



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhder–El-Oued
Faculté de technologie

Mémoire de fin d'étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electrique

Thème

Commande Neuronale d'un Onduleur à Trois Bras pour la Compensation des Courants Harmoniques

Présentée par :
Louteri Hasna
Souid Hanine

Proposé et dirigé par :
Dr. Mahni Tidjani

Soutenue publiquement le :05/06/2024

Dr. Mahni Tidjani
Dr. Serhoud Hicham
Dr. Maamir Madiha

Université d'El Oued
Université d'El Oued
Université d'El Oued

Président
Examineur
Examineur

Année universitaire : 2023-2024



Dédicace

Du profond de mon cœur je dédie ce mémoire à tous ceux qui sont chers.

A mon cher père, que Dieu lui fasse miséricorde

A la source de tendresse, ma mère bien-aimée

A ma chère sœur et mes chers frères

Ce travail n'est rien d'autre qu'un petit merci pour ce que vous m'avez donné tout au long de ma vie

Je peux aussi dédier le fruit de mon travail à toute ma famille

A tous mes enseignants qui m'ont nourri de leurs savoirs depuis mes premières années d'études

A tous ce qui me sens chère et que j'ai omis de citer.

Merci à vous

Hanine





Dédicace

" C'est une belle chose qu'une personne cherche le succès et l'obtienne "

Et il est plus beau de mentionner qui en était la raison.

Je dédie le fruit de mon travail à celle qui m'a soutenu dans le bien et le mal, à celle qui a travaillé dur et qui était libre pour mon éducation, et mon éducation m'a bouleversée, à celle qui aime sa bonté et sa tendresse, à qui la langue est incapable de la louer et à qui une plume peut décrire sa vertu, à celle dont les pieds sont le Paradis, ma mère bien-aimée et précieuse « **Hayat Louetri** », que Dieu prolonge sa vie.

Et à celui qui a allumé la lampe de mon esprit et éteint les ténèbres de mon ignorance, et qui a été le meilleur guide pour moi vers la science et la connaissance, à celui qui s'est sacrifié pour éclairer mon chemin et mon chemin, à celui qui nous a donné confiance, mon cher père « **Ahmad Louetri** » que Dieu prolonge sa vie.

À ceux avec qui j'ai vécu et grandi, « **Nadia, Abdenmour, Intissar** ».

À mon ami et compagnon d'études « **Moufida Khicha** ».

À tous ceux qui m'ont enseigné l'artisanat tout au long de ma formation, de la prépa à l'université, « **mes distingués professeurs** ».

« À toute la famille et aux proches ».

Merci à vous

Hasna



Remerciements et gratitude

Louanges et remerciements à dieu tout-puissant, d'abord et avant tout, qui, avec son aide, nous a permis d'accomplir cette humble œuvre.

D'adresse également mes plus profonds remerciements, ma reconnaissance et ma gratitude à nos honorables professeurs qui, peu importe à quel point nous essayons de leur exprimer leur effort scientifique et leur haute moralité, nous ne pourrons pas les satisfaire en cela.

Sans oublier l'honorable professeur MAHNI TIDJANI, qui nous a beaucoup aidé dans l'étape du choix du titre du mémorandum

Et à nos chers professeurs, du début de notre vie universitaire à nos jours.

A tous les camarades d'école qui nous ont accompagnés sur notre chemin, à ceux que nous aimons, nos cœurs et notre plume contribuent.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'utilisation de la technique de contrôle neuronal dans un filtre actif parallèle à trois bras dans le but de compenser les courants harmoniques dans les réseaux électriques.

Les courants harmoniques sont des courants irréguliers qui provoquent des distorsions de la forme d'onde électrique idéale, entraînant une réduction de l'efficacité du réseau et une augmentation des pertes d'énergie.

L'utilisation du contrôle neuronal permet une réponse plus précise et plus efficace pour corriger ces distorsions et améliorer la qualité de l'énergie distribuée dans le réseau électrique. Nous avons étudié la méthode neuronale directe afin de déterminer les courants harmoniques. Cette dernière a été testée par simulation, et comparée avec les résultats de simulation de la méthode des puissances instantanée réelles et imaginaires. La régulation de la tension du bus continue est faite par PI.

Les résultats obtenus ont été très satisfaisants et ont démontré l'efficacité du filtre actif parallèle pour contrôler la pollution des réseaux électrique.

Mots clés : Perturbations du réseau électrique, Réseaux de neurones artificiels, Filtre actif parallèle, Puissance instantanée réelle imaginaire (PIRI), Référentiel synchrone (SRF).

المخلص

ركزت هذه الأطروحة على استخدام تقنية التحكم العصبي في مرشح فعال متوازي ثلاثي الأذرع بهدف تعويض التيارات التوافقية في الشبكات الكهربائية.

التيارات التوافقية هي تيارات غير منتظمة تسبب تشوهات في شكل الموجة الكهربائية المثالية، مما يؤدي إلى انخفاض كفاءة الشبكة وزيادة فقدان الطاقة.

يتيح استخدام التحكم العصبي استجابة أكثر دقة وكفاءة لتصحيح هذه التشوهات وتحسين جودة الطاقة الموزعة في الشبكة الكهربائية.

درسنا طريقة الخلايا العصبية المباشرة لتحديد التيارات التوافقية. تم اختبار الأخير بالمحاكاة، ومقارنته بنتائج المحاكاة لطريقة القدرة اللحظية الحقيقية والتخيلية. يتم تنظيم جهد ناقل التيار المستمر بواسطة منظم PI.

وكانت النتائج التي تم الحصول عليها مرضية للغاية وأظهرت فعالية الفلتر النشط الموازي في التحكم في تلوث الشبكات الكهربائية.

الكلمات المفتاحية: اضطرابات الشبكة الكهربائية، الشبكات العصبية الاصطناعية، الأدلين، الطاقة اللحظية الحقيقية التخيلية (PIRI)، المعلمة المترامنة (SRF).

SOMMARE

Introduction général	1
Chapitre I : Perturbations des réseaux électriques	
1. Introduction	4
2. Caractéristiques des perturbations électriques	4
2.1 Creux et coupure de tension	4
2.2 Variations et fluctuations de la tension	5
2.3 Déséquilibre du système triphasé	6
2.4 Fluctuation de la fréquence	6
2.5 Harmoniques et enter-harmoniques	7
3. Conséquences des harmoniques	8
4. Grandeurs caractérisant les perturbations harmoniques	8
4.1 Le taux de distorsion harmoniques	8
4.2 Le facteur de puissance	9
5. Réglementation	10
6. Solutions de dépollution des réseaux électriques	11
6.1 Solutions traditionnelles	12
6.2 Solutions modernes	13
7. Conclusion	15
Chapitre II : Constitution du Filtre actif parallèle	
1. introduction	17
2. Filtre actif parallèle	17
3. Structure général d'un filtre actif parallèle	18
3.1 Topologie générale	18
4. Etude de la partie puissance	19
4.1 Onduleur de tension	19
4.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension	21
4.2 Circuit de stockage de l'énergie	22
4.3 Filtre de couplage	23
5. Etude de la partie contrôle-commande	24
5.1 Identifications des courants harmoniques	24
5.2 Régulation de la tension continue	25
5.3 Régulation de courant du filtre actif	25
6. La commande de l'onduleur	26

