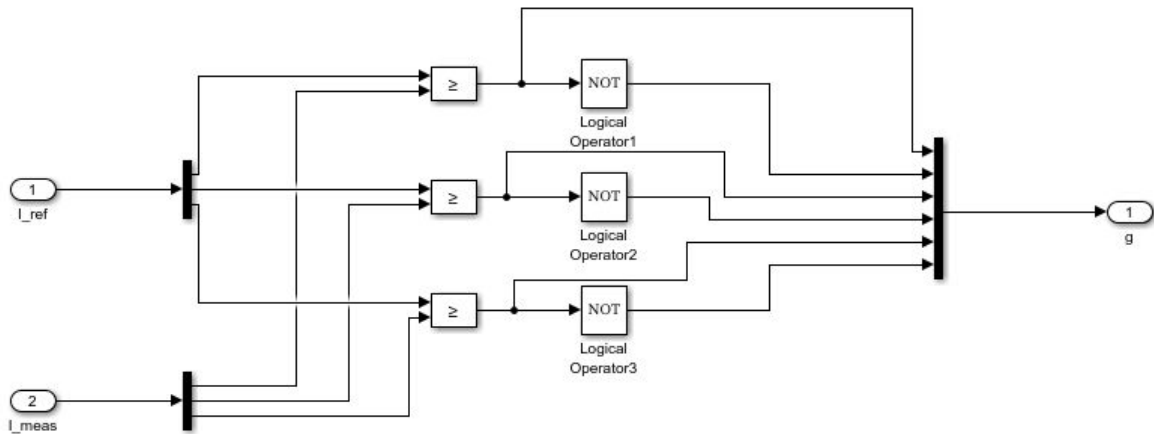


Figure 3.14 Principe de commande des impulsions par Hystérésis sous Simulink

Cette technique de contrôle fait partie des commandes non linéaire parce qu'elle fonctionne en tout ou rien. Elle est bien connue et présente de gros avantages au niveau de la robustesse et de la simplicité de mise en œuvre. Elle possède un temps de réponse rapide en régime dynamique, et une stabilité et une précision satisfaisante et de plus limite automatiquement le courant.

Le seul paramètre de régulation dans cette méthode de commande est la largeur de la bande d'hystérésis qui détermine l'erreur sur les courants et la fréquence de commutation.

Cette commande présente certains inconvénients:

- ✓ Dans certaines configurations ,les courants sortent de leur enveloppe;et que cette dernière a tendance à induire un fonctionnement à fréquence libre qui peut causer des problèmes de filtrage ou de nuisance sonore.
- ✓ La somme des trois courants n'est pas forcément nulle,ce qui crée un déséquilibre des courants qui dépend de la bande d'hystérésis.

c.1) Structure du Contrôle de courant par Hystérésis

Les trois courants a l'entrée du pont sont contrôlés à l'aide de trois comparateurs à hystérésis à bande fixe. L'ensemble des trois sorties de ces comparateurs détermine les ordres de commande des interrupteurs constituant le pont.En effet ,la détermination des instants de commutation suit la logique suivante : **[29]**

$$\left(\begin{array}{l} I_{ref} - I_{ond} = \frac{\Delta I}{2} \Rightarrow, S_i = 0 \\ I_{ref} - I_{ond} = -\frac{\Delta I}{2} \Rightarrow, S_i = 1 \\ i = a, b, c \end{array} \right)$$

(3.20)

C.2) Commande Par MLI

La commande par modulation de largeur d'impulsion 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.**[30]**

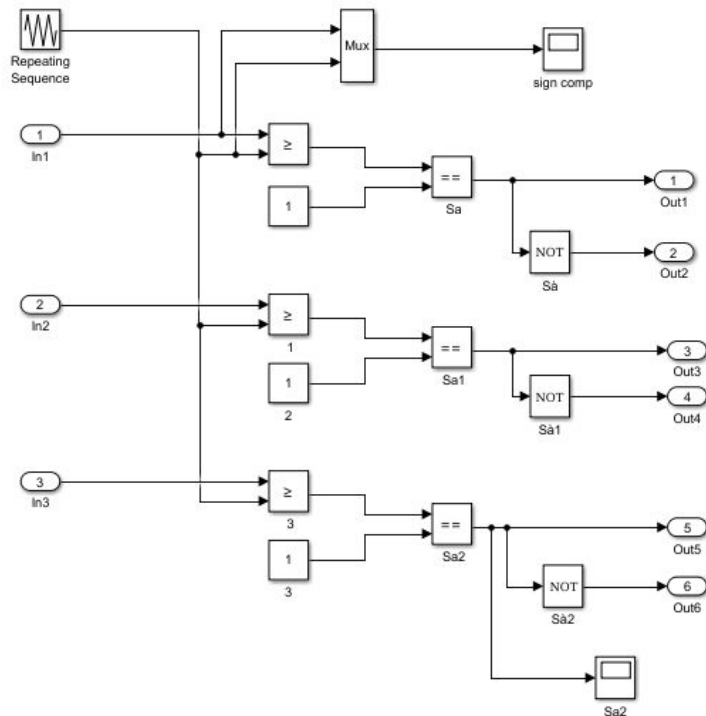


Figure 3.15 Commande Par MLI

c.2) MLI à Porteuse Triangulaire

La méthode de la MLI à porteuse triangulaire ,compare l'erreur entre le signal (courant ou tension) et sa consigne avec une onde triangulaire (la porteuse) d'une amplitude et d'une fréquence fixe. L'erreur passe par un correcteur avant d' être comparée avec la porteuse triangulaire. [31]

