REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ZIANE ACHOUR DE DJELFA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Polycopié de cours

1ère Année Master Electrotechnique.

Option :
Réseau électrique.
Commande électrique.
Machine électrique.

Par : ELBAR Mohamed

Electronique de Puissance et Qualité de l'Energie Electrique

Préambule

Ce polycopié est destiné à être utilisé comme un manuel par les étudiants en deuxième année Electrotechnique dans le domaine de la production de l'énergie électrique. Il a été rédigé dans le but de permettre d'avoir un outil de travail et de référence recouvrant les connaissances qui leur sont demandés. Le manuscrit est constitué de cours, il est conforme aux programmes agrée par le ministère. Sa présentation didactique est le fruit de plusieurs années d'expérience pédagogique par l'auteur. Son contenu résulte de la lecture de nombreux ouvrages et documents dont les plus importants sont cités dans les références bibliographiques.

La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs, ou consommateurs d'électricité. Elle est devenue un sujet de grand intérêt ces dernières années, essentiellement pour les raisons suivantes :

- Des impératifs économiques : les perturbations électriques ont un coût élevé pour les industriels car elles engendrent des arrêts de production, des pertes de matières premières, une baisse de la qualité de la production, un vieillissement prématuré des équipements, etc.
- La généralisation des équipements sensibles aux perturbations et/ou générateurs de perturbations : du fait de leurs multiples avantages (souplesse de fonctionnement, excellent rendement, performances élevées) on constate le développement et la généralisation des équipements d'électronique de puissance. Ces équipements ont la particularité d'être à la fois sensibles aux perturbations de tension, et générateurs de perturbations.
- L'ouverture du marché de l'électricité : la libéralisation du marché de l'électricité fait que la qualité de l'énergie électrique est devenue un des critères de choix d'un fournisseur d'énergie plutôt qu'un autre de la part des consommateurs. Les fournisseurs se doivent donc de fournir à leurs clients une énergie avec une qualité maximale.

Sommaire

Sommaire

Introduction Générale 1

Chapitre I : Electronique de Puissance et Qualité de l'Energie Electrique

I- Introduction 5
II- Transport de l'énergie électrique les systèmes triphasés 5
II-1 Couplage étoile 6
II-1.1 Importance du conducteur de neutre 6
II-1.2 Cas particuliers 7
II-2 Couplage triangle 8
III- Dégradation de la qualité de l'énergie électrique : critères et définitions 8
III.1 Critères de qualité de l'énergie électrique 8
III.2 Origines et effets des perturbations électriques 8
III.3 Les charges non-linéaires dans les systèmes triphasés à trois et à quatre fils 10
IV - Solutions pour améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique 10
IV.1 Les solutions à base d'électronique de puissance 11
IV.1.1 Les alimentations sans interruption ASI 11
IV.1.2 Le Filtrage actif 12
IV.1.3 Le Redresseur à MLI (RMLI) 14
V. Conclusion 14

Chapitre II : Filtrage Actif Parallèle Pour Réseaux 4 Fils

I– Introduction 50
II- Analyse du FAP triphasé sur un réseau quatre fils 50
II.1 Analyse spectrale du courant de neutre pour charges non linéaires déséquilibrées 52
II.2 Topologies du filtre actif parallèle à quatre fils 53
II.3 Analyse comparative entre les topologies 53
III- Description de filtre actif de puissance constitué d'un onduleur triphasé à trois bras avec condensateurs à point milieu 55
III- 1 Schéma de représentation 56
III-2 Modèle mathématique du filtre 57
IV. Description de filtre actif de puissance constitué d'un onduleur triphasé à quatre bras 59
IV. 1 Schéma de représentation 59
V - Conclusion 61

Conclusion Générale 29
Références Bibliographiques 30

Introduction Générale

Introduction Générale

Les avancées technologiques obtenues ces dernières années dans le domaine des composants de l'électronique de puissance ont donné naissance à de nombreuses applications qui offrent aux clients un confort, une flexibilité et une efficacité meilleure. L'électronique de puissance s'est imposée comme un des éléments essentiels dans la conversion de l'énergie électrique favorisant ainsi une croissance du marché des convertisseurs dans la plupart des applications industrielles.

Une bonne qualité de l'onde est caractérisée par une onde parfaitement sinusoïdale avec une amplitude et une fréquence constante. Par contre, la prolifération des convertisseurs statiques se traduit par une augmentation de la pollution harmonique des réseaux **[Ala-02]**, et davantage de consommation de la puissance réactive qui a pour conséquence immédiate de dégrader le facteur de puissance global du réseau. Cela a des conséquences directes sur la forme des ondes de tension et de courants qui deviennent non sinusoïdaux **[ABD-05]**.

Une alimentation par une tension ou un courant déformé engendre des perturbations conséquentes dans le fonctionnement de plusieurs appareils électroniques sensibles à ce genre de problèmes : Appareils médicaux, ordinateurs, automates programmables, etc.
Les harmoniques peuvent causer d'autres problèmes plus subtils : exemple des compteurs d'énergie électrique qui indiquent un surplus de consommation, des relais de protection, des réseaux téléphoniques soumis à des interférences.

Ces dernières années, la qualité du courant électrique devient une préoccupation importante pour les distributeurs d'énergie et pour leurs clients. Schématiquement, les travaux visant à améliorer la qualité de l'énergie peuvent se scinder en deux groupes selon qu'ils proposent une action préventive ou correctrice **[HAM-04]**.

- La première approche, de nature préventive, s'applique aux nouvelles installations et consiste à intégrer la minimisation des perturbations dès le stade de conception en utilisant des convertisseurs dits « propres » ou peu polluants.
- La deuxième approche, de nature curative, consiste à utiliser des filtres actifs de puissance dont le rôle est d'identifier et d'éliminer en temps réel les perturbations existantes.

Le filtre actif parallèle à structure tension triphasée a été retenue pour ses excellentes performances en termes de compensation des harmoniques et correction du facteur de puissance**.** Cependant, la plupart des installations (les systèmes à 4 fils) alimentent des charges non linéaires monophasées ou des charges triphasées déséquilibrées et sont donc munies d'un fil de neutre (système à 4 fils). Les courants de lignes sont généralement déséquilibrés et le fil de neutre est parcouru par un courant égal à la somme des courants de phases et sa valeur maximale peut excéder celle du courant de ligne. Le filtre actif parallèle à trois fils paraît incapable d'éliminer ces courants lorsqu'il est connecté à un réseau à quatre fils (avec la présence de fil du neutre) **[Had-96].**

Dans ce contexte, le travail présenté dans ce projet concerne plus particulièrement l'utilisation du filtre actif à quatre fils afin de réduire les harmoniques et d'avoir un facteur de puissance unitaire pour le cas des réseaux basse tension à quatre fils.

Ce mémoire comporte quatre chapitres. Il est organisé de la façon suivante :

- Dans le premier chapitre, nous introduisons le concept de qualité de l'énergie électrique. Nous évoquons brièvement les problèmes de pollution des réseaux liés à l'utilisation de charges non linéaires, et présentons quelques solutions à base d'électronique de puissance permettant d'y remédier ou d'améliorer de manière générale la qualité de l'énergie.

- Dans le deuxième chapitre, l'étude des topologies des filtres actifs de puissances, pour compenser les harmoniques de courant générés par des charges non linéaires reliées à un réseau électrique triphasé à quatre fils. Nous commençons par l'analyse du fonctionnement d'un filtre actif triphasé connecté à un réseau à quatre fils alimentant trois charges non linéaires déséquilibrées. Ensuite, nous étudions en détail les deux topologies de filtre actif de puissance (structure à trois bras avec condensateurs à point milieu et structure à quatre bras)

- Dans le troisième chapitre, nous étudions en détail les stratégies de commande pour la compensation des harmoniques générées par les charges non linéaires reliées à un réseau électrique à quatre fils. De plus et pour rendre les méthodes étudiées générales et pour n'importe quelle forme de tension, nous utilisons un PLL **[BENH-04].** Ce système sera intégré dans les méthodes d'identification des courants perturbés afin de généraliser l'application de ces dernières dans les cas les plus défavorables de la tension du réseau. Ensuite, nous terminons par la synthèse et la comparaison des différentes stratégies étudiées.

- Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter les résultats de simulation du système complet (réseau électrique, charge non linéaire, filtre actif) pour les deux topologies et les différentes commandes de filtres actifs de puissance. Afin de montrer la robustesse des méthodes proposées, on s'est mis dans le cas le plus défavorable à savoir le déséquilibre de la charge et celui des tensions du réseau.

Avant de conclure, une synthèse de tous les résultats obtenus par les diverses méthodes de contrôle appliquées aux deux topologies des filtres actifs sera présentée.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale qui permettra de donner quelques recommandations quant aux choix de la structure la mieux adaptée et la méthode la plus adéquate pour la contrôlée.

Chapitre I

Electronique de Puissance et Qualité de l'Energie Electrique

I- Introduction

La multiplicité des dispositifs d'électronique de puissance au sein d'un même procédé exige une alimentation électrique de plus en plus performante en termes de continuité et de qualité. La notion de qualité du produit « électricité » est attachée au niveau de satisfaction de l'utilisateur. Les performances de ses équipements sont directement liées à la qualité de la tension d'alimentation **[ABD-05].** Cette tension subit généralement beaucoup de perturbations de deux origines distinctes **[Ala-02]** :

- Les perturbations de tension causées par le passage, dans les réseaux électriques, des courants perturbateurs comme les courants harmoniques, déséquilibrés et réactifs,
- Les perturbations de tension causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques et déséquilibrées et les creux de tension.