6.1 Commande par hystérésis	27
6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (ML)	28
7. Boucle à verrouillage de phase (PLL)	29
7.1 Structure générale de la PLL classique	30
7.2 Utilisation d'un filtre multi-variable	30
8. Conclusion	30

Chapitre III : Identification des courants harmoniques avec les réseaux de neurones

1. Introduction	32
2. Identifications des harmoniques avec la méthode direct	32
2.1 Décomposition des courants	32
2.2 Identifications des courants avec les Adalnes	33
3. Identification des harmoniques avec la méthode des PIRI	34
3.1 Identification des harmoniques avec la méthode des PIRI classiques	34
3.2 Identification des harmoniques avec la méthode des PIRI neuronale	36
4 Identification des harmoniques avec la méthode de référentiel synchrone	37
4.1 Méthode classique	37
4.2 Méthode utilisant un filtre RNA	39
5. Conclusion	41

Chapitre IV : Simulation du FAP

1. Introduction	43
2. Paramètres de simulation	43
3. Résultats de simulation	43
3.1 Sans filtre	43
3.2 Avec le filtrage	44
A) Filtrage par réseau de neurones	46
B) Filtrage par puissances instantanées classique	47
4. Conclusion	49
Conclusion générale	50
Bibliographie	51

Liste des figures

Figure I.1: Creux et coupure de tension	5
Figure I.2: Fluctuation de la tension	6
Figure I.3: Déséquilibre du système triphasé	6
Figure I.4: Fluctuation de la fréquence	7
Figure I.5: Harmonique et inter-harmonique	7
Figure I.6 : Diagramme de Fresnel des puissances.	10
Figure I.7: Filtre passif résonnant	13
Figure I.8: Filtre passif amorti	13
Figure I.9: Filtre actif parallèle (FAP)	14
Figure I.10: Filtre actif série (FAS)	14
Figure I.11: Combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	15
Figure II.1: Filtre actif parallèle	17
Figure II.2: Courbes des courants dans un système FAP	17
Figure II.3: Structure générale du filtre actif parallèle	18
Figure II.4: schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension	19
Figure II.5: Filtre actif à structure tension	20
Figure II.6: Interrupteurs de puissance	20
Figure II.7: Boucle de régulation de la tension continue	25
Figure II.8: Schéma de la régulation des courants du F.A.P	26
Figure II.9: Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur	27
Figure II.10: Commande par hystérésis d'un filtre actif parallèle	28
Figure II.11: Bande de MLI et signal de commande d'un interrupteur	28
Figure II.12: Commande par MLI d'un filtre actif parallèle	29
Figure II.13: Structure classique d'une PLL	30
Figure II.14: Structure d'une PLL avec filtre multi-variable	30
Figure III.1: Structure de l'Adeline pour la méthode d'identification directe	33
Figure III.2: Filtrage de la composante de la puissance continue	35
Figure III.3: Algorithme identification des courants harmoniques avec la méthode des PIRI	36
Figure III.4: Structure d'identification des courants de références avec la méthode des Puissances instantanées utilisant des ADALINE	37
Figure III.5: Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FPB	38

Figure III.6: Identification des courants de références utilisant des Adaline dans le repère dq	41
Figure IV.1: Schéma de simulation d'une charge non linéaire	44
Figure IV.2: Courant de source pour la phase a	44
Figure IV.3: Spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage	44
Figure IV.4: Schéma de simulation d'un filtre actif parallèle	45
Figure IV.5: La Commande par hystérésis	45
Figure IV.6: L'onduleur	45
Figure IV.7: Schéma de la régulation de Vdc	46
Figure IV.8: Schéma de l'identification	46
Figure IV.9: Courant de source pour la phase a	46
Figure IV.10: Spectre harmonique du courant de source après le filtrage	47
Figure IV.11: Courant de référence pour la phase a et Courant injectés par le filtre pour la phase a	47
Figure IV.12: Schéma de la régulation de Vdc	47
Figure IV.13: Schéma de l'identification	48
Figure IV.14: Courant de source pour la phase a	48
Figure IV.15: Spectre harmonique du courant de source après le filtrage	48
Figure IV.16: Courant de référence pour la phase a et Courant injectés par le filtre pour la phase a	49
Figure IV.117: Schéma de la régulation de Vdc	49

Liste de tableaux

Tab.I.1 : Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension (norme CEI 61000-2-2)	10
Tab. I.2 : Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2)	11
Tab.I.3 : Limite IEEE des émissions de courants harmoniques	11
Tab.II.1 : Tensions délivrées par l'onduleur	22

Liste des symboles

FAP : Filtre Actif Parallèle.

FAS : Filtre Actif Série.

UPQC : Unified Power Quality Conditioner (filtre parallèle-série actifs).

THD : Total Harmonic Distortion (Taux de distorsion harmonique).

I_{c1} : Valeur efficace du courant fondamental.

I_{ci} : Valeur efficace de l'harmonique de rang i .

P : Puissance active.

S : Puissance apparente.

F : Facteur de puissance.

RNA : Réseaux de Neurones Artificiels.

Adaline : ADActive LINnèar Element (réseau adaptatif linéaire).

V_{dc} : Tension continue de condensateur.

L_f : Inductance de filtre de sortie.

R_f : Résistance de filtre de sortie.

$v_f 1, 2, 3$: Tensions à la sortie de l'onduleur.

$v_{ms1, 2, 3}$: Tension simple côté alternatif sur les trois phases.

f : Fréquence du réseau.

y_k : La sortie estimé par le réseau de neurones à l'instant k .

e_k : L'erreur entre la référence et la sortie à l'instant k .

i_{dc} : Courant côté continu de l'onduleur.

$i_{ref1, 2, 3}$: Les courants de référence.

K_p et K_i : Gains proportionnel, intégral

$i_{cf1, 2, 3}$: Courants fondamental sur les trois phases.

$i_{ch1, 2, 3}$: Courants harmoniques sur les trois phases.

α : Un angle.

v_α et v_β : Tensions simple dans l'espace $\alpha\beta$.

i_α et i_β : Courants de charge dans l'espace $\alpha\beta$.

p et q : La puissance réelle instantanée et la puissance imaginaire instantanée

et $p^\sim$: Les composantes continue et alternative de la puissance réelle instantanée- p

Introduction Générale

La prolifération de perturbations harmoniques est due aux charges non-linéaires présentes dans les lignes électriques (tels que les convertisseurs, les ordinateurs personnels...etc.). Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et pollutions harmoniques en courant. Les composantes harmoniques générées se propagent dans l'ensemble du réseau de distribution électrique sous la forme de courants qui peuvent sérieusement affecter d'autres appareils jusqu'à les détériorer.

Le domaine de l'intelligence artificielle a connu des progressions remarquables suite au développement de plusieurs théories solidement fondées telles que les réseaux de neurones artificiels, la logique floue...etc.

Dans ce mémoire, nous présentons une stratégie intelligente de commande d'un onduleur de tension à trois bras afin de filtrer les courants harmoniques générés par les charges non-linéaire. Il s'agit d'identifier les courants harmoniques par réseaux de neurones artificiels.

Dans le premier chapitre, nous étudions les caractéristiques générales des perturbations électriques. Puis, nous détaillons les origines, les conséquences matérielles. Ensuite, nous présentons les standards imposés sur les courants et les tensions harmoniques par les commissions internationales de normalisation. Nous discutons par la suite les solutions traditionnelles et modernes utilisées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

Dans le second chapitre, Nous présentons l'une des solutions de dépollution, qui est le filtre actif parallèle basé sur un transformateur de tension triphasé, et son étude comprendra deux parties : la partie puissance et la partie contrôle.