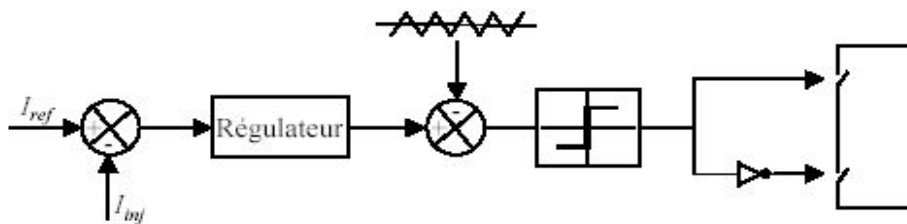


Figure 3.16 Principe de Commande par MLI

3.3.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu présenter et définir les éléments constituant la structure du *filtre actif parallèle*. Cette structure a d'abord été partagée en deux parties, l'une dite *partie puissance*, et l'autre dite partie contrôle commande. Nous avons exprimé les critères qui nous ont guidé dans le choix de chacun des éléments des parties concernées. Ainsi, nous avons pu fixer le choix des éléments de la partie contrôle - commande, tels que la méthode d'identification des courants perturbés, la commande de l'onduleur et la régulation de la tension continue, de même que ceux de la partie puissance, comme l'onduleur, l'élément de stockage, le filtre de sortie et la régulation du courant du filtre actif

4.1 introduction

Dans ce travail on utilise le logiciel Matlab/Simulink 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 alimenté par un panneau photovoltaïque de tension fixe commandé par Hystérésis , 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.

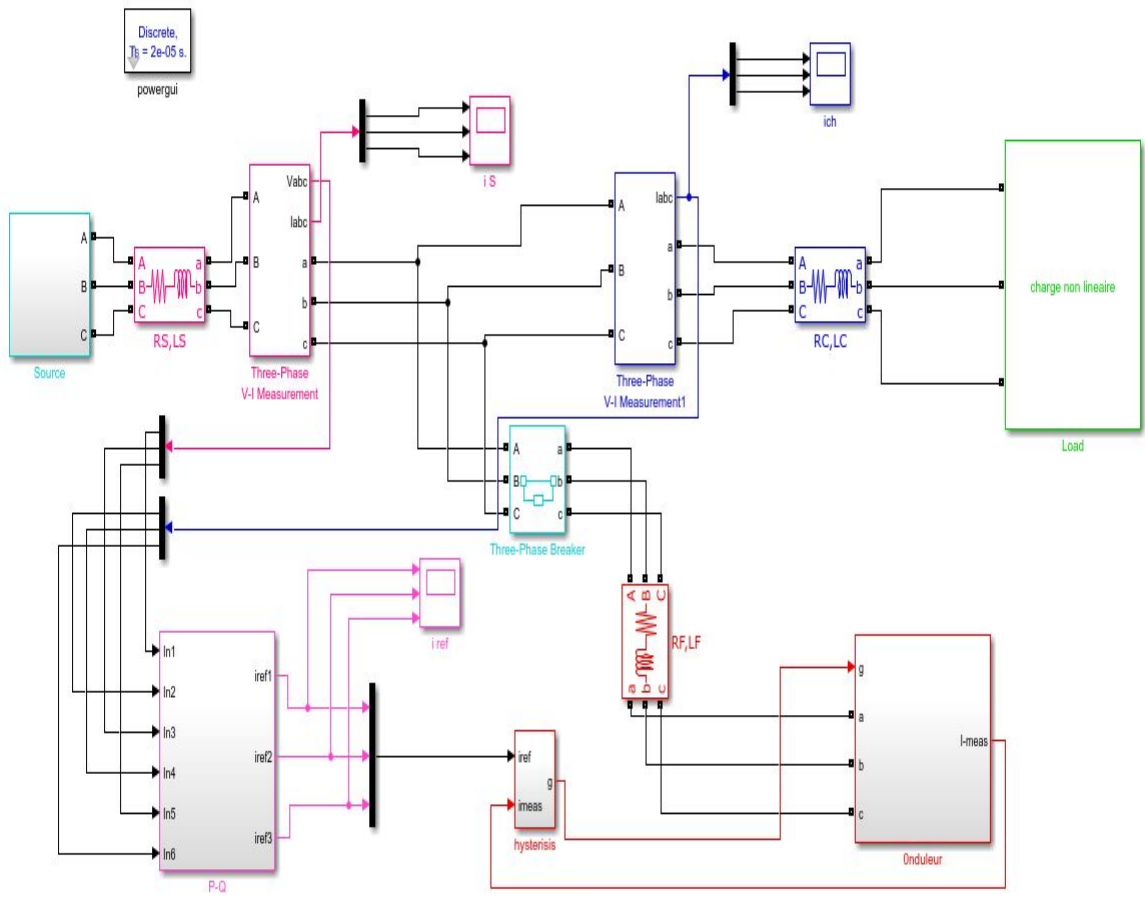


Figure 4.1 Schéma global du système

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.