Afin d'éviter le dysfonctionnement, voire la destruction des composants du réseau électrique ou des récepteurs finaux, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

L'objectif de ce chapitre est de rappeler brièvement l'origine des phénomènes perturbateurs et leur impact sur les réseaux. Nous analyserons ensuite les structures usuelles d'électronique de puissance utilisées dans le cadre de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique (**QEE**) et la conduite des réseaux.

II- Transport de l'énergie électrique les systèmes triphasés

Le système triphasé fut présenté pour la première fois en 1893 **[Pie-03].** Il offre plusieurs avantages :

- Permet le transport du maximum d'énergie électrique avec le minimum de section des conducteurs de ligne.
- Permet de diminuer les pertes par effet joule ainsi que les chutes de tension en ligne dues à l'importance du volume de cuivre. La masse du cuivre des lignes pour le triphasé (3 conducteurs) est de : 50% plus économique comparé au monophasé
- Permet d'établir dans les moteurs un champ magnétique tournant. Un système monophasé permet d'obtenir qu'un champ magnétique alternatif sinusoïdal.
- Dans les montages à redresseurs, le système triphasé a un taux d'ondulation nettement inférieur à celui du monophasé.

On peut coupler ce système on deux façons :

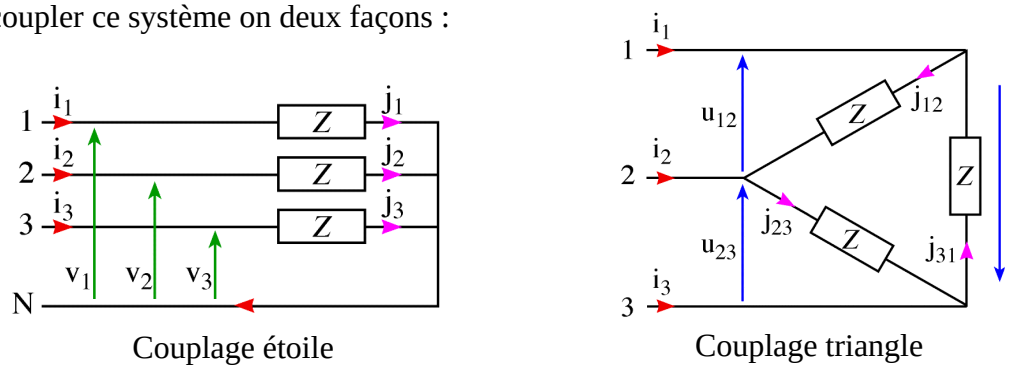


Figure I. 1: Les deux façons de couplage

II-1 Couplage étoile

Si l'on relie entre eux les trois conducteurs de retour des trois circuits monophasés, le nouveau conducteur ainsi formé est appelé "Conducteur de neutre ou d'équilibre». Le nombre de conducteurs est ramené de 6 à 4.

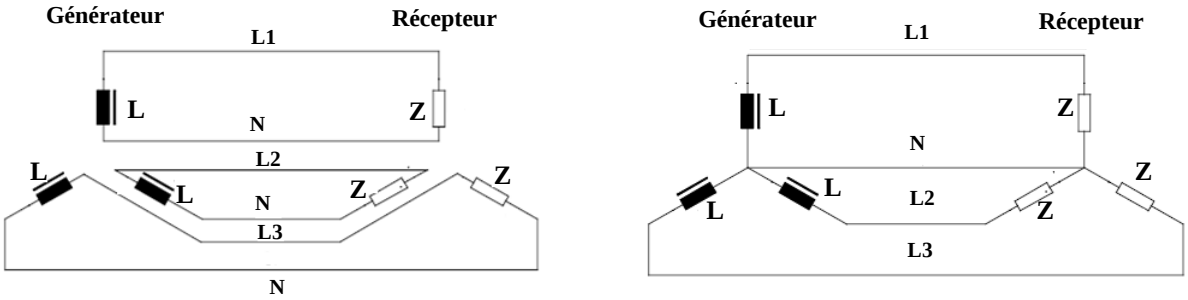


Figure I. 2: Couplage étoile (Trois circuits monophasés)

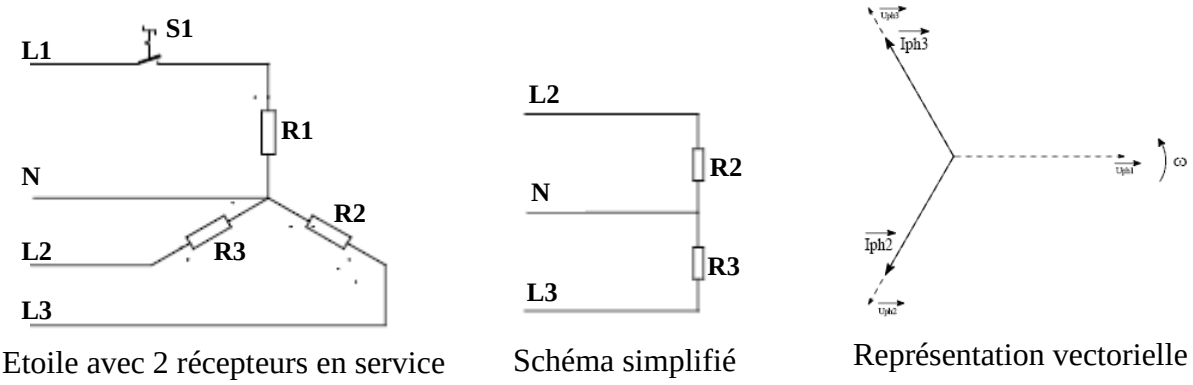
II-1.1 Importance du conducteur de neutre

Le fil neutre sur un montage étoile équilibré semble inutile, mais sa présence permet d'assurer la sécurité de l'installation en cas de déséquilibre à la suite de la modification de l'un des dipôles. Si l'on coupe le conducteur de neutre dans un système triphasé étoile non équilibré, les courants de ligne se répartissent de telle manière (en amplitude et en position angulaire), que leur somme géométrique ou algébrique des valeurs instantanées soit égale à **0**. Il s'ensuivra une modification de l'angle entre les trois courants de ligne. Cet angle sera différent de $2\pi/3$ dont la conséquence est un changement de la tension de phase aux bornes des récepteurs **[Pie-03]**. C'est pour cette raison que le conducteur de neutre ne doit jamais être coupé.

Grâce au conducteur de neutre, la tension aux bornes de chaque récepteur différent les uns des autres. La tension de phase u_{ph}, est imposée aux récepteurs par l'intermédiaire du conducteur de neutre. La tension de phase est donc $\sqrt{3}$ plus petite que la tension composée.

II-1.2 Cas particuliers

II-1.2.1 Deux récepteurs sur trois sont en service (couplage étoile avec neutre)



Etoile avec 2 récepteurs en service Schéma simplifié Représentation vectorielle

Figure I. 3: Couplage étoile avec neutre (2 récepteurs en service)

Le courant de neutre, égal a la **somme vectorielle** et il est différent de zéro. Le conducteur de neutre maintient le même potentiel aux bornes des récepteurs.

II-1.2.2 Deux récepteurs sur trois sont en service (couplage étoile sans neutre)

Les deux récepteurs se trouvent placés en série sous la tension de ligne U.

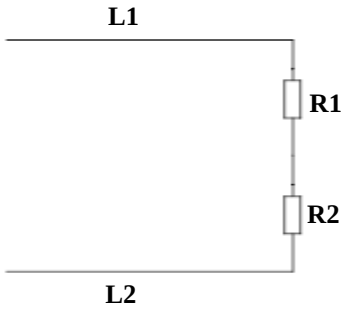


Figure I. 4: Couplage étoile sans neutre. (2 récepteurs en service.)

II-2 Couplage triangle

Ce couplage consiste à relier en série les trois récepteurs et d'amener un conducteur de ligne à chaque point de liaison intermédiaire des récepteurs. Il n'y a pas de conducteur de neutre dans un couplage triangle car à aucun moment les trois récepteurs ont un point commun **[Pie-03].**

III- Dégradation de la qualité de l'énergie électrique : critères et définitions

III.1 Critères de qualité de l'énergie électrique

Les critères de qualité de l'électricité sont directement issus de l'observation des perturbations électromagnétiques des réseaux électriques. Ces perturbations sont susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels. On parle de compatibilité électromagnétique (**CEM**) afin de caractériser l'aptitude et le comportement d'un appareil, d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui-même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs **[ABD-05]**.