Dans le troisième chapitre, nous présentons les méthodes d'identification les plus utilisées pour extraire les courants harmoniques. La première méthode, appelée la méthode par réseaux de neurones directe de type AdaLine. Cette dernière utilise la transformée de Fourier pour décomposer le signal des courants mesurés sur les trois phases du réseau électrique. La seconde technique exploite deux variantes de la méthode d'identification des puissances instantanées réelle et imaginaire : Classique et avec réseau de neurones. La

Dans le dernier chapitre, nous présenterons une étude sur FAP en utilisant une simulation sur Matlab/Simulink/SimPowerSysteme pour contrôler les oscillations dans le but de compenser les courants harmoniques.

Chapitre I

Perturbations des Réseaux Electriques

1. Introduction :

L'objectif fondamental des réseaux électriques est de fournir aux clients de l'énergie électrique avec une parfaite continuité, sous forme de tensions parfaitement sinusoïdales, avec des valeurs d'amplitude et de fréquence préétablies.

Tout écart à cet objectif qui dépasse le seuil établi dans les normes représente une perturbation qui peut être gênante pour le fonctionnement des charges connectées.

Dans ce chapitre, nous présentons les principales perturbations électriques. Ainsi, nous détaillons les origines, les conséquences matérielles et les limites imposées par les normes internationales de ces perturbations. Nous discutons ensuite des solutions traditionnelles et modernes utilisées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations harmoniques.

2. Caractéristiques des perturbations électriques :

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [1] :

- La fréquence,
- L'amplitude des trois tensions,
- La forme d'onde,
- La symétrie du système triphasé (égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage).

Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de la tension, un déséquilibre du système triphasé de tension, une fluctuation de la fréquence, la présence d'harmoniques et/ou d'inter-harmoniques [2].

2.1 Creux et coupure de tension :

Les coupures représentant un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La figure 1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

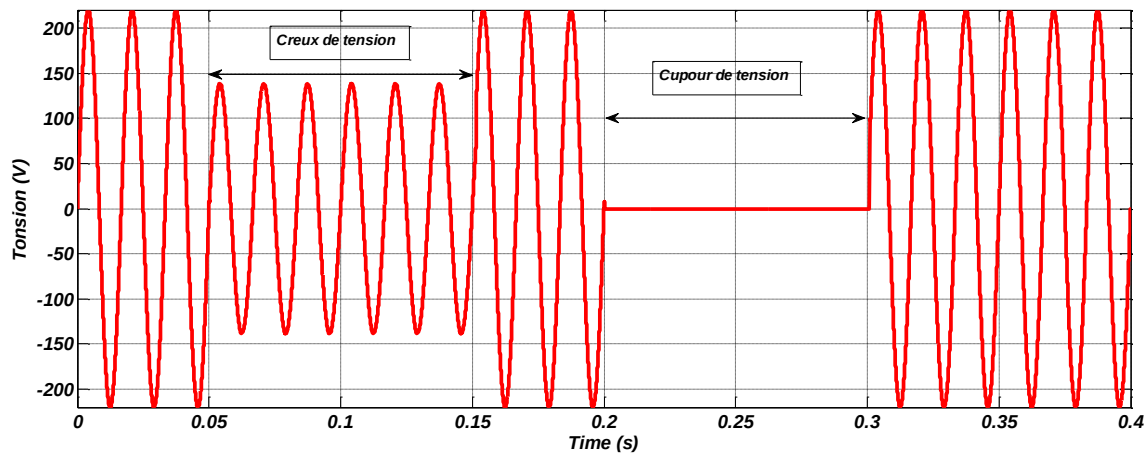


Figure. I. 1 : Creux et coupure de tension.

Les creux de tension sont dus aux courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle. Les courts-circuits sont des événements aléatoires : ils peuvent résulter de phénomènes atmosphériques (foudres, givre, tempête, etc.), de défaillances d'appareils ou d'accidents. Ils apparaissent également lors de fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteur, transformateurs, etc.).

Les conséquences des creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peut aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

2.2 Variations et fluctuations de la tension :

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude [2], comme est illustré par la fig. I.2.

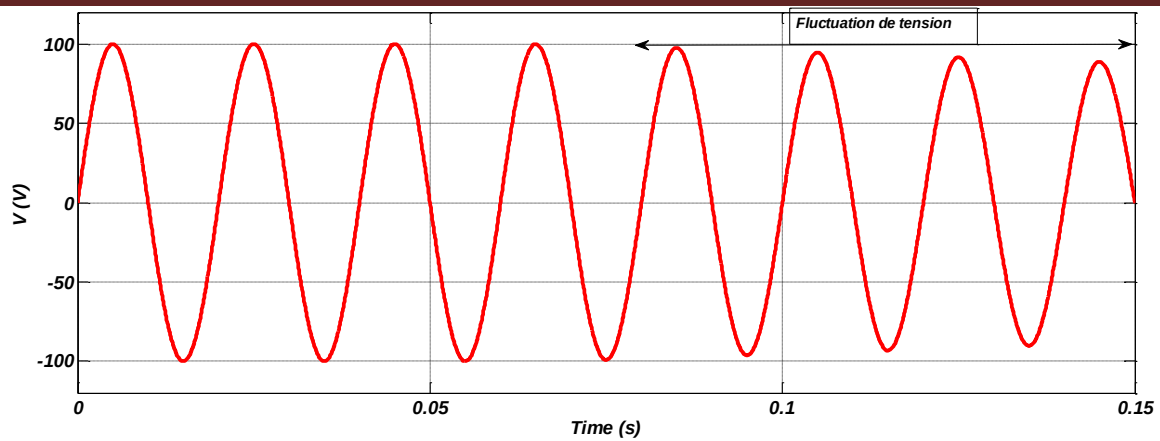


Fig. I. 2 : Fluctuation de la tension.

Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker).

2.3 Déséquilibre du système triphasé :

Les dissymétries du réseau ne provoquent que de faibles niveaux de déséquilibre de la tension (généralement limités à quelques dixièmes de pour-cent). Par contre, certaines charges monophasées (en particulier la traction ferroviaire en courant alternatif) sont la cause de courants déséquilibrés importants et dès lors d'un déséquilibre significatif de la tension [1-2].

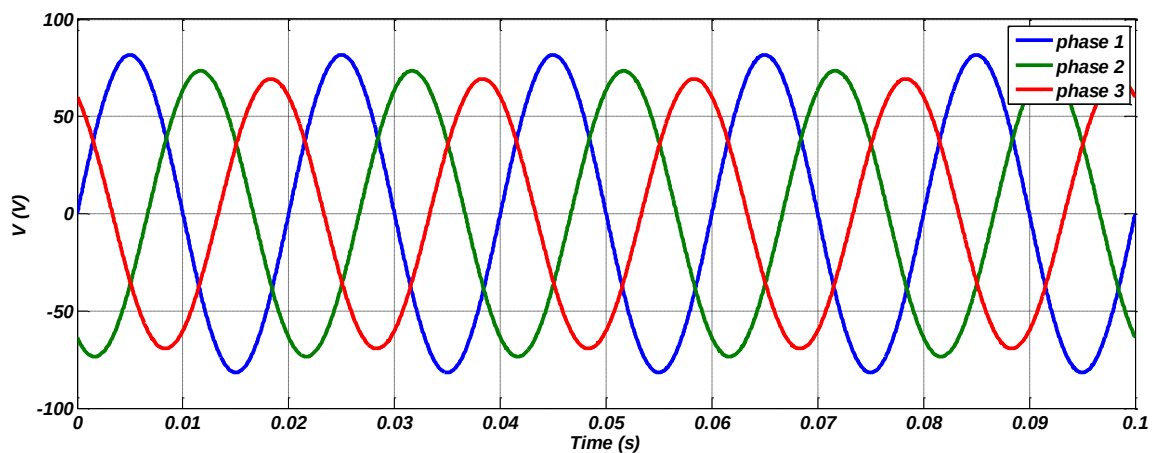


Fig. I. 3 : Déséquilibre du système triphasé.