Systeme	Désignation	Valeurs
Source d'alimentation	<ul style="list-style-type: none"> ✓ La tension de phase ✓ La fréquence ✓ La résistance interne ✓ L'inductance interne 	$V = 230 \text{ (V)}$ $f = 50 \text{ (HZ)}$ $R_l = 10^{-4} \text{ (ohm)}$ $L_l = 10^{-4} \text{ (H)}$
Charge non linéaire	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Pont redresseur triphasé ✓ Avec charge RL ✓ Inductance de filtrage à l'entrée du pont(PD3) 	$R = 50 \text{ (ohm)}$ $L = 10^{-3} \text{ (H)}$ $L_c = 5 * 10^{-3} \text{ (H)}$ $R_c = 10^{-4} \text{ (ohm)}$
FAP	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacité de stockage ✓ Inductance de couplage 	$C_d = 4 * 10^{-4} \text{ (F)}$ $L_f = 3 * 10^{-2} \text{ (H)}$
Stockage d'énergie	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Panneau solaire 	$V_p = 600$ $N = 60$

Tableau 4.1 Les paramètres de Simulation

4.2 Résultats de la Simulation

A) Le courant de la charge polluante

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

Les courants triphasé absorbé par cette charge sont:

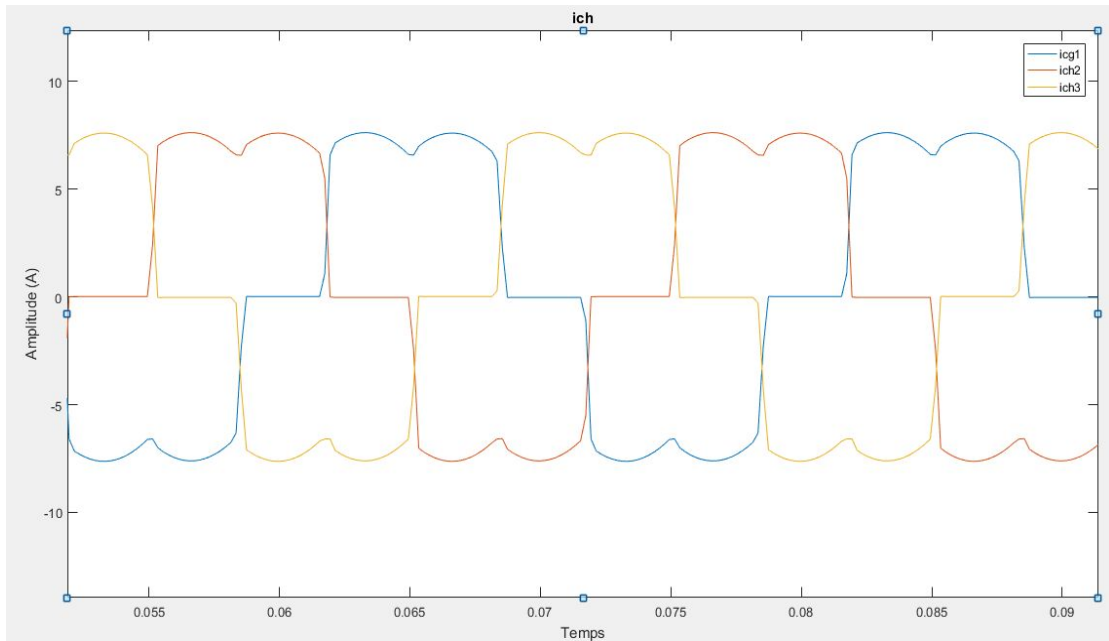


Figure 4.2 Les courants de charge ($i_{ch1}, i_{ch2}, i_{ch3}$)

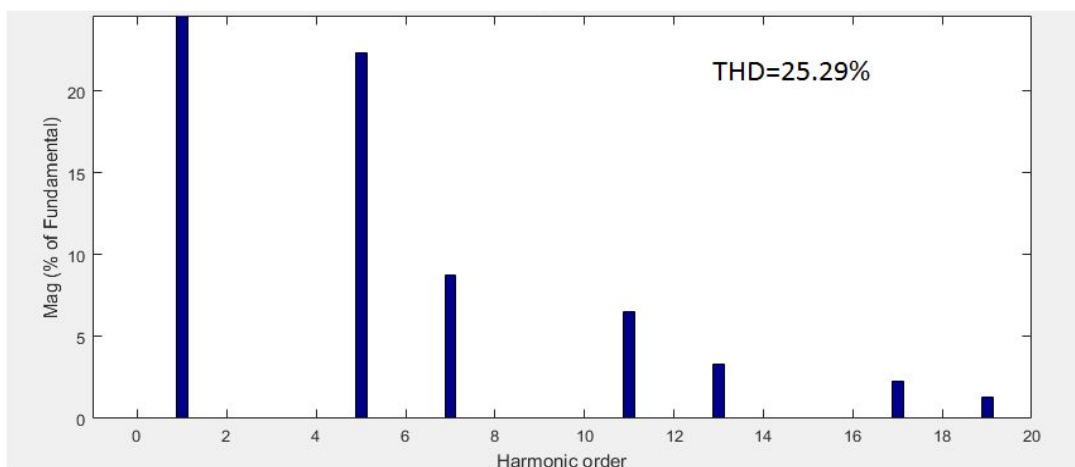


Figure 4.3 Spectre harmonique du courant pollué

B) 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 4.4):