La mesure de la qualité de l'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basses fréquences (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur le réseau). En analysant un système électrique composé d'un réseau d'alimentation et d'une charge industrielle, en l'occurrence un équipement d'électronique de puissance (**figure 1.5**), nous pouvons facilement recenser le double effet de ce type d'équipement sur le reste du système et les répercussions néfastes sur lui-même **[ABD-05].**

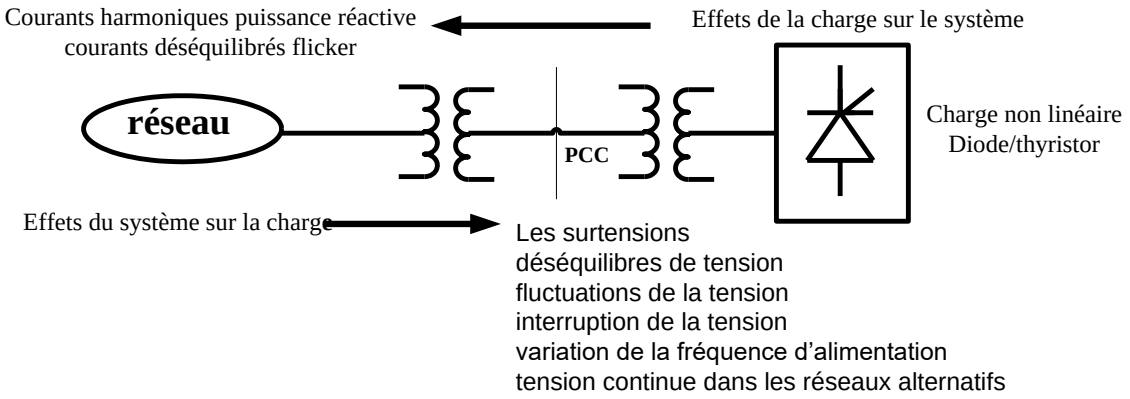


Figure I. 5: Dégradation de la QEE due à une charge non linéaire dans une installation électrique

III.2 Origines et effets des perturbations électriques

Perturbations	Origine	Principaux effets	Solutions possibles
Creux de tension	Court-circuit, enclenchement de gros moteur, appels de charge importants, défauts internes ou externes	Variations de vitesse et arrêts d'équipements, perturbation de l'électronique numérique, dysfonctionnement de régulateurs et variateurs	Alimentation sans interruption (ASI), conditionneur de réseau, augmentation de la puissance de court circuit
Variation de la fréquence	Réseaux électriques, fonctionnement ilôté sur groupe autonome	Dysfonctionnement, équipement électronique, variation de vitesse des moteurs	Alimentation sans interruption (ASI)
Fluctuation rapide (Flicker)	Installations fluctuantes : four à arc, soudeuse, moteur à démarrage, éolienne…	Fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou Flicker)	Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série
Coupures longues	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Perturbation ou arrêt de procédé, pertes de production, ouverture de contacteur, extinction des lampes à décharge	Alimentation de secours, alimentation sans interruption (ASI)
Harmoniques	Installations non linéaires, charges non linéaires (variateurs de vitesse, fours à arc, machines à souder, lampes fluorescentes)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs…), conducteurs de neutre (surcharge), diélectriques (vieillissement d'isolants), dégradation de rendement énergétique, pertes de productivité	Filtrage actif ou passif, self antiharmonique, inductance de ligne, filtre hybride, déclasser les équipements, augmenter la puissance de court-circuit
Interharmoniques	Installations non linéaires et fluctuantes (fours à arc, machines à souder, éolienne), cycloconvertisseurs, télécommande centralisée	Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatisme, perturbation des signaux de tarification, dégâts mécaniques sur machines tournantes	Filtrage actif ou passif, amortissement de filtres antiharmonique
Déséquilibre	Charges déséquilibrées (charge monophasée de forte puissance, tractions ferroviaires…	Echauffement des machines tournantes, couple moteur inverse (vibration), dysfonctionnement de protections	Augmentation de la puissance de court-circuit, conditionneur du réseau, dispositif d'équilibrage, filtrage actif parallèle
Surtension	Manœuvres d'appareillage et de condensateurs, court-circuit, foudre	Déclenchement intempestif, destruction d'appareillage, danger pour les personnes et pour le matériel.	Parafoudre, séparation galvanique, parasurtenseur, enclenchement synchronisé, self de choc

Tableau I. 1: L'ensemble des phénomènes perturbateurs avec quelques remèdes possibles

Dans le **Tableau I.1**, nous donnons une vue d'ensemble sur les phénomènes perturbateurs. Il résume les différentes sources de perturbation et donne quelques conséquences qui y sont associées. Une dernière colonne résume brièvement les remèdes utilisables en cas de besoin **[Mey-90].**

III.3 Les charges non-linéaires dans les systèmes triphasés à trois et à quatre fils

Les redresseurs à diode et les redresseurs de thyristors sont les types les bien connus de charges non-linéaires**.** Ces dispositifs injectent une grande quantité d'harmoniques dans les systèmes d'alimentation. Les charges triphasées non-linéaires injectent principalement les harmoniques impairs de rang ($6k \pm 1$). La séquence d'harmonique ($6k+3$) existerait si la charge était déséquilibrée.

Les charges non-linéaires monophasées injectent tous les harmoniques impairs avec les harmoniques multiples de **3** dominants. Les harmoniques **3k** se rassemblent dans le fil de neutre et posent des problèmes de surchauffe excessifs dans les conducteurs neutres des transformateurs de distribution **[Uns-00]**.

IV - Solutions pour améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique

Pour faire face aux perturbations, deux types de solutions sont proposées, traditionnelles et modernes **[ABD-05].** Sans trop détailler les solutions traditionnelles, nous nous limiterons juste à les citer.

- Inductance antiharmonique de protection des condensateurs.
- Inductance de lissage des courants.
- Confinement des harmoniques.
- Augmentation de l'indice de modulation.
- Utilisation de filtres passifs : la méthode la plus simple pour réduire les harmoniques consiste à utiliser des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des condensateurs. Il existe deux classes de filtres passifs : le shunt résonant et le filtre amorti.

IV.1 Les solutions à base d'électronique de puissance

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors **GTO** et les transistors **IGBT**, la maîtrise de leur mise en œuvre et l'existence de nouvelles méthodes de traitement numérique du signal, ont permis de développer des moyens modernes et efficaces contre les perturbations (harmonique, énergie réactive, coupure, fluctuation…). Parmi ces moyens modernes, on peut citer :

- Les Alimentations Sans Interruption -**ASI** (UPS Uninterruptible Power supplies)
- Le Filtrage actif parallèle et/ou séries (**APF** Active Power Filters)
- Le redresseur à MLI (**PWM** Rectifiers)

IV.1.1 Les alimentations sans interruption ASI

Le premier degré de protection contre les perturbations citées dans le **tableau I.1** est l'utilisation d'alimentation sans interruption (**ASI**). Son principe est de reproduire un système de tension alternatif assurant la continuité de l'alimentation de la charge, dont la permanence est en outre garantie par une batterie intégrée. Développé au début des années 60 pour protéger les grands centres informatiques, il est depuis devenu un objet d'usage courant (**Figure I.6**) **[ABD-05].**

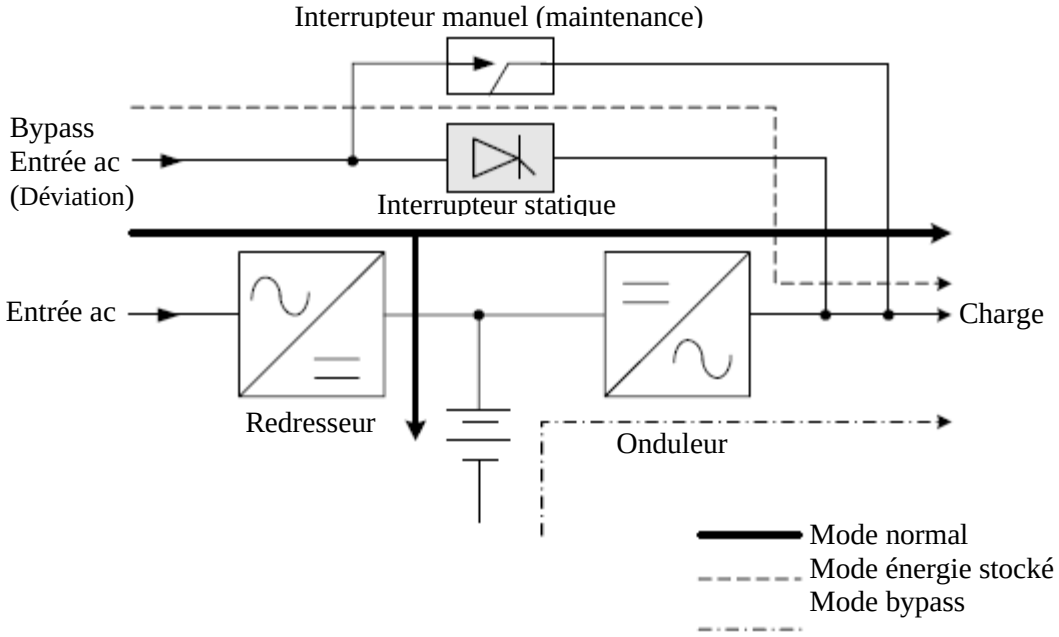


Figure I. 6: Schéma d'une ASI avec ses trois modes

En fonction de la puissance nécessaire à l'installation et de la durée du creux de tension ou de la coupure, le choix se fait entre différents modes (mode courant ou tension).