Le problème principal engendré par le déséquilibre est l'échauffement supplémentaire des machines tournantes triphasées.

2.4 Fluctuation de la fréquence :

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome.

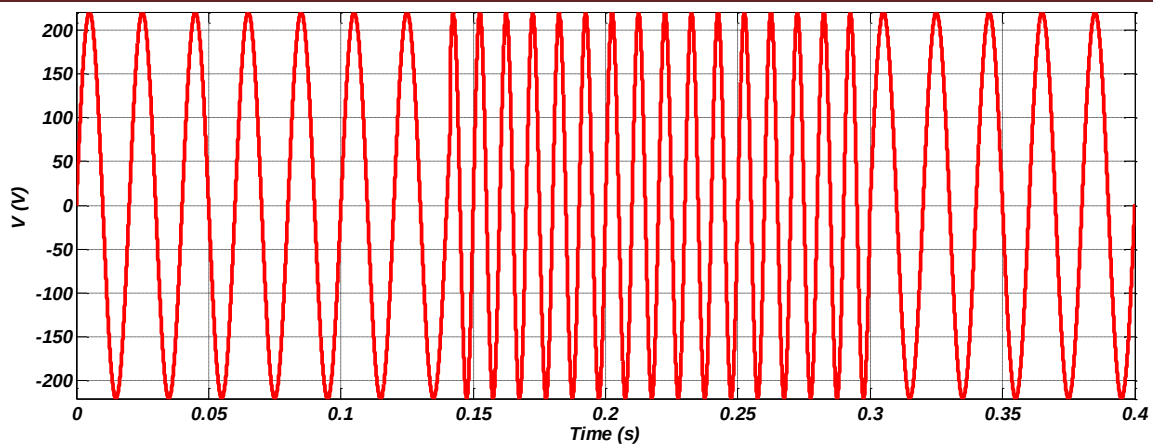


Fig. I. 4 : Fluctuation de la fréquence.

Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$.

2.5 . Harmoniques et inter-harmoniques :

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celle de la fondamentale [2- 3] (voir la fig. I. 5).

Les inter-harmoniques sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celle de la fondamentale

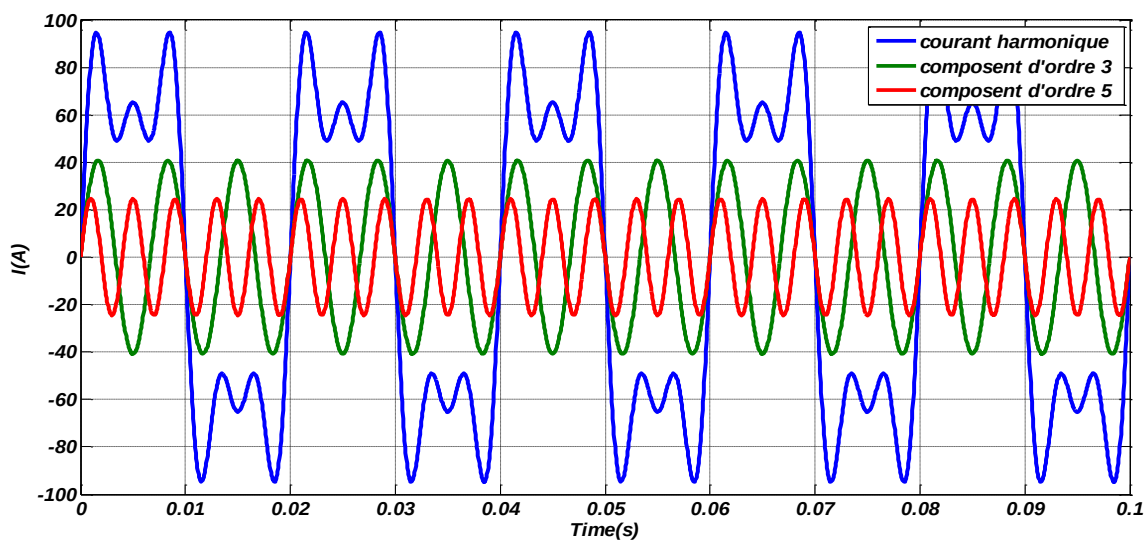


Fig. I. 5 : Harmonique et inter-harmonique.

La prolifération des équipements électriques utilisant des convertisseurs statiques a entraîné 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 entières de la fréquence fondamentale. Les différents secteurs industriels concernés sont aussi bien du type secondaire (utilisation des redresseurs, des variateurs de vitesse, etc.) que du type tertiaire (informatique dans les bureaux,

commerces, etc.) ou domestique (appareils électroménagers en grand nombre).

3. Conséquences des harmoniques :

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux types :

a. Effets instantanés ou à court terme :

- Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, télécommunication, écran d'ordinateur, téléviseur, etc.).
- Vibrations et bruits acoustiques dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).
- Perte de précision des appareils de mesure.
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication.

b. Effets à terme :

- L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements :
- Echauffement des conducteurs et des composants traversés par les courants harmoniques (condensateurs, transformateurs, machines tournantes).
- Fatigue mécanique (couples dans les machines asynchrones, etc.).
- Vieillissement des isolants [2-3].

4. Grandeurs caractérisant les perturbations harmoniques [1] :

4.1 Le taux de distorsion harmoniques :

Cette étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et le courant absorbé par la charge est entaché de composantes harmoniques.

Le THD caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée.

- **Le taux harmonique de rang i :**

$$S_i = \frac{I_{ci}}{I_{c1}} \quad (I.1)$$

Avec I_{c1} la valeur efficace du courant fondamental et I_{ci} la valeur efficace de l'harmonique de rang i .

- **Le taux global de distorsion harmonique :**

Le taux global de distorsion harmonique (THD) est le plus employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal :

$$\text{THD}\% = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_{ci}^2}}{I_{c1}} \quad (\text{I.1})$$

Il est à signaler que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2000 Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40.

4.2 . Le facteur de puissance :

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, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation (I.3), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure 6.

$$D = 3V \sqrt{I_c^2 + I_{c1}^2} = 3V \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2} \quad (\text{I.3})$$

Où I_c est la valeur efficace du courant de la charge.

Donc le facteur de puissance (F_p) devient :

$$F_p = \frac{p}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cos \gamma \quad (\text{I.4})$$

Par contre le facteur de puissance « traditionnel » est donné par $\cos \varphi_1$, soit le cosinus de l'angle entre le courant fondamental et la tension fondamentale. En présence des harmoniques, ce facteur de puissance traditionnel s'appelle facteur de puissance de déplacement.