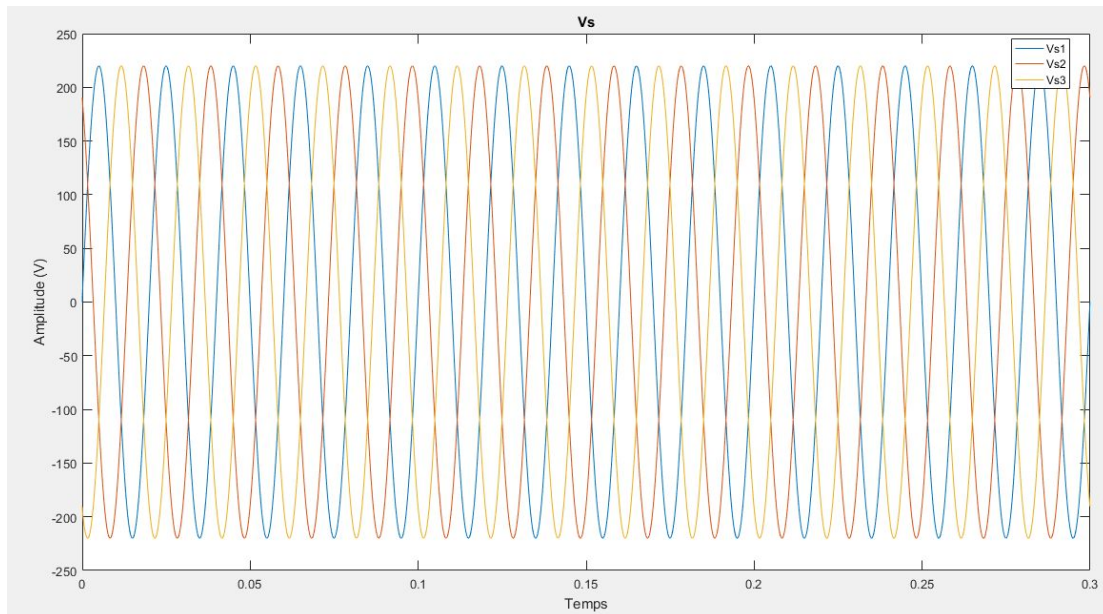


Figure 4.4 les trois tensions du réseau triphasé

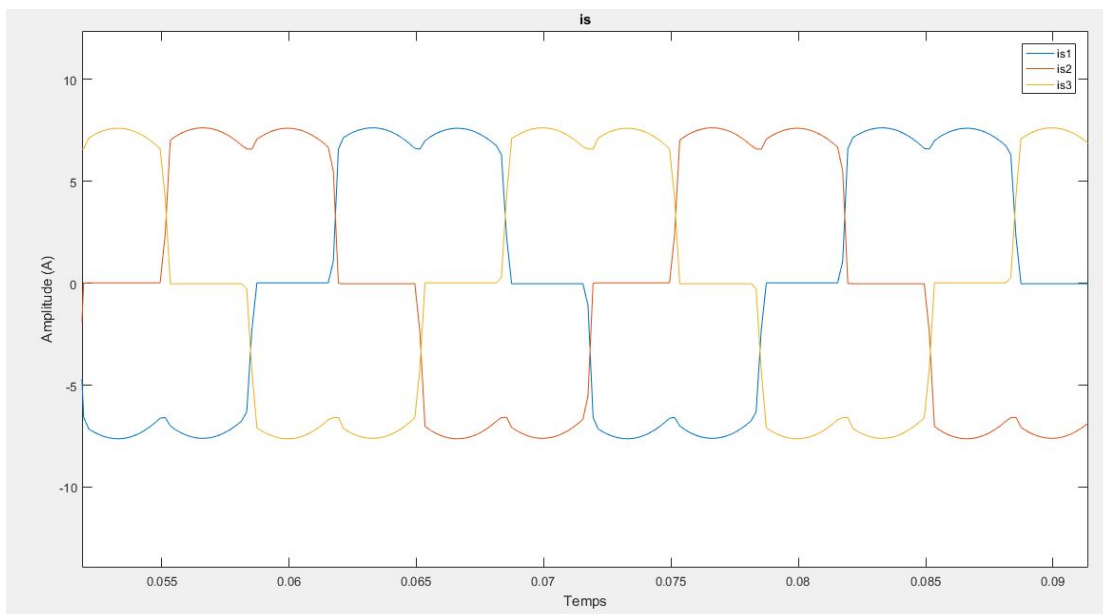


Figure 4.5 Les trois courants de la source (i_{s1}, i_{s2}, i_{s3})

C) Identification des courants Perturbés

Le courant de référence pour la compensation des harmoniques est identifié par la méthode des puissances instantanés qui a été illustré dans le chapitre précédent est représenté dans (la figure 4.6):