IV.1.2 Le Filtrage actif

Les filtres actifs sont formés de convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur) associés à un dispositif de contrôle commande adapté. Ils sont assimilables à des sources de courant ou de tension qui éliminent directement les perturbations harmoniques en injectant sur le réseau des courants ou des tensions en opposition par rapport aux perturbations existantes **[BENS-04].**

IV.1.2.1 Le Filtre actif parallèle FAP

Le filtre actif parallèle présenté par **Figure I.7** consiste à neutraliser les harmoniques émis par la charge polluante. Généralement une analyse préalable de la charge permet d'identifier les perturbations et de les renvoyer en opposition de phase sur le réseau via l'onduleur. Le courant résultant côté source est sinusoïdal, voire en phase avec la tension au point de raccordement dans le cas d'une compensation d'harmoniques et du fondamental réactif.

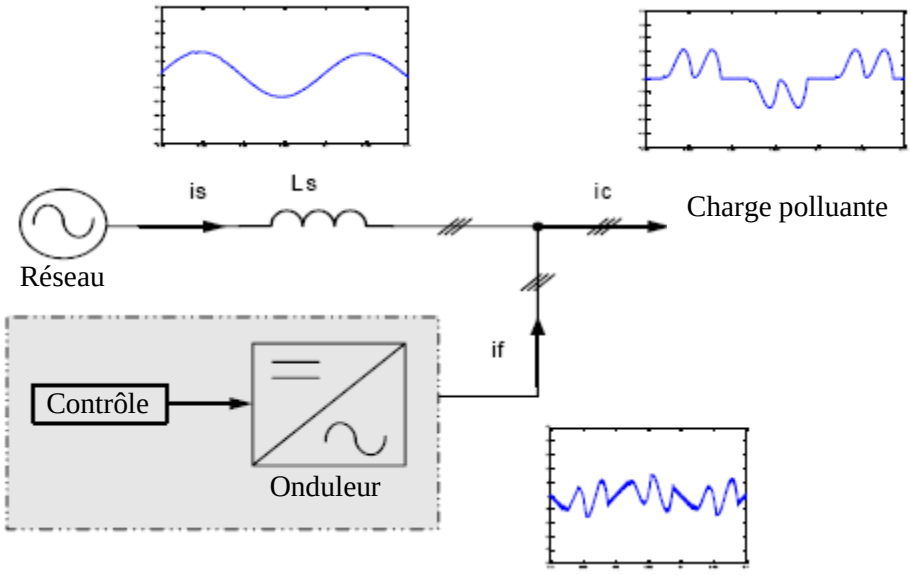


Figure I. 7: Schéma de principe du filtre actif parallèle

IV.1.2.2 Le Filtre Actif Série FAS

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmoniques) (**Figure I.8**) venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance de réseau. Ainsi, la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

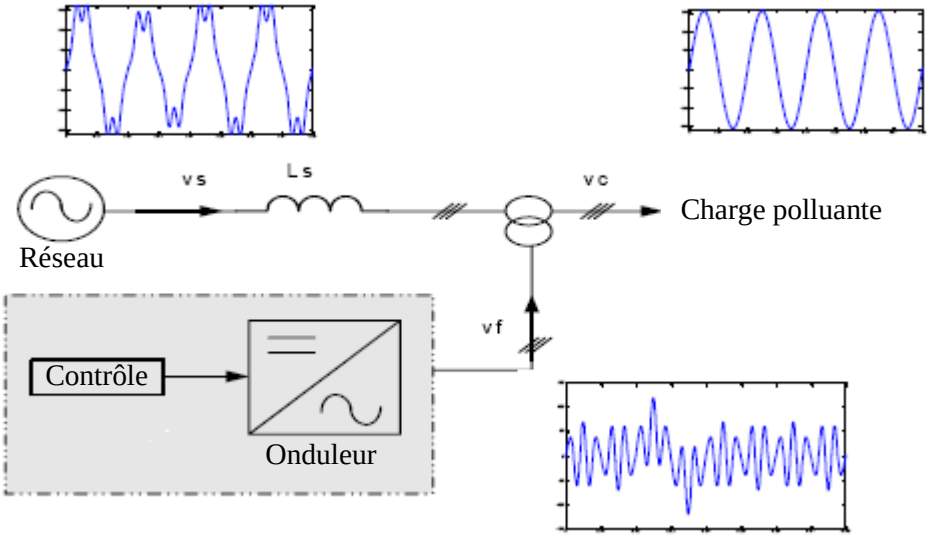


Figure I. 8: Schéma de principe du filtrage actif série

IV.1.2.3 Le Filtrage à structure Hybride

L'association de filtre(s) passif(s) avec un filtre actif constitue une combinaison fréquemment utilisée. Le filtre passif se charge d'éliminer les rangs les plus importants, libérant de la puissance sur le filtre actif pour contrer les autres rangs d'harmoniques.

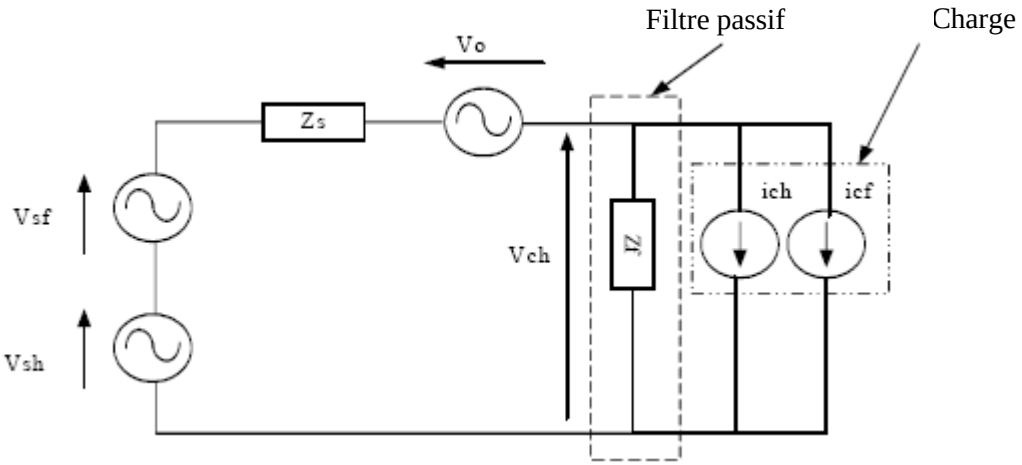


Figure I. 9: Filtrage à structure hybride actif et passif

Plusieurs structures ont été proposées. Les plus fréquemment utilisées sont :

- La structure hybride parallèle série

- La structure hybride série parallèle
- L'association parallèle des filtres passifs et du compensateur actif.

IV.1.3 Le Redresseur à MLI (RMLI)

Le principe du redresseur à absorption sinusoïdale est représenté sur la **Figure. I.10**. Un circuit de régulation assure la commande du transistor de puissance fonctionnant en commutation. Les instants de commutations sont imposés de façon à obtenir un courant parfaitement sinusoïdal. De plus, la tension continue ne subit aucune altération. Notons que la structure la plus courante est réalisée à partir d'un pont redresseur monophasé. Dans le cas d'un réseau triphasé, un seul paramètre (ouverture et fermeture du transistor) doit contrôler les trois courants du réseau. Ceci rend la commande très complexe et beaucoup moins performante. Pour cette configuration, on privilégie plutôt l'utilisation du redresseur à modulation de largeur d'impulsion (**RMLI**) **[GHE-04].**

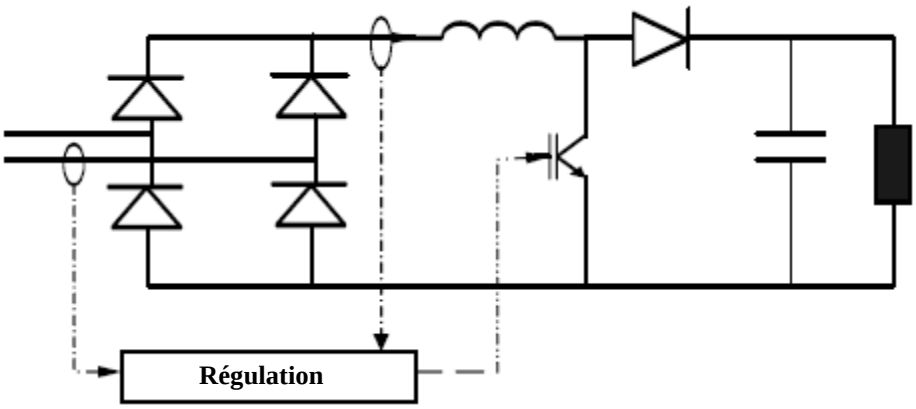


Figure I. 10: Schéma monophasé permettant l'absorption sinusoïdale

V. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la contribution de l'électronique de puissance dans l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique. Nous avons pu mettre l'accent sur la notion « qualité de l'énergie» et son rapport avec la qualité de l'onde. Notre étude s'est basée principalement sur une recherche bibliographique qui a permis de grouper et de cerner d'une façon bien ciblée les solutions à base d'électronique de puissance afin de pouvoir mener au mieux les études qui vont se faire par la suite. La hausse de l'utilisation des dispositifs de l'électronique de puissance a pour conséquence la dégradation de la qualité de l'énergie. Dans cette optique

l’utilisation de convertisseurs dits propres ou l’insertion de filtres actifs de puissance peut lutter efficacement contre les problèmes liés aux perturbations courant et/ou tension.