Lorsqu'il n'y a pas de distorsion, le facteur de puissance total, le facteur de puissance de déplacement et le facteur de puissance traditionnel ont la même valeur.

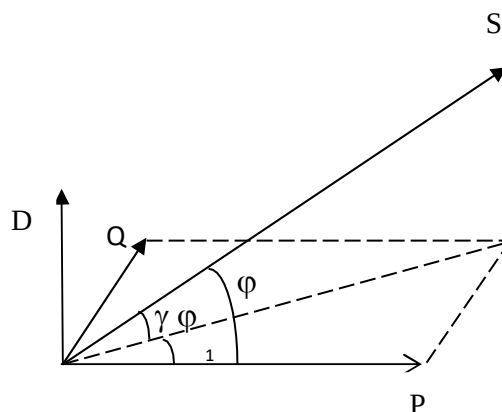


Fig. I. 6 : Diagramme de Fresnel des puissances.

5. Réglementation :

Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs.

Au niveau international, les normes CEI 61000 de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définissent le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser.

La norme CEI 61000-2-2 (tab I. 1) fixe le niveau des harmoniques en tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension déformée.

Rangs impairs		Rangs impairs		Rangs pairs	
Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)	Rang	Taux (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	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				
>25	$0.2 + 1.3 \cdot 25/i$				

Tab. I. 1 : Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension (norme CEI 61000-2-2).

La norme CEI 61000-3-2 (tab I. 2) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16 A [2-3].

Harmoniques impaires		Harmoniques paires	
Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)	Rang harmonique	Courant harmonique maximal autorisé (A)
3	2.3	2	1.08
5	1.44	4	0.43
7	0.77	6	0.3
9	0.40	$8 \leq i \leq 40$	$0.23 \cdot 8/i$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq i \leq 39$	$0.15 \cdot 15/i$		

Tab. I. 2 : Limite des composantes harmoniques en courant (norme CEI 61000-3-2).

La norme IEEE-519 (Tab I.3): signifie Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems. Cette norme détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau.

V_n ≤ 69kV						
I _{cc} / I _{ch}	h<11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0		5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69kV < V_n ≤ 161kV						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
V_n > 161kV						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Tab I.3: Limite IEEE des émissions de courants harmoniques

6. Solutions de dépollution des réseaux électriques :

Le respect de ces normes impose, si une charge non-linéaire est connectée au réseau de tension, de concevoir un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques. Deux types de solutions sont envisageables : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

6.1 Solutions traditionnelles :

Les solutions traditionnelles reposent sur des composants passifs (Inductances, condensateur, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [4].

a. Diminution de l'impédance de la source :

L'impédance de la source aux différentes fréquences harmoniques joue un rôle primordial dans la déformation de l'onde de tension. Plus cette impédance est élevée et plus le taux de distorsion en tension sera important. Donc l'une des solutions à la dépollution harmonique consiste à abaisser l'impédance de la source. En pratique cela revient à brancher le pollueur directement sur un transformateur le plus puissant possible, ou à choisir un générateur à faible impédance harmonique [5].

b. Transformateur à plusieurs secondaires [6] :

Dans le cas de charges triphasées, il est possible d'éliminer certains rangs d'harmoniques en utilisant des transformateurs ou des autotransformateurs avec plusieurs secondaires déphasés. Cette disposition se rencontre surtout dans le cas de redresseurs puissants. Le plus connu de ces montages est le redresseur constitué de deux ponts mis en série ou en parallèle, alimentés par un transformateur à deux secondaires dont l'un est en étoile et l'autre en triangle. Cette disposition entraîne un déphasage de 30° entre les tensions des deux secondaires. Le calcul montre que les harmoniques de rangs $6k \pm 1$ avec k impair sont éliminés au primaire du transformateur. Les premiers harmoniques éliminés, qui sont également les plus importants en amplitude, sont pour $k = 1$, les harmoniques 5 et 7. Les premiers harmoniques présents sont le 11 et le 13. Il est possible de généraliser cette propriété, en augmentant le nombre de redresseurs et le nombre de secondaires du transformateur ou le nombre de transformateurs en choisissant correctement les déphasages relatifs de chacun des secondaires. Cette solution est largement employée dans le cas de redresseurs de très fortes puissances pour lesquels la répartition des courants dans les différents ponts est facilement réalisable.

c. Filtre Passif :

Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Deux types de filtres passifs sont généralement utilisés :

- a) **Filtre passif résonant** : Pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau (fig. I. 7) [1]. C'est un filtre très sélectif constitué d'un ensemble RLC en série et il est accordé sur une fréquence déterminée.

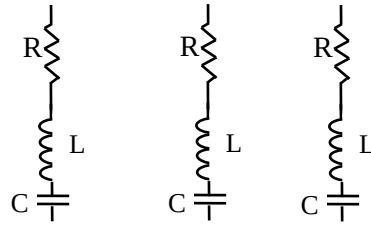


Fig. I. 7 : Filtre passif résonnant.

- b) **Filtre passif amorti** : pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre (fig. I. 8) est préférable. Ce filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible.

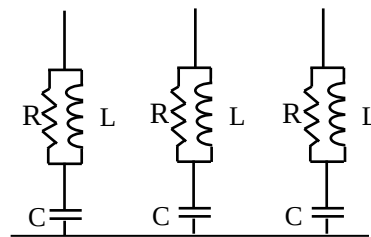


Fig. I. 8 : Filtre passif amorti.

Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients :

- Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge,
- Équipement volumineux,
- Problème de résonance avec l'impédance du réseau.

6.2 Solutions modernes :

L'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, a permis de concevoir une nouvelle structure de filtrage moderne et efficace appelée filtre actif. Le principe est d'injecter dans le réseau un signal harmonique, courant ou tension selon ce qu'on veut compenser, identique à celui existant sur ce dernier mais ayant une phase opposée, ainsi ils s'annuleront par superposition. Selon la façon dont il est connecté au réseau, on parle alors d'un filtre actif parallèle ou série.

a. Filtre actif parallèle (FAP) :

Appelé aussi compensateur shunt, il est connecté en parallèle sur le réseau de distribution

comme le montre la figure 9. Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (FAP) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par les charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre actif.

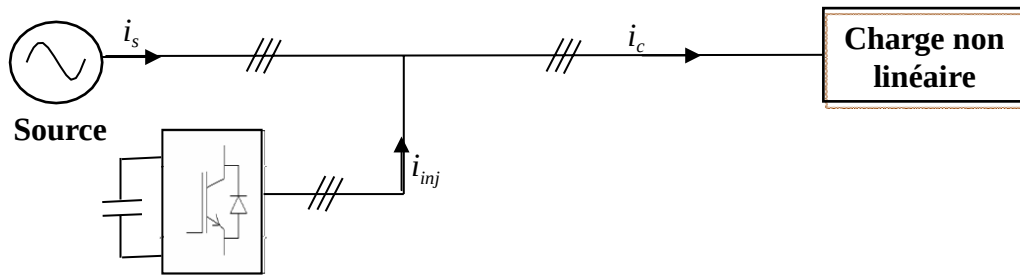


Fig. I. 9 : Filtre actif parallèle (FAP).

b. Filtre actif série (FAS) :

Ce type de compensateur est connecté en série sur le réseau de distribution (fig. I. 10). Le filtre actif série engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. Il se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibres, harmoniques) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance de la source du réseau [7]. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