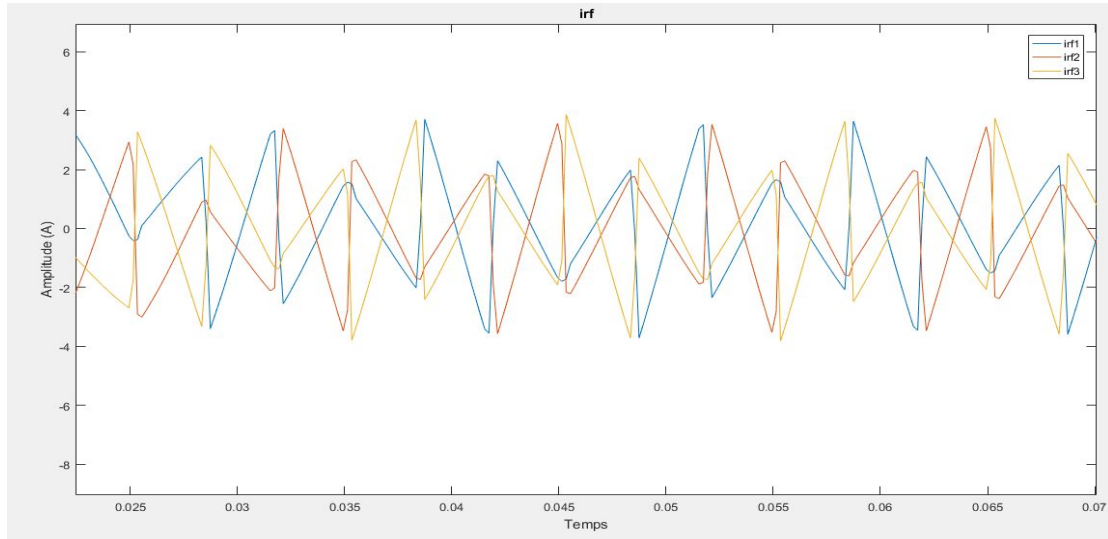


Figure 4.6 Les courants des référence ($i_{rf1}, i_{rf2}, i_{rf3}$)

D) Le courant généré par le filtre actif

On représente dans (la figure 4.7) le courant généré par le filtre actif:

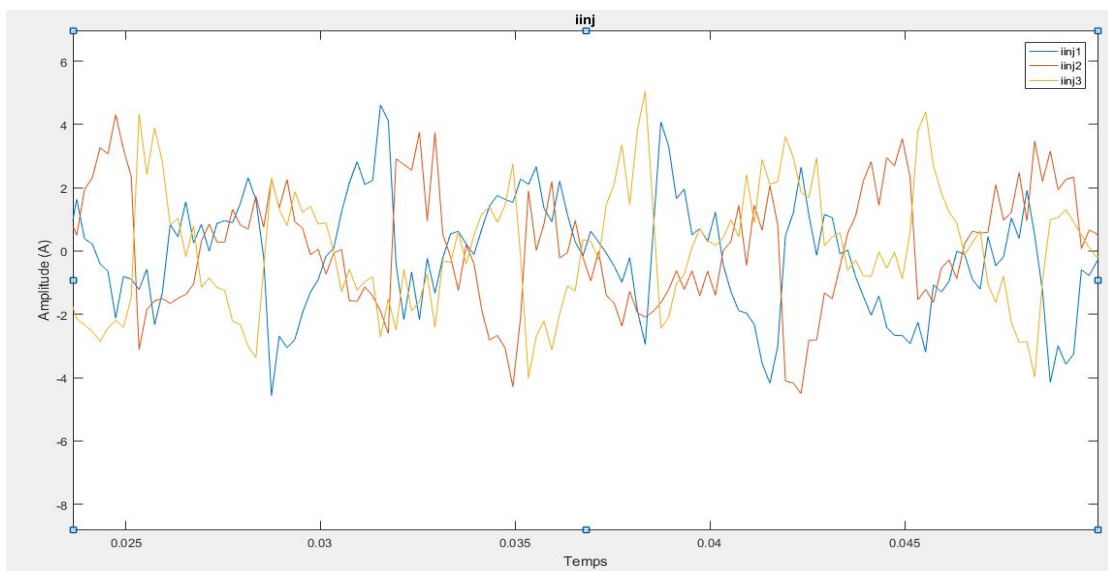


Figure 4.7 Les courant injectés ($i_{ainj}, i_{binj}, i_{cinj}$)

- 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 4.8):

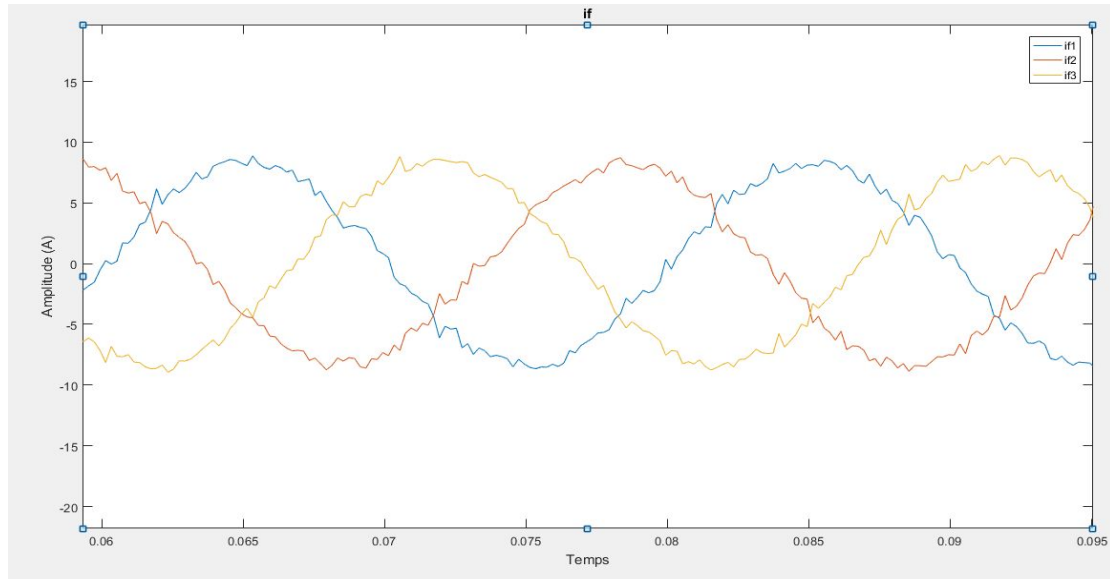


Figure 4.8 Les courants filtrés (i_{af} , i_{bf} , i_{cf})