Chapitre II

Filtrage Actif Parallèle Pour Réseaux 4 Fils

I– Introduction

Avec le développement de l'électronique de puissance et des outils dédiés à la commande, les filtres actifs deviennent une alternative incontournable et incomparable aux filtres passifs. La structure tension triphasée a été retenue pour ses excellentes performances en termes de compensation des harmoniques et correction du facteur de puissance **[Ala-02]**. Cependant, la plupart des installations (les systèmes à 4 fils) alimentent des charges non linéaires monophasées ou des charges triphasées déséquilibrées et sont donc munies d'un fil de neutre (système à 4 fils). Les courants de lignes sont généralement déséquilibrés et le fil de neutre est parcouru par un courant égal à la somme des courants de phases et sa valeur maximale excède celle du courant de ligne. Pour y remédier, plusieurs solutions ou précautions ont été adoptées en l'occurrence l'utilisation d'un conducteur de neutre séparé pour chaque phase. On peut aussi envisager de surdimensionner le conducteur de neutre sachant que le courant dans ce dernier peut atteindre 1.4 à 1.7 fois le courant dans une phase. D'autres solutions traditionnelles peuvent aussi être adoptées pour éliminer le courant homopolaire : les transformateurs triangle-étoile, les transformateurs à secondaire en zigzag et les réactances à couplage zigzag **[Kim-01_1].**

Les interactions entre phases font du filtre actif triphasé à trois bras classique un système non adéquat pour réduire ou éliminer les harmoniques du courant du réseau.

Dans le présent chapitre, on s'intéresse à la dépollution des réseaux électriques disposant d'un fil de neutre. Plusieurs topologies de filtres actifs sont proposées, notamment celles disposant d'un pont capacitif à point milieu ou celles comportant un quatrième bras afin de maîtriser la composante homopolaire.

II- Analyse du FAP triphasé sur un réseau quatre fils

Analysons le fonctionnement d'un filtre actif triphasé connecté à un réseau à quatre fils alimentant trois charges non linéaires déséquilibrées.

Les courants injectés par les charges ne sont pas sinusoïdaux et contiennent des harmoniques impairs, y compris les harmoniques de rang trois (**3k**). Le courant de charge d'une phase peut s'écrire sous la forme **[Had-96]** :

$$i_c = \sum_{h=1,3,5} i_{c,h}\sqrt{2}\sin(h\omega t + \phi_h) \qquad \textbf{(2-1)}$$

$$h = 2k + 1$$

Les courants du réseau avant compensation sont donnés par :

$$i_{sj} = i_{sjf} + i_{sjh}$$
$$\sum_{j=1,2,3} i_{sj} + i_n = 0 \qquad \textbf{(2-2)}$$

Avec $j = 1,2,3 \quad h = 3,5...$

Où i_{sjf}, i_{sjh} et i_n sont respectivement les composantes fondamentales, harmoniques et le courant homopolaire (de neutre).

L'absence de quatrième fil du filtre actif requiert que :

$$\sum_{j=1,2,3} i_{fj} = 0 \qquad \textbf{(2-3)}$$

Où i_{fj} les courants de sortie du filtre actif.

De l'équation **(2.2)** et **(2.3),** on en déduit la partie non compensée circulant dans le réseau.

$$i_j^o(t) = i_{sjh} - i_{fj} \qquad \textbf{(2-4)}$$

En combinant les équations **(2.2), (2.3)** et **(2.4),** on obtient

$$\sum_{j=1,2,3} i_j^o(t) = -\left\{ i_N + \sum_{j=1,2,3} i_{sfj} \right\} \qquad \textbf{(2-5)}$$

Les courants du réseau sont donnés par :

$$i_{sj} = i_{cj} - i_{fj} \qquad \textbf{(2-6)}$$

Des équations précédentes, le courant du réseau après compensation devient :

$$i_{sj} = i_{sfj} + i_j^o(t) \qquad \textbf{(2-7)}$$

Cette analyse montre que le filtre actif triphasé classique ne peut compenser les perturbations dues aux charges non linéaires monophasées connectées à un réseau quatre fils. Les courants harmoniques circulant dans le réseau demeurent partiellement compensés et l'amplitude du courant homopolaire n'est pas réduite. Pour y remédier il va falloir prévoir un quatrième fil permettant de véhiculer les harmoniques de rang trois **[Had-96]**.

II.1 Analyse spectrale du courant de neutre pour charges non linéaires déséquilibrées

Le courant du fil de neutre avant compensation, ne contient que des composantes de rang impair et multiple de 3 (Les charges triphasées non linéaires injectent principalement les harmoniques impairs de rang $6k \pm 1$. La séquence d'harmonique $6k+3$ existerait si la charge était déséquilibrée) **[SHI-93].** Son expression est donnée par :

$$i_n = \sum_{n=0}^{\infty} i_{n,6n+3} \sqrt{2} \sin\left[(6n+3)\omega t + \phi_{6n+3}\right] \approx 3 i_{ch(rang\,3)} \qquad \textbf{(2-8)}$$

Sa valeur efficace est donnée par :

$$i_n = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} i^2_{n,6n+3}} = \sqrt{3}\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i_c^2 dt} = \sqrt{3} I_c \qquad \textbf{(2-9)}$$

Le courant dans le conducteur neutre a donc une valeur efficace $\sqrt{3}$ fois supérieure à celle du courant dans une phase. Notons que dans les installations où l'on trouve un grand nombre de charges non linéaires monophasées (matériel informatique), le courant dans le neutre peut donc dépasser le courant dans chaque phase. Cette situation nécessite un conducteur de neutre renforcé. En considérant que l'harmonique 3 est l'harmonique prépondérant, le taux de distorsion du courant de charge est très voisin du taux d'harmonique de l'harmonique **3**.

$$THD = \frac{I_{ch(rang\,3)}}{I_{cf}} \qquad \textbf{(2-10)}$$

Comme l'indique l'équation **(2.8),** le courant dans le neutre i_n est très voisin de $3I_{ch(rang\,3)}$

On peut donc écrire :

$$i_n \approx 3 I_{ch(rang\,3)} \approx 3 \cdot THD \cdot I_{cf} \qquad \textbf{(2-11)}$$

Avec $\dfrac{I_c}{I_{cf}} = \sqrt{1+THD^2}$

On obtient :

$$\frac{i_N}{I_c} \approx \frac{3 \cdot THD}{\sqrt{1+THD^2}} \qquad \textbf{(2-12)}$$

L'équation **(2.9)** montre que le rapport entre la valeur efficace du courant de neutre et le courant de charge est pratiquement égal à **3**. Par conséquent la formule rapprochée de l'équation **(2.12)** reste valable tant que la proportion est inférieure à **3**.

II.2 Topologies du filtre actif parallèle à quatre fils

La structure d'un FAP à quatre fils doit s'adapter à une large gamme de puissance et fonctionner sur plusieurs types de charges linéaires et/ou non linéaires, équilibrées et/ou déséquilibrées (ex : trois ponts à diodes monophasés débitant sur charges inductives ou capacitives équilibrées ou déséquilibrées). En fonction de la nature des charges alimentées et des modes de fonctionnement souhaités (absorption sinusoïdale, alimentation sans interruptions,…) plusieurs topologies sont possibles **Figure II.1 [Are-97], [Ver-97]** :