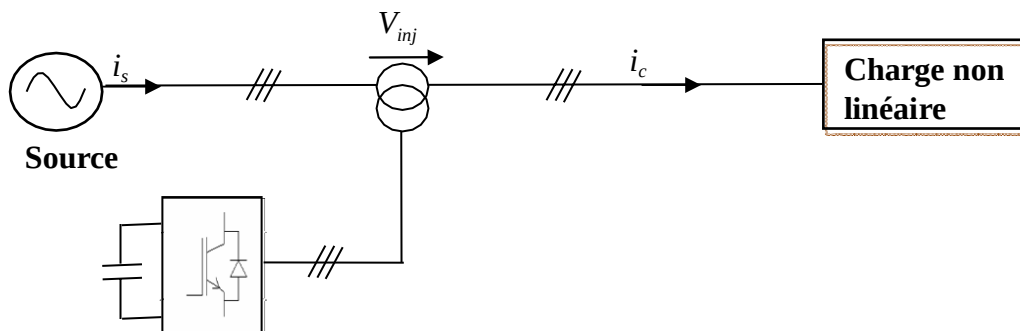


Fig. I. 10 : Filtre actif série (FAS).

c. La combinaison parallèle série actifs (UPQC) :

La combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres parallèle et série, comme le montre la figure 11. C'est une solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. L'UPQC possède les avantages cumulés des deux filtres actifs parallèle et série. Néanmoins, cette solution dite universelle reste difficilement réalisable en pratique.

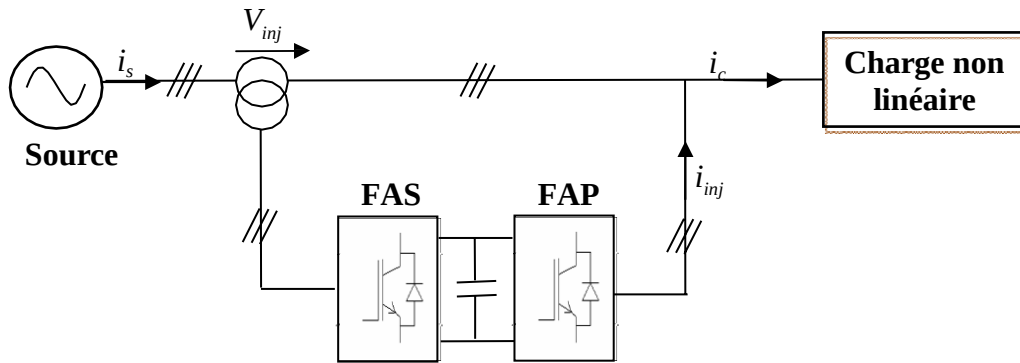


Fig. I. 11 : Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).

d. Combinaison hybride active et passive :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance et des filtres passifs peut être une solution. On peut citer trois configurations [8] :

- Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles,
- Filtre actif série connectée en série avec des filtres passifs parallèle,
- Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations affectant les réseaux électriques. Comme nous avons pu le constater, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, la puissance réactive et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces perturbations ont des conséquences différentes selon le contexte économique et le domaine d'application : de l'inconfort à la perte de l'outil de production, à la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

C'est ainsi que dans l'objectif d'améliorer la qualité de l'énergie électrique qui doit être conforme aux contraintes normatives. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes.

Ainsi afin de répondre aux contraintes de l'évolution des charges polluantes, le développement des systèmes de compensation adaptatifs est favorisé. Cependant, de nos jours le filtre actif parallèle demeure la solution la plus pertinente pour la dépollution des réseaux, c'est la plus répandue.

Chapitre II

Constitution du Filtre Actif Parallèle

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons étudier une des solutions de dépollution présentée dans le chapitre précédent. C'est le filtre actif parallèle basé sur un onduleur de tension triphasé. Cette étude comprend deux parties : la partie puissance et la partie contrôle-commande. Dans la partie puissance, on retrouve les trois blocs de cette structure : l'onduleur de tension, qui est un élément fondamental de ce filtre, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. La partie contrôle-commande comporte des blocs pour identifier des courants perturbateurs et la régulation de la tension du bus continu, ainsi la boucle de verrouillage de la phase.

2. Filtre actif parallèle

Le FAP est connecté en parallèle au réseau, il est souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte des courants harmoniques dans les réseaux égaux à ceux absorbés par la charge non linéaire, mais en opposition de phase avec ceux-ci.

L'objectif du FAP est d'empêcher les courants perturbateurs produits par les charges non linéaires de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [9].

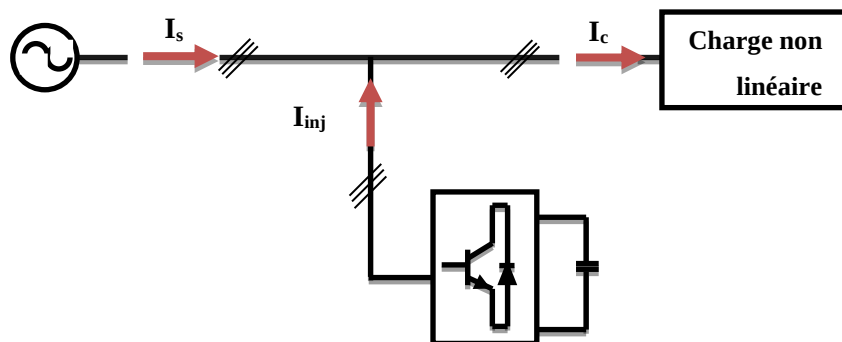


Fig.II.1 : Filtre actif parallèle.

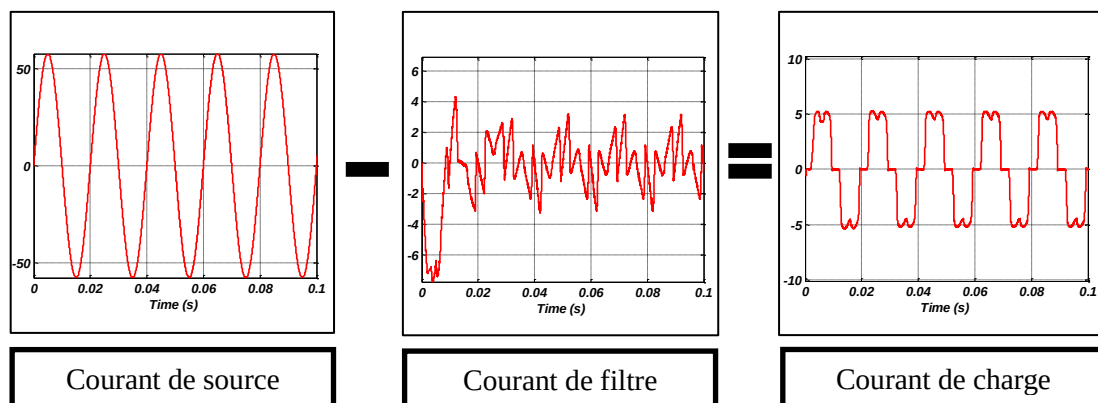


Fig.II.2 : Courbes des courants dans un système FAP

En générale, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec les performances appréciables.

3. Structure générale d'un filtre actif parallèle :

3.1 Topologie générale

Le filtre actif se compose de deux parties qui sont la partie puissance et la partie commande [10].

La partie puissance est constituée :

- d'un onduleur de tension.
- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
- d'un filtre de sortie.