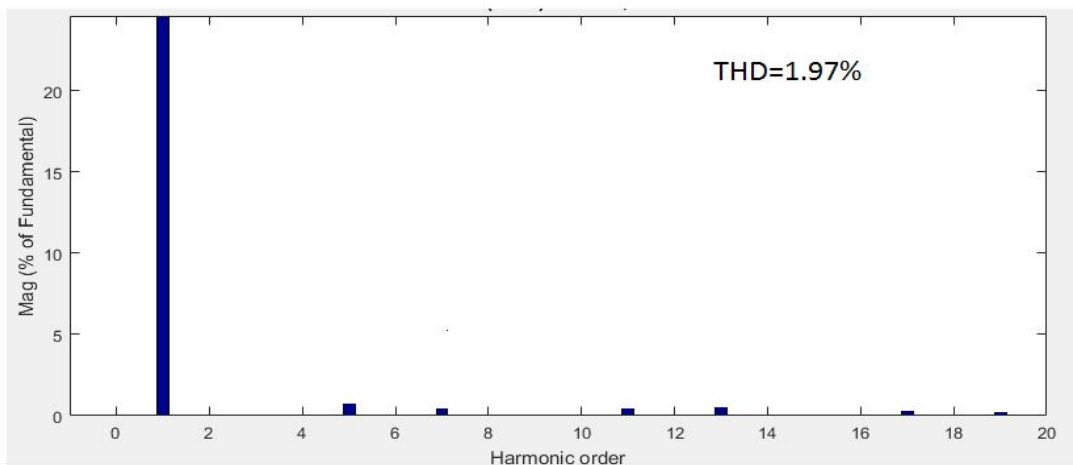


Figure 4.9 Spectre d'harmonique du courant filtré

4.3 Interprétation des résultats

- La forme d'onde du courant filtré (courant du source) n'est pas parfaitement sinusoïdale, les petites pics qui apparaissent sont dus au fait que durant les commutations des semi-conducteur (redresseur).
- Le filtre n'est pas capable d'éliminer tous les harmoniques durant la commutation des thyristors de redresseur. mais les résultats obtenus montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle de puissance, qui a réduit la THD à une valeur inférieure à 5% correspondant aux recommandation et normes internationales.
- Le taux distorsion avant filtrage (25,29%).
- Le taux distorsion après filtrage (1.97%).
- Pour que le signal soit bien filtré, il faut augmenté légèrement la valeur de l'inductance du couplage.

4.4 Conclusion

Dans ce travail on s'intéresse à la modélisation du filtre actif parallèle commandé en hystérésis et alimenté par une source de tension photovoltaïque suffisante et constante.

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 hystérésis.

Il est vrai que la dépollution n'est pas arrivée au niveau souhaité, néanmoins, nous sommes satisfait du résultat obtenu et que notre objectif de démontrer la faisabilité du filtrage actif parallèle à deux niveaux a été atteint.

Conclusion Générale

Ce travail a été consacré aux améliorations des performances des filtres actifs parallèles pour le filtrage des courants perturbateurs harmoniques et la compensation de l'énergie réactive.

Après avoir recensé les origines et les conséquences des perturbations électriques des solutions de dépollution ont été présentées et le choix d'une solution basée sur les principes de filtrage actif type parallèle (FAP) a été retenu. Notre travail portent sur l'étude conjointe de l'identification des harmoniques et de la commande de l'onduleur.

La méthode d'identification des puissances instantanées a été choisie pour identifier le plus grand nombre de perturbations en courant, tels que les courants harmoniques. Cette méthode exige une tension de réseau sinusoïdal, pour pouvoir fournir uniquement les perturbations en courant émises par la charge polluante. Elle offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation.

La modélisation de l'ensemble réseau, charge polluante et filtre actif parallèle a été présenté dans le cas de la commande par Hystérésis pour une charge non linéaires à savoir un redresseur triphasé à diodes alimentant une charge RL série.

La validation de la méthode des puissances instantanées a été effectuée par simulation à partir du logiciel Matlab-Simulink. Plusieurs cas de simulation accompagnés d'une analyse temporelle et d'une analyse spectrale ont été effectués à partir du modèle de l'ensemble réseau, filtre actif parallèle et charge polluante.

Les résultats de simulation montrent que le filtre actif parallèle dépollue efficacement le réseau électrique des harmoniques générées par la charge non linéaire.

Tables des Matières

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre 1

Les harmoniques et ses effets sur les réseaux électriques

1.1 Introduction.....	3
1.2 Les harmoniques.....	4
1.2.1 Les sources des harmoniques.....	4
1.2.1.1 Émission en tension.....	4
1.2.1.2 Émission en courant.....	6
1.2.2 Conséquence néfastes des harmoniques.....	8
1.2.3 Grandeurs caractéristique.....	8
a) Grandeur harmonique.....	8
b) Rang d'harmonique.....	8
c) série de Fourier.....	9
d) Valeur efficace d'une grandeur alternative.....	10
1.2.4 Spectre d'harmonique (de fréquence).....	10
1.2.5 Taux de distorsion d'harmonique.....	10
a) Taux de distorsion harmonique en courant THDI	11
b) Le taux de distorsion harmonique de la tension THDV	12
c) Normes imposées sur le THD.....	13
1.2.6 influence des harmoniques sur le facteur de puissance	13
1.2.7 Effets des perturbations harmoniques.....	14
a) Les effets instantanés ou à court terme.....	14
b) Les effets à long terme.....	15
1.3 Charges linéaires et non linéaires.....	15
1.3.1 Charge Linéaire.....	15
1.3.2 Charge non Linéaire.....	16
1.3.3 Charge non linéaire raccordée au réseau.....	16