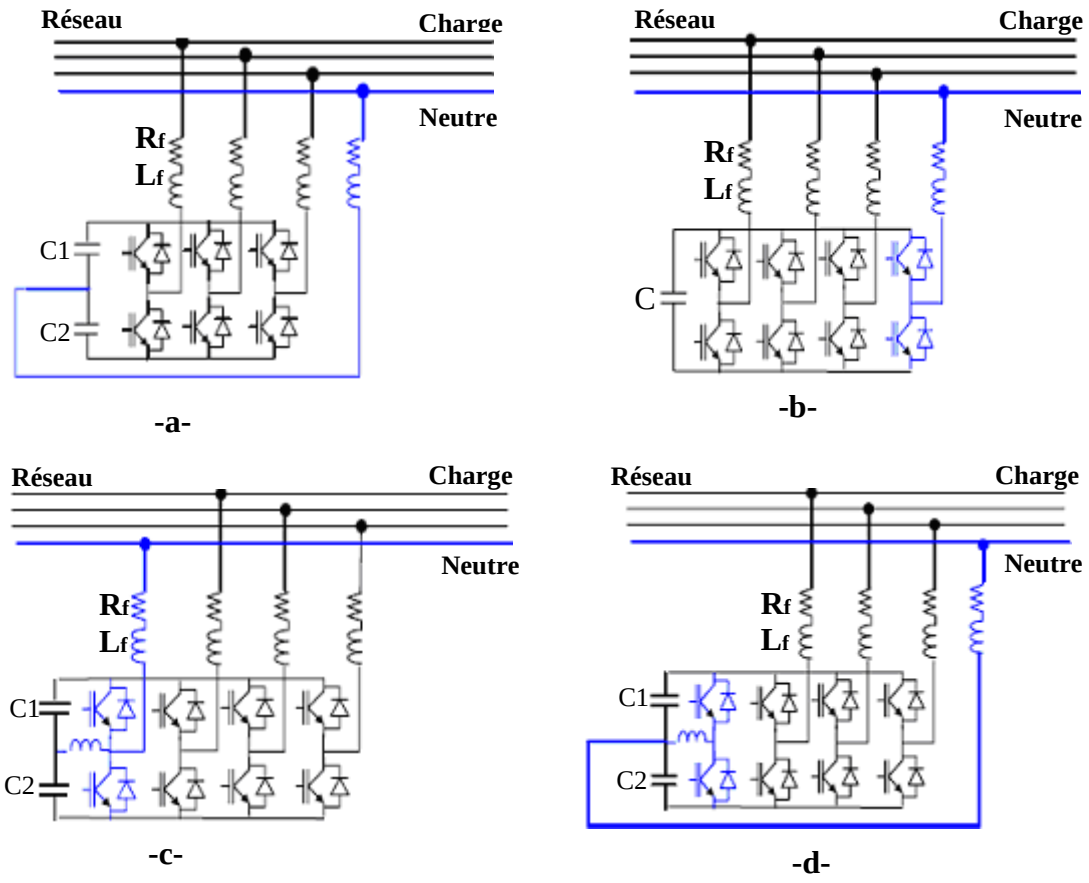


Figure II. 1: Topologies du FAP à quatre fils

II.3 Analyse comparative entre les topologies

La **Figure II.1** présente les différentes topologies capables de compenser le courant de neutre. Pour la topologie (a), le neutre de la charge et du réseau se rejoignent au niveau de point milieu capacitif du bus continu. Il s'agit d'un onduleur à 3 bras avec un point milieu capacitif côté DC. Pour empêcher le courant du neutre de remonter au réseau, le potentiel au point milieu du bus continu doit être rigoureusement contrôlé et éviter tout déséquilibre entre les deux tensions v_{c1} et v_{c2} **[ABD-05].**

Pour la topologie (b), le courant homopolaire est compensé par l'utilisation d'un quatrième bras. Ce dernier peut être contrôlé d'une façon indépendante par rapport aux autres bras (fréquence de commutation et calibre en courant).

Les deux topologies (c et d) sont similaires à la topologie (a). La différence réside au niveau du contrôle du bus continu. Pour le contrôle du potentiel de point milieu, on rajoute un quatrième bras sous dimensionné en courant. Ce dernier est relié au point milieu du bus continu via une self permettant une protection contre les surintensités au niveau des transistors du quatrième bras.

Pour les quatre topologies, la self l_n sert à réduire les ondulations du courant et peut être dimensionnée de la même manière que la self l_f. La composante haute fréquence due aux commutations est atténuée par le filtre HF à la sortie de l'onduleur. Ce filtre peut aussi empêcher la composante HF due aux commutations de quatrième bras de remonter et de se propager dans le réseau. Le tableau suivant résume les inconvénients et les avantages des topologies à 3 bras avec point milieu capacitif et à 4 bras.

Topologie	Avantages	Inconvénients
3 bras avec point milieu capacitif	Nombre réduit de semi-conducteur (6 IGBT). Moins de pertes par conduction et par commutation. Stockage important d'énergie dans les condensateurs.	Surdimensionnement des trois bras. Contrôle judicieux du potentiel de point milieu. Gros condensateur pour bus continu (2C). Quatrième bras sous dimensionné (1/10 de i_n) + self.
4 bras	Meilleure contrôlabilité de courant. Faible condensateur côté bus continu. Plus de degré de liberté. Tension basse aux bornes des interrupteurs de puissance (v_c / 2).	8 composants semi-conducteurs. Plus de pertes par conductions et par commutation.

Tableau II. 1: Avantages et inconvénients des topologies à 3 ou 4 bras

Dans le cadre de ce chapitre, nous nous limiterons aux deux topologies suivantes :

- Filtre actif de puissance à trois bras avec condensateurs à point milieu,
- Filtre actif de puissance à quatre bras.

III- Description de filtre actif de puissance constitué d'un onduleur triphasé à trois bras avec condensateurs à point milieu

Cette structure utilise un convertisseur triphasé classique à 3 bras avec un bus DC constitué de deux capacités dont le point milieu permet le retour du courant du neutre. Une compensation par phase peut ainsi être effectuée. Elle présente un inconvénient : comme le courant de neutre s'écoule jusqu'au bus DC, il impose une forte capacité afin d'assurer une faible ondulation de la tension continue. La tension aux bornes de la capacité est proportionnelle à l'intégrale du courant de neutre. Les composantes basses fréquences induisent donc une ondulation plus prononcée sur la tension du bus continu. Par ailleurs, le courant de neutre ne se partage pas équitablement entre les deux capacités **[BEN-04]**.

Les variations de tension aux bornes de chaque capacité sont liées au sens du courant de filtre i_{fj} (j=1.2.3) et à son gradient di_{fj}/dt, comme le montre le tableau suivant :

$i_{fj} > 0$ et $di_{fj}/dt < 0$	v_{c1} croît
$i_{fj} < 0$ et $di_{fj}/dt < 0$	v_{c1} décroît
$i_{fj} < 0$ et $di_{fj}/dt > 0$	v_{c2} croît
$i_{fj} > 0$ et $di_{fj}/dt > 0$	v_{c2} décroît

Tableau II. 2: Variation des tensions v_{c1} et v_{c2}

Lorsque i_{fj} (courant de la phase j du filtre actif) est positif, v_{c1} croît et v_{c2} décroît mais pas de manière égale à cause du gradient qui est différent et qui dépend des tensions de phase. Ainsi, la tension (v_{c2}-v_{c1}) oscille à la fréquence de commutation des interrupteurs de l'onduleur et à la fréquence du courant de neutre généré par la charge : il est donc nécessaire de réguler l'écart (v_{c2}-v_{c1}).

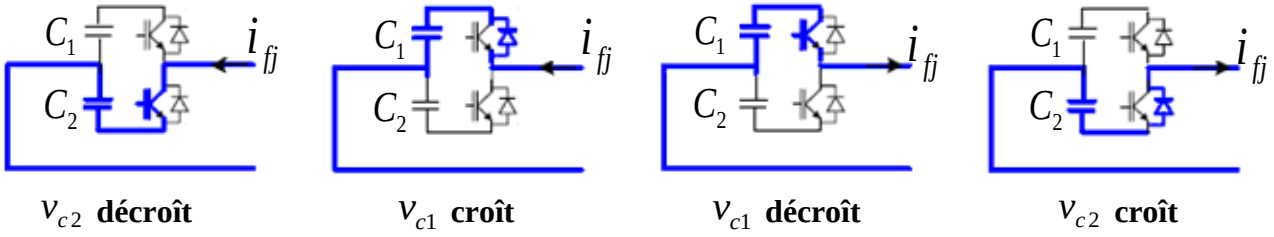


Figure II. 2: Variation des tensions en fonction de sens du courant

Sur la **Figure II-2** on montre que le passage du courant dans les différentes branches cause la variation du potentiel au point milieu à la fin de chaque période de commutation. Ce potentiel est contrôlé soit en ajustant la valeur moyenne entre la tension v_{c1} et v_{c2} à la valeur de référence désirée (tout en minimisant l'écart entre ces deux tensions), soit en utilisant deux contrôleurs du bus continu. Dns ces cas là, il faudrait additionner les deux signaux en sortie des deux régulateurs du bus continu pour pouvoir établir les références de l'onduleur **[Are-96]**.

Pour la modélisation nous pouvons procéder comme suit :

III- 1 Schéma de représentation

La structure de l'onduleur utilisé pour le fonctionnement de filtrage actif parallèle est donnée par la figure ci-dessous **[Ver-98-1]** :

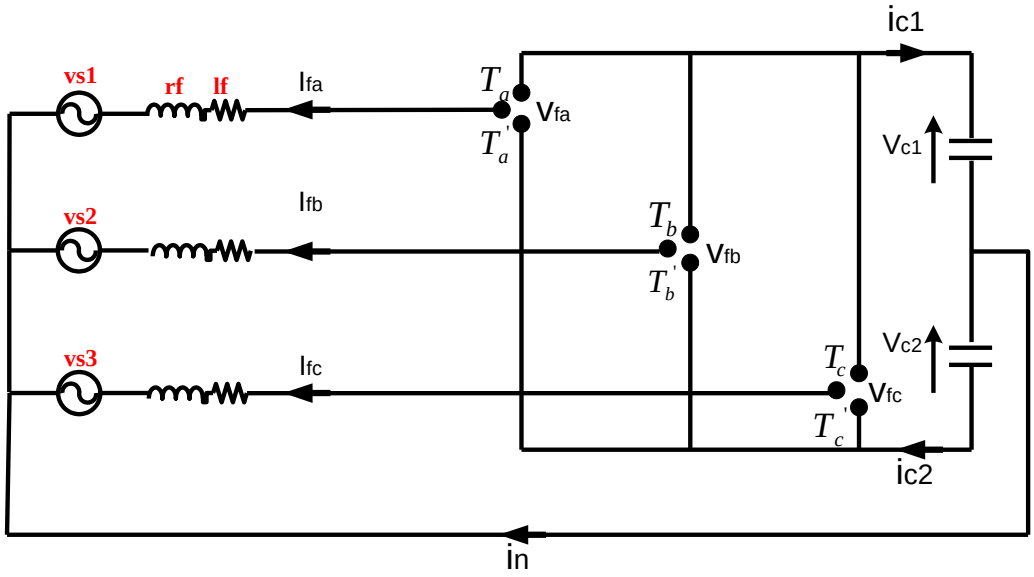


Figure II. 3: Représentation schématique du filtre actif

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le **Tableau II.3**.