La partie commande contient :

- L'identification des courants harmoniques : ceci généralement à partir des courants absorbés par la charge non linéaire ;
- Régulation de la tension du bus continu ;
- Commande de l'onduleur
- Régulation des courants harmoniques injectés par l'onduleur de tension.

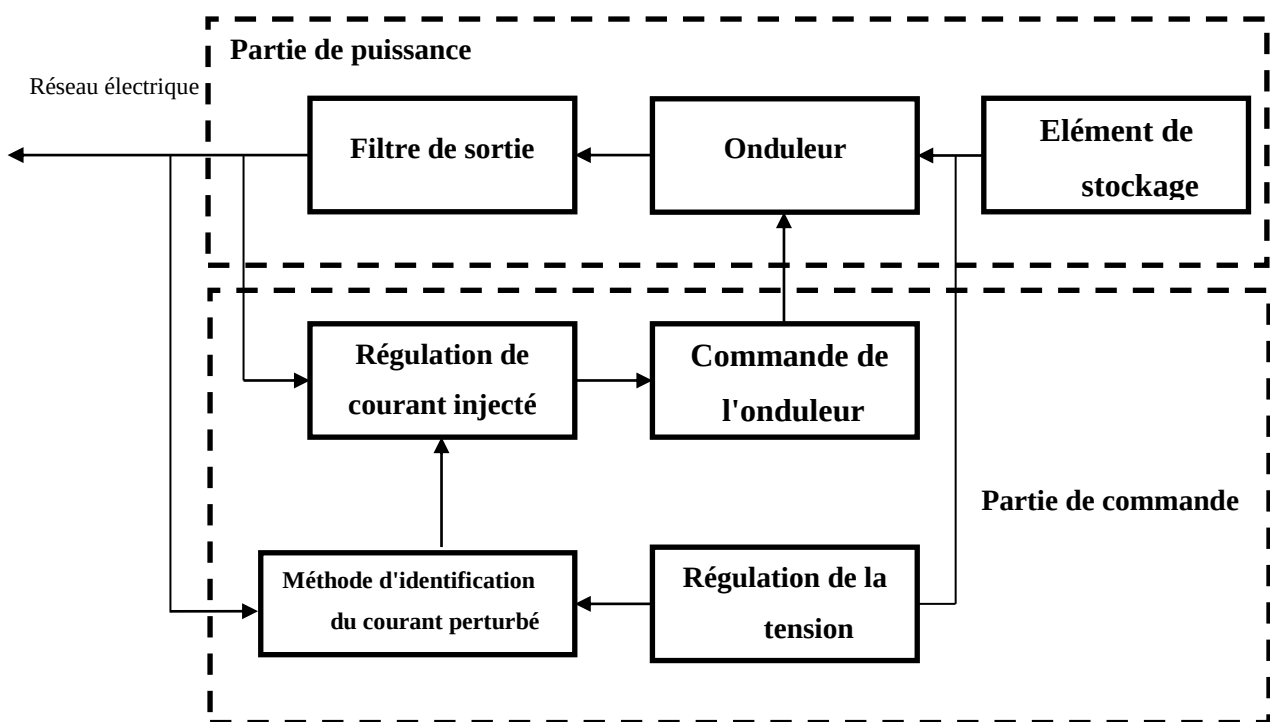


Fig.II.3 : Structure générale du filtre actif parallèle

4. Etude de la partie puissance

Le schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension est donné sur la Figure 4. On y distingue trois éléments :

- un onduleur de tension
- les inductances du couplage (filtre de couplage)
- un élément de stockage capacitif

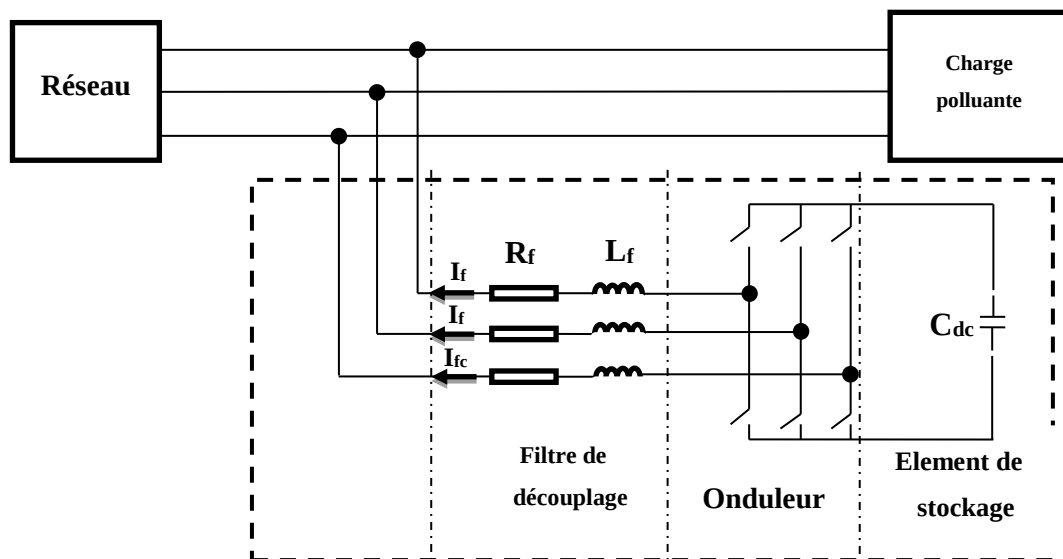


Fig.II.4 : Schéma du circuit de puissance d'un filtre actif parallèle à structure tension

4.1 Onduleur de tension

L'onduleur de tension, de par sa capacité à réaliser un grand nombre de fonctionnalités, a été naturellement mis à contribution pour réaliser des objectifs de compensation. L'onduleur de tension est composé de trois bras chacun à deux interrupteurs bidirectionnels en courant commandés à l'amorçage et au blocage, ils sont réalisés avec un transistor (MOSFET, IGBT, GTO) associé à une diode en antiparallèle pour obtenir la réversibilité en courant.

Le stockage de l'énergie se fait dans un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_{dc} . L'onduleur de tension est connecté au réseau électrique via un filtre passif appelé aussi filtre de sortie.

L'onduleur de tension triphasé et les interrupteurs de puissance sont présentés par les schémas des figures (5 et 6) respectivement.