1.4 Conclusion.....	17
---------------------	----

Chapitre 2

Solutions de dépollution classiques

2.1 Introduction.....	18
2.2 Solutions de dépollutions classiques.....	18
2.2.1 Ajout d'une inductance de lissage de courant.....	18
2.2.2 Confinement des harmoniques.....	19
2.2.3 Les filtres passifs.....	19
a) Filtre passif résonant.....	20
b) Filtre passif amorti.....	20
2.2.4 Inconvénients des filtres passifs.....	21
a) Antirésonant.....	21
b) Vieillessement.....	21
2.3 Solutions modernes de dépollution.....	21
2.3.1 Filtrage actif.....	22
a) Filtre actif parallèle.....	23
Principe de filtrage actif parallèle.....	23
b) Filtre actif série.....	25
c) Combinaison parallèle série actif.....	25
d) Filtrage hybride.....	26
Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.....	27
Filtre actif série connecté en série avec des filtre passifs parallèle.....	27
Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	28
2.3.2 Les avantages des filtres actifs.....	28
2.4 Conclusion.....	30

Chapitre 3

Modélisation et la commande d'un filtre actif parallèle

3.1 Introduction.....	31
3.2 Structure d'un filtre actif parallèle.....	32
3.3.1 La partie puissance.....	33
A) Onduleur de tension.....	33
Configuration.....	34
L'onduleur à neutre raccordé.....	34
L'onduleur sans neutre raccordé.....	34
Équations de basse.....	34
B) Système de stockage d'énergie.....	36
Conversion d'énergie.....	37
Solaire à concentration thermodynamique.....	37
Solaire thermique	37
Solaire photovoltaïque	37
Principe de la génération photovoltaïque.....	37
Caractéristique de la cellule photovoltaïque.....	38
Paramètre d'une cellule photovoltaïque.....	39
Le panneau solaire.....	39
Caractéristique d'un panneau solaire.....	40
C) Filtre de sortie.....	41
3.3.2) La partie contrôle - commande.....	41
A) La méthode d'identification des courants perturbés.....	42
Méthode du domaine fréquentiel.....	42
Méthode du domaine temporel.....	42
Méthode des puissance instantanées.....	43
Séparation des puissance perturbatrices.....	46
Calcul des courants perturbés.....	46

B) Régulation de la tension continue.....	48
C) Commande de l'onduleur.....	48
Commande par hystérésis.....	48
Commande par MLI.....	50
3.3.3) Conclusion.....	52

Chapitre 4

Simulation et résultat d'un filtre actif parallèle

4.1 Introduction.....	53
4.2 Résultat de la simulation.....	56
A) Le courant de la charge polluante.....	56
B) Tension et courants du réseau électrique.....	57
C) Identification des courants perturbés.....	58
D) Le courant généré par le filtre actif parallèle.....	59
E) Le courant filtré.....	60
4.3 Interprétations des résultats.....	61
4.4 Conclusion.....	62

Liste des figures

Figure 1.1 Les harmoniques.....	4
Figure 1.2 Le spectre des harmoniques du courant de charge polluante.....	10
Figure 1.3 Alimentation d'une charge non linéaire.....	16
Figure 1.4 Circuit électrique équivalent d'alimentation d'une charge non linéaire....	17
Figure 2.1 Filtre Passif.....	19
Figure 2.2 Filtre Passif résonant.....	20
Figure 2.3 Filtre passif amorti.....	20
Figure 2.4 Montage d'un filtre actif parallèle.....	23
Figure 2.5 Principe du filtrage actif parallèle.....	24
Figure 2.6 Les courants absorbés par un redresseur.....	24
Figure 2.7 Montage d'un filtre actif série.....	25
Figure 2.8 Combinaison parallèle–série actif (UPQC).....	26
Figure 2.9 Filtre actif série avec filtre passif parallèle.....	27
Figure 2.10 Filtre actif série connecté en série avec filtre passif parallèle.....	27
Figure 2.11 Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	28
Figure 3.1 Schéma synoptique du filtrage actif parallèle.....	31
Figure 3.2 Progrès dans la technologie des semi-conducteurs.....	31
Figure 3.3 Structure générale du filtre actif parallèle.....	33
Figure 3.4 Onduleur de tension triphasé.....	34
Figure 3.5 Schéma d'une cellule élémentaire.....	38
Figure 3.6 Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.....	38
Figure 3.7 Panneau photovoltaïque.....	39
Figure 3.8 Courbe caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque.....	40
Figure 3.9 Courbe caractéristique puissance-tension d'un module photovoltaïque..	40
Figure 3.10 Filtre de Sortie.....	41
Figure 3.11 Principe de la Théorie P-Q pour déterminer les Courants de références.	45
Figure 3.12 Filtre passe bas 2 ^{ème} ordre.....	46

Figure 3.13 Calcul des Courants de Références.....	47
Figure 3.14 Bloc fonctionnel de calcul des courants de référence.....	47
Figure 3.15 Principe de commande des courants par Hystérésis sous Simulink.....	49
Figure 3.16 Commande Par MLI.....	51
Figure 3.17 Principe de Commande par MLI.....	51
Figure 4.1 Schéma global du système.....	54
Figure 4.2 Les courants de charge.....	56
Figure 4.3 Spectre d'harmonique du courant pollué.....	56
Figure 4.4 Les trois tensions du réseau électrique.....	57
Figure 4.5 Les trois courants de la source.....	58
Figure 4.6 Les courants des références.....	58
Figure 4.7 Les courants injectés.....	59
Figure 4.8 Les courant filtrés.....	60
Figure 4.9 Spectre d'harmonique du courant filtré.....	60