k	s_c	s_b	s_a	v_{fc}	v_{fb}	v_{fa}
0	0	0	0	$-v_{c2}$	$-v_{c2}$	$-v_{c2}$
1	0	0	1	$-v_{c2}$	$-v_{c2}$	v_{c1}
2	0	1	0	$-v_{c2}$	v_{c1}	$-v_{c2}$
3	0	1	1	$-v_{c2}$	v_{c1}	v_{c1}
4	1	0	0	v_{c1}	$-v_{c2}$	$-v_{c2}$
5	1	0	1	v_{c1}	$-v_{c2}$	v_{c1}
6	1	1	0	v_{c1}	v_{c1}	$-v_{c2}$
7	1	1	1	v_{c1}	v_{c1}	v_{c1}

Tableau II. 3: Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras à condensateurs à point milieu

Cette topologie contient huit combinaisons de commande possibles. Ces états de commutations sont obtenus en utilisant les expressions suivantes :

$$\begin{cases} v_{fa} = s_a v_{c1} - (1 - s_a) v_{c2} \\ v_{fb} = s_b v_{c1} - (1 - s_b) v_{c2} \\ v_{fc} = s_c v_{c1} - (1 - s_c) v_{c2} \end{cases} \quad \textbf{(2-13)}$$

Avec : $s_i = 1$ si T_i est fermé

si T_i est ouvert

$i = a, b, c$

III-2 Modèle mathématique du filtre

Les tensions simples v_{fa}, v_{fb}, v_{fc} sont vérifient les équations suivantes :

$$\begin{cases} l_f \dfrac{di_{fa}}{dt} = -r_f i_{fa} - v_{sa} - v_{fa} \\ l_f \dfrac{di_{fb}}{dt} = -r_f i_{fb} - v_{sb} - v_{fb} \\ l_f \dfrac{di_{fc}}{dt} = -r_f i_{fc} - v_{sc} - v_{fc} \end{cases} \quad \textbf{(2-14)}$$

En utilisant l'équation **(2-13).** Nous obtenons :

$$\begin{cases} l_f \dfrac{di_{fa}}{dt} = -r_f i_{fa} - v_{sa} - s_a v_{c1} + (1-s_a) v_{c2} \\ l_f \dfrac{di_{fb}}{dt} = -r_f i_{fb} - v_{sb} - s_b v_{c1} + (1-s_b) v_{c2} \\ l_f \dfrac{di_{fc}}{dt} = -r_f i_{fc} - v_{sc} - s_c v_{c1} + (1-s_c) v_{c2} \end{cases} \quad \textbf{(2-15)}$$

L'instabilité des tensions du bus continu (v_{c1} et v_{c2}) a une grande influence sur le fonctionnement du filtre actif. Le modèle du pont d'entrée de l'onduleur est décrit par le système d'équations :

$$\begin{cases} C \dfrac{dv_{c1}}{dt} = i_{c1} \\ C \dfrac{dv_{c2}}{dt} = i_{c2} \end{cases} \quad \textbf{(2-16)}$$

Le courant circulant à travers le point milieu de bus continu est régi par l'équation suivante :

$$i_{fn} = C \frac{d(v_{c1} - v_{c2})}{dt} \quad \textbf{(2-17)}$$

Cette relation montre que pour avoir un potentiel du point milieu plus stable (valeur moyenne nulle de $v_{c1} - v_{c2}$), il faut avoir une valeur moyenne nulle du courant i_{fn}. Ceci nous permet de constater que pour ne pas affecter la régulation des courants, il faut bien contrôler les deux tensions v_{c1} et v_{c2} de sorte que $v_{c1} = v_{c2}$ et $v_c = v_{c1} + v_{c2}$. Afin d'éviter qu'il n'y ait un grand décalage entre v_{c1} et v_{c2}.

Les courants circulant à travers les deux condensateurs de bus continu sont régis par l'équation suivante :

$$\begin{cases} C \dfrac{dv_{c1}}{dt} = i_{c1} = s_a i_{fa} + s_b i_{fb} + s_c i_{fc} \\ C \dfrac{dv_{c2}}{dt} = i_{c2} = (1-s_a) i_{fa} + (1-s_b) i_{fb} + (1-s_c) i_{fc} \end{cases} \quad \textbf{(2-18)}$$

Le modèle global du filtre est :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{fa}}{dt} \\ \frac{di_{fb}}{dt} \\ \frac{di_{fc}}{dt} \\ \frac{dv_{c1}}{dt} \\ \frac{dv_{c2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{-r_f}{l_f} & 0 & 0 & \frac{-s_a}{l_f} & \frac{1-s_a}{l_f} \\ 0 & \frac{-r_f}{l_f} & 0 & \frac{-s_b}{l_f} & \frac{1-s_b}{l_f} \\ 0 & 0 & \frac{-r_f}{l_f} & \frac{-s_c}{l_f} & \frac{1-s_c}{l_f} \\ s_a & s_b & s_c & 0 & 0 \\ (1-s_a) & (1-s_b) & (1-s_c) & 0 & 0 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \\ v_{c1} \\ v_{c2} \end{bmatrix} + \begin{vmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix} \qquad \textbf{(2-19)}$$

IV. Description de filtre actif de puissance constitué d'un onduleur triphasé à quatre bras

Dans cette configuration, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant. Cette configuration a été proposée afin d'éviter le recours à un élément de stockage à point milieu comme celle de la configuration précédente **[BEN-04]**.

IV. 1 Schéma de représentation

La structure de l'onduleur utilisé pour le fonctionnement de filtrage actif parallèle est donnée par la figure ci-dessous **[Ver-98-2]** :

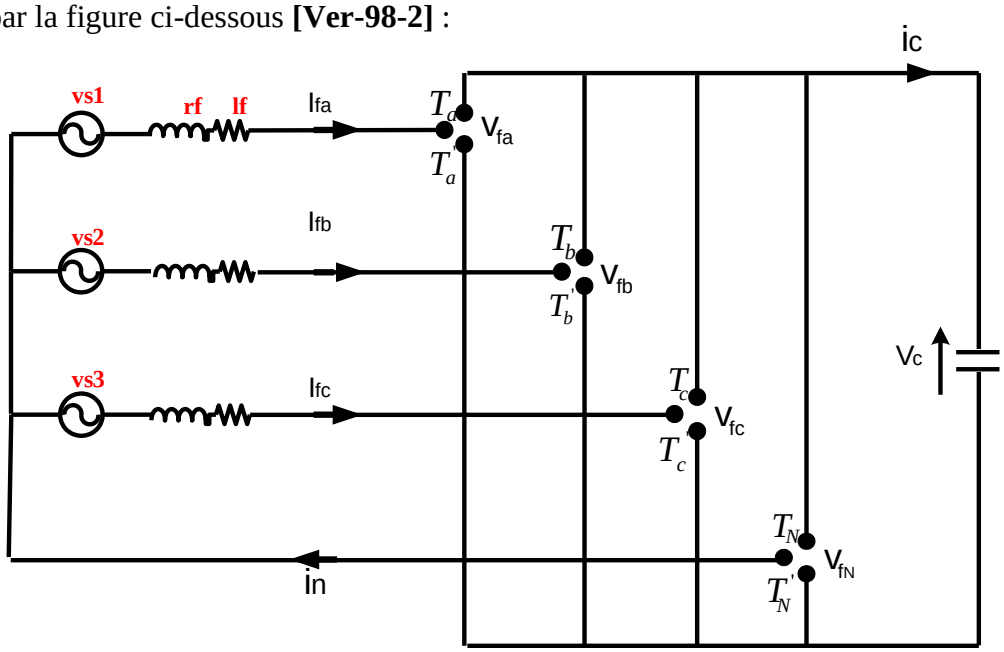


Figure II. 4: Représentation schématique du filtre actif

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le **Tableau II.4**. Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes :

$$\begin{cases} v_{fa} = (T_a - T_N)v_c \\ v_{fb} = (T_b - T_N)v_c \\ v_{fc} = (T_c - T_N)v_c \end{cases} \quad \textbf{(2-20)}$$

et : $$i_c = T_a i_{fa} + T_b i_{fb} + T_c i_{fc} - T_N i_n \quad \textbf{(2-21)}$$

k	s_n	s_c	s_b	s_a	v_{fc}	v_{fb}	v_{fa}
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	$-v_c$
2	0	0	1	0	0	v_c	0
3	0	0	1	1	0	v_c	$-v_c$
4	0	1	0	0	v_c	0	0
5	0	1	0	1	v_c	0	$-v_c$
6	0	1	1	0	v_c	v_c	0
7	0	1	1	1	v_c	v_c	v_c
8	1	0	0	0	$-v_c$	$-v_c$	$-v_c$
9	1	0	0	1	$-v_c$	$-v_c$	0
10	1	0	1	0	$-v_c$	0	$-v_c$
11	1	0	1	1	$-v_c$	0	0
12	1	1	0	0	0	$-v_c$	$-v_c$
13	1	1	0	1	0	$-v_c$	0
14	1	1	1	0	0	0	$-v_c$
15	1	1	1	1	0	0	0

Tableau II. 4: Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras

L'introduction des trois équations **(2-20)**. et l'équation **(2-21)** donne le modèle d'état global du filtre est :

$$\begin{bmatrix} \frac{di_{fa}}{dt} \\ \frac{di_{fb}}{dt} \\ \frac{di_{fc}}{dt} \\ \frac{dv_{c1}}{dt} \\ \frac{dv_{c2}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{-r_f}{l_f} & 0 & 0 & -\frac{T_a - T_4}{l_f} \\ 0 & \frac{-r_f}{l_f} & 0 & -\frac{T_b - T_4}{l_f} \\ 0 & 0 & \frac{-r_f}{l_f} & -\frac{T_c - T_4}{l_f} \\ \frac{T_a - T_4}{l_f} & \frac{T_b - T_4}{l_f} & \frac{T_c - T_4}{l_f} & 0 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \\ v_c \end{bmatrix} + \begin{vmatrix} \frac{v_{s1}}{l_f} \\ \frac{v_{s2}}{l_f} \\ \frac{v_{s3}}{l_f} \\ 0 \end{vmatrix} \qquad \textbf{(2-22)}$$

V - Conclusion

Ce chapitre était consacré à l'étude des filtres actifs à quatre fils. La première partie a permis de montrer l'efficacité du filtre actif parallèle afin d'éliminer ou de réduire le courant homopolaire circulant dans le fil du neutre. Pour cela, deux topologies ont été synthétisées. La première utilise un onduleur à trois bras avec point milieu capacitif et la deuxième utilise un onduleur à quatre bras.

La première structure offre la possibilité de compenser le courant homopolaire a travers le point milieu capacitif tout en garantissant un potentiel équilibré du point milieu du bus continu. Le nombre limité de semi-conducteur fait de cette configuration un avantage incontournable. Néanmoins, le moindre déséquilibre du pont capacitif à point milieu peut fausser la compensation. Dans la deuxième topologie le courant homopolaire est compensé en utilisant un quatrième bras. Cette topologie offre plus de degré de liberté et permet de contrôler le courant de neutre d'une façon indépendante des autres bras l'inconvénient qui régit cette topologie est le nombre des interrupteurs qui augmenter les pertes par conductions et par commutation.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

De nos jours, la qualité de l'énergie est un domaine de la plus haute importance. À l'heure où l'économie des pays industrialisés repose sur leurs capacités à produire ou à acheter l'énergie, l'utilisation adéquate et sans perte inutile est capitale. Ce mémoire, bien que ne touchant qu'un de ces domaines de la qualité de l'énergie pourtant si vaste, a permis de faire un bref survol de la problématique liée à la pollution harmonique sur les réseaux de distribution électrique ainsi que des différents moyens de mitigation utilisés. Une bonne compréhension de la problématique des harmoniques, de leurs influences sur le réseau électrique, ainsi que des moyens de mitigation existant pour les minimiser est maintenant devenue essentielle pour tout ingénieur travaillant dans le domaine de l'électrotechnique.

A la lumière de la recherche bibliographique, nous avons constaté que les recherches sur les filtres actifs sont bien répandues dans le monde, non seulement pour la compensation des harmoniques, mais également pour l'élimination des différents types de perturbations pouvant affecter le réseau, et ceci pour assurer un échange optimal d'énergie entre la source et la charge.

Le filtre actif triphasé à trois fils a montré son efficacité en termes de compensation des harmoniques générés par les charges non linéaires et/ou déséquilibrées dans un réseau à trois fils. Cependant, la plupart des installations alimentent des charges non linéaires monophasées ou des charges triphasées déséquilibrées et sont donc munies d'un fil de neutre (système à 4 fils). Donc ce convertisseur paraît incapable d'éliminer ces courants lorsqu'il est connecté à un réseau à quatre fils (avec la présence de fil du neutre).

Sur la base de ce constat, notre travail s'est porté plus particulièrement sur l'étude des filtres actifs parallèles à structure tension pour la compensation des harmoniques de courant circulant dans un réseau électrique à quatre fils.

Dans le cadre de ce cours, nous avons en premier temps mis en évidence les effets liés à la connexion des dispositifs d'électronique de puissance sur la qualité de l'énergie. Des solutions ont été proposées permettant de remédier à chaque type de perturbation.

Par la suite on a étudié l'efficacité du filtre actif à quatre fils afin d'éliminer ou de réduire le courant homopolaire circulant dans le fil du neutre. Pour cela, deux topologies ont été examinées. La première structure offre la possibilité de compenser le courant homopolaire a travers le point milieu capacitif tout en garantissant un potentiel équilibré du point milieu du bus continu. Le nombre limité de semi-conducteur fait de cette configuration un avantage incontournable. Néanmoins, le moindre déséquilibre du pont capacitif à point milieu peut fausser la compensation. Dans la deuxième topologie le courant homopolaire est compensé en utilisant un quatrième bras. Cette topologie offre plus de degré de liberté et permet de contrôler le courant de neutre d'une façon indépendante des autres bras l'inconvénient qui régit cette topologie est le nombre des interrupteurs qui fait augmenter les pertes par conductions et par commutation.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

[ABD-05] Y.ABDELLI **«** Etude et Commande De Convertisseurs Statiques Multifonctions en Vue de L'amélioration de la Qualité de L'énergie électrique **»** Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 22 Juin 2005.

[Aka-01] H.AKAGI, H. KIM « The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems and its applications **»** Electrical engineering in Japan, vol.13, 2001.

[Ala-02] M.A.E. Alali « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension » Thèse de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 12 Septembre 2002.

[Are-96] M .Aredes « Active Power Line Conditioners » Doctor engineering in Technischen universität Berlin, 1996, Germany.

[Are-97] M. Aredes, J. Häfner, and K. Heumann, "Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies", IEEE. Trans on Power Elec., vol. 12, n°. 2, 1997.

[Ben-03] M.C. Benhabib, S. Saadate « An Advanced Approach Control for a Four Branch Shunt Active Power Filter **»** EPE'03 conference, Toulouse, France, 2003.

[BEN-04] M.C. BENHABIB « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension : Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande » Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2004.

[BENH-04] M.C. Benhabib, S. Saadate « New control approach for four-wire active power filter based on the use of synchronous reference frame **»** Electric Power Systems Research, 2004.

[BENS-04] T.BENSLIMANE, « Commande numérique d'un filtre actif parallèle autonome» mémoire de magister de l'école militaire poly technique 2004.

[GHE-04] T. GHENNAM « Etude et Réalisation d'un Compensateur Actif de Puissance Commandé par DSP. **»** mémoire de magister de l'école militaire poly technique 2004.

[Had-96] K. Haddad « Design and Implementation of Three-Phase Four-Wire Active Filters **»** Thesis for the Degree of Master of Applied Science at Concordia University, 1996

[Ham-04] A. HAMADI, « Amélioration des performances du filtre actif : application du régulateur proportionnel intégral et du régulateur flou **»,** Mémoire présenté a l'école de Technologie supérieure comme exigence partielle de Maitrise en Génie électrique. Université du QUEBEC, 2004.

[Kou-06] H. Kouara « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau base tension » mémoire de magistère Université de Batna ,2006.

[Kim-99] H. KIM and **H. AKAGI** «The instantaneous power theory on the rotating p-q-r reference frames **»** Proceedings of the IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS '99. 1999, Vol. 1, 1999.

[Kim-01_1] H. KIM, F. BLAABJERG, B. BAK-JENSEN and **J.CHOI** « Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory **»** IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC'01, Vol. 2, pp. 478 -485, 2001.

[Kim-01_2] H. KIM, F. BLAABJERG and **B. BAK-JENSEN** « Spectral analysis of instantaneous powers in single-phase and three-phase systems with use of pqr theory **».** IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, PESC'01, Vol. 1, 2001.

[Mey-90] P. Meynaud, **«** Qualité de la Tension dans les Réseaux Electriques: Creux de Tension, Fliker et Harmoniques **»**, Techniques de l'ingénieur, D4260, 1990.

[OUL-05] D. OULD ABDESLAM « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au Filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension **»** Thèse de Doctorat de l'université de Haute-Alsace, 08 décembre 2005.

[Pen-96] F. Z.PENG; J. S.LAI « Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems **»** IEEE Trans. On IM, vol. 45, n°.1, 1996

[Pen-98] F. Z PENG, G. W. Ott, D. J Adams « Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive theory for three-phase four-wire systems **»** IEEE Trans. On power electronic, vol. 13, n°6, 1998.

[Pie-03] G. Pierron « Introduction au traitement de l'énergie électrique » ; Ecole des mines de Paris, Les Presses, ISBN : 2-911762-46-0, 2003.

[SAL-96] A.SALEM NIA « Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commandes analogique et numérique temps réel » Thèse de doctorat de l'I.N.P.L, Nancy, France, 1996.

[SHA-03] E. G. SHAHRAKI « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques » Thèse de doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2003.

[SHI-93] W. SHIREEN, « Analysis and design of active power filter topologies to cancel neutral current harmonics in low voltage electric power distribution systems » Thèse de Philosophiae Doctor (**PH.D**), Texas A&M University, 1993.

[SIR-05]. **M. SIRANDI** « La Compensation des Réseaux Asymétriques au Moyen de Régulateurs de Puissance Interphase **»** Thèse DE Philosophiae Doctor (**PH.D**), Ecole polytechnique de Montréal, 2005.