Liste des Tableaux

Tableau 1.1 Niveau de compatibilité des harmoniques en tension.....	6
Tableau 1.2 Exemple de limitation des émissions de courants harmoniques.....	7
Tableau 1.3 THDI pour diverses non linéaires.....	12
Tableau 2.1 Comparaison de différents filtrages.....	29
Tableau 4.1 Les paramètres de simulation.....	55

Listes des acronymes et abréviations

ASI: Alimentations statiques interruptibles

THD: Taux de distorsion d'harmonique

THDI: Le taux de distorsion harmonique en courant

THDV: Le taux de distorsion harmonique en tension

FP: Facteur de puissance

PV: Panneau solaire

FAP: Filtre actif parallèle

FAS: Filtre actif série

UPQC: Unified power quality conditioner

Références Bibliographiques

- [1],[11] **A. Chaoui**, “ Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires“, Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Décembre 2010.
- [2] **CHALAH SAMIRA**, «Analyse stochastique de la résultante de l’injection de courants harmoniques dans un réseau électrique ». Mémoire de magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 17/05/2012.
- [3] **H. AKAGI, Y. KANAZAWA, A. NABAE** «Generalized theory of the instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components », IEEE Trans . Ind . Appl , vol. IA-20, No.9,pp. 652-630,May/June 1984.
- [4] **C. COLLOMBET, J. LUPIN et J. SCHONEK** «Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement».Cahier Technique Schneider Electric n° 152, septembre 1999.
- [5] **S .BOUGUERRA et I.BOURENNANE** « filtrage actifs parallèles des réseaux électriques avec compensation de l’énergie réactive ». mémoire d’ingénieur d’état en génie électrotechnique, Université de m’sila,2007.
- [6] **DEFLANDRE.T, MAURAS .P** « Les harmoniques sue les réseaux électriques »
- [7] **ESCRIVA .G** « Dépollution harmonique des réseaux basse tension,En Perturbations Réciproques des convertisseurs et des réseaux ».
- [8] **DJEGHLOUD HIND** « Filtrage actif de puissance type parallèle à trois niveaux», thèse de magister, université Mentouri Constantine, 20octobre2002.
- [9] **THIERRY GOURAUD** « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans les réseaux de distribution électrique », thèse de doctorat, école doctorale de Nantes.
- [10] **L. Benchaita**,« Étude, par simulation numérique et expérimentation, d’un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande » Thèse de l’Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 30 Octobre 1998.
- [12] **C. Dewez**, “Modélisation d’un filtre actif parallèle triphasé pour la dépollution harmonique et synthèse d’une commande basée sur le rejet de perturbations “,

Thèse de doctorat,

[13] LABRIQUE. F, SEGUIER.G et BAUSIÈRE «Les convertisseurs de l'électronique de puissance : 4. La conversion continu - alternatif». 2ème édition. Technique & documentation Lavoisier, 1995.

[14] ALALI M.A.E « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », thèse de doctorat, l'université Louis Pasteur, 2002

[15],[16] A. Chaoui, " Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires",

Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Décembre 2010.

[17] CHALAH SAMIRA, «Analyse stochastique de la résultante de l'injection de courants harmoniques dans un réseau électrique ». Mémoire de magister Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 17/05/2012.

[18] A.HAMIDI « contribution à l'étude du filtre hybrides de puissance Utilisé pour améliorer la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques de distribution » Thèse de doctorat ,École de technologie supérieure –Québec, Canada ,2010.

[19] M.A.E. ALALI.« Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension ».Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 12 Sep 2002.

[20] A.HAMIDI,S.RAHMANI and K.AI-HADAD « fellow ,A New Hybrid Series Active filter configuration to compensate voltage sag , swell ,voltage and current harmonics and Reactive power »,IEEE International symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009)Seoul Olympic Parktel, Seoul , Korea,2009.

[21] (2010) <http://www.solarsercer.de/?gclid>.

[22] Leonard Leslie 'Design and analysis of a grid connected photovoltaic generation system with active filtering function' Virginia.

[23] G.Walker.'Evaluation MPPT converter topologies using a MATLAB PV model'.journal of Electrical and Electronics Engineering Australia.

[24] W.M Grady, S. Santos, Understanding power system Harmonics, IEEE power Engineering Review,November,2001.

[25] S.TADJER,I.HABI 'problématique et identification des perturbations harmoniques dans un réseau basse tension'.UniversitéM'Hamed Bougara.

[26] H.Akagi, Y Kanazawa, Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching devices without Energy Storage Component. IEEE Trans.vol.

[27] Rahmat allah Hooshmand, Mahdi Esfahani, 'A new combined method in active filter design for power quality improvement in power system'.

[28] PFE, Lati Abdelhai,Chalabi walid 'sliding mode control of a three phase shunt active power filter' Boumerdes.

[29] BOUAFIA ABDLOUAHAB ,Technique de commande prédictive floue pour les systèmes d'électronique de puissances,Thèse présentée pour l'obtention du titre de doctorat 2010.

[30],[31] Mohamed Muftah Abdusalam,Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validation,Thèse présentée pour l'obtention du titre de doctorat,Université Henri Poincaré.