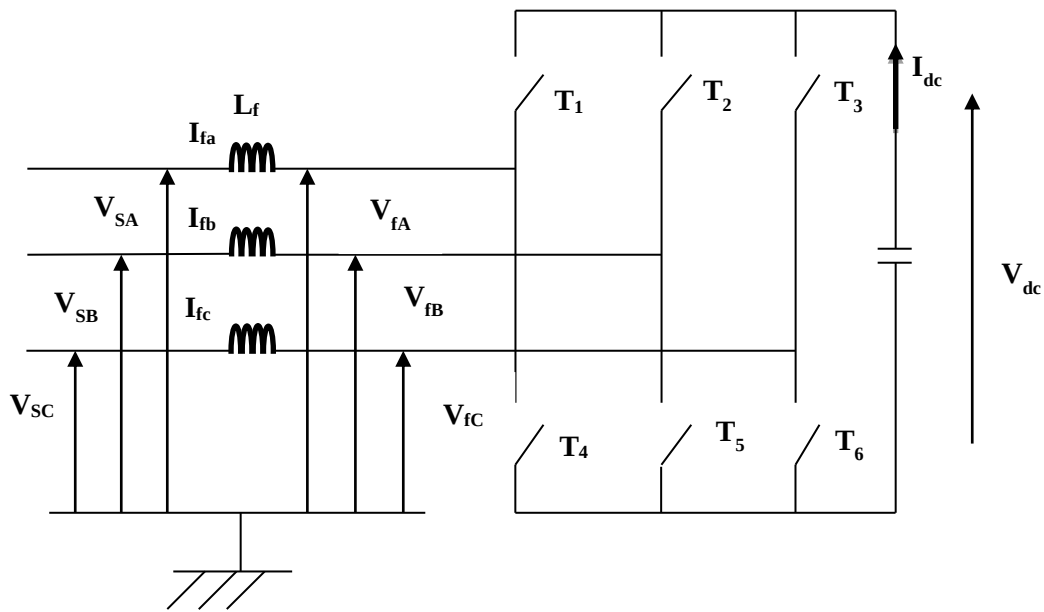


Fig.II.5 : Filtre actif à structure

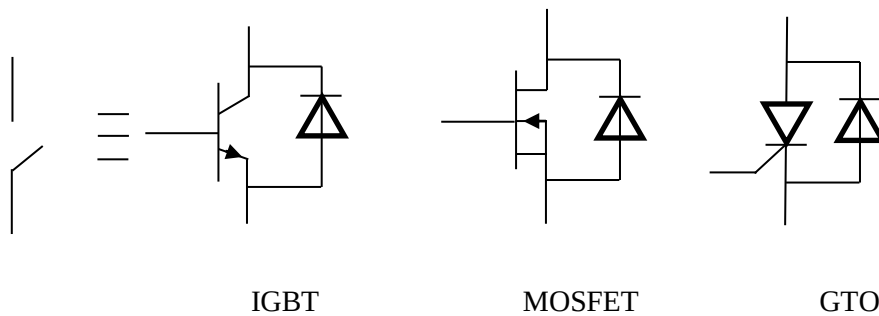


Fig.II.6 : Interrupteurs de puissance

Au cours de son fonctionnement, le convertisseur statique relie par l'intermédiaire de ses interrupteurs une source de tension alternative avec une source de tension continue entre lesquelles il assure le contrôle et l'échange d'énergie. Pour que cette liaison puisse se faire, il faut respecter deux règles essentielles [11] :

- Deux interrupteurs d'un même bras ne peuvent être fermés simultanément sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage, mais ils peuvent être tous les deux ouverts pendant un temps d'attente appelé temps mort inséré entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre. Toutefois, avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte.
- Une source de courant ne doit jamais être ouverte ce qui impose la présence de la diode antiparallèle.

4.1.1 Modélisation de l'onduleur de tension

En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure 5 dépendent de l'état de trois signaux de commande (U_1, U_2, U_3), définis ci-dessous :

$$\begin{aligned} U_1 &= \begin{cases} 1 & T1 \text{ fermé et } T4 \text{ ouvert} \\ 0 & T1 \text{ ouvert et } T4 \text{ fermé} \end{cases} \\ U_2 &= \begin{cases} 1 & T2 \text{ fermé et } T5 \text{ ouvert} \\ 0 & T2 \text{ ouvert et } T5 \text{ fermé} \end{cases} \\ U_3 &= \begin{cases} 1 & T3 \text{ fermé et } T6 \text{ ouvert} \\ 0 & T3 \text{ ouvert et } T6 \text{ fermé} \end{cases} \end{aligned} \quad (II.1)$$

Dans l'hypothèse d'un système équilibré, les tensions du réseau sont supposées triphasées équilibrées et sinusoïdales de fréquence (50Hz), elles sont définies par :

$$V_{si} = V_m \sin(\omega t - (i - 1)) \quad (i = a, b, c) \quad (II.2)$$

Avec

$$V_{sa} + V_{sb} + V_{sc} = 0 \quad (II.3)$$

V_m et ωt sont respectivement l'amplitude de la tension simple et la pulsation du réseau.

Les tensions entre phases imposées par l'onduleur sont alors :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} - V_{fb} \\ V_{fb} - V_{fc} \\ V_{fc} - V_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 - U_2 \\ U_2 - U_3 \\ U_3 - U_1 \end{bmatrix} V_{dc} \quad (II.4)$$

Le courant délivré par la capacité est :

$$i_{dc} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = \sum_{i=1}^3 (u_i i_{fi}) - V_{dc} \quad (II.5)$$

V_{fa}, V_{fb} et V_{fc} Sont les tensions par rapport au point neutre, elles vérifient l'équation :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} + L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (II.6)$$

Sachant que la somme des courants du filtre actif est nulle :

$$i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = 0 \quad (II.7)$$

On déduit des équations (3. 6. 7)

$$V_{fa} + V_{fb} + V_{fc} = 0 \quad (II.8)$$

Les équations (4 et 8) donnent :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{3} \quad (\text{II. 9})$$

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras. Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables U_1 , U_2 et U_3 , on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie du filtre actif V_{fi} (référéncées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau (1).

T	U ₁	U ₂	U ₃	U _{fa}	U _{fb}	U _{fc}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
2	0	1	0	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$
3	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$
4	0	0	1	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{-V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$
5	1	0	1	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
6	0	1	1	$\frac{-2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
7	1	1	1	0	0	0

Tableau (1) : Tensions délivrées par l'onduleur.

4.2 Circuit de stockage de l'énergie

Le stockage de l'énergie et la fourniture d'une tension continue V_{dc} sont les rôles du condensateur C_{dc} . Le choix des paramètres du système de stockage n'est pas arbitraire car ils ont une influence sur la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, le choix de la tension V_{dc} se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs (voir tableau (1)), et l'augmentation de améliore la dynamique du filtre actif, donc elle doit être choisie comme la plus grande tension tout en respectant les contraintes des

interrupteurs. Le choix de C se fait de manière à ce que les ondulations de la tension V_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif soient limitées, car plus ces ondulations sont importantes plus l'amplitude du courant du filtre est grande, sa fréquence est faible et sa qualité de compensation est dégradée.

On peut estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres de stockage. Pour démontrer ceci deux méthodes peuvent être utilisées [12] :

- La première méthode est basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7) pour un pont redresseur de Graetz. En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ε), généralement de l'ordre de 5% de V_{dc} , la capacité C est calculée à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\beta)}}{2\omega \cdot \varepsilon \cdot V_{dc}^2} \quad (II. 10)$$

Avec :

V_s : La valeur efficace de la tension simple du réseau.

α : l'angle d'allumage des thyristors du pont de Graetz.

- La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante :

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\varepsilon V_{dc} \omega_h} \quad (II. 11)$$

Avec :

ω_h : Est la plus faible pulsation des harmoniques à compenser.

I_h : Le courant harmonique du rang h.

4.3 Filtre de couplage

Le filtre de couplage est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau. Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- Assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad (II. 12)$$

Où i_f : Courant du filtre

I_h : Courant harmonique de la charge

- Empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique... Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance L_f avec une résistance interne R_f , une petite valeur de cette

inductance assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau.

En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{\max} = \frac{V_{f\max} - V_{s\max}}{L_f} \quad (II.13)$$

Avec $V_{f\max}$: La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.

$V_{s\max}$: La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre $\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$.

Prenons la valeur maximale de tension avec la valeur maximale de la tension du réseau, pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{\max} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc} - V_{i\max}}{L_f} \quad (II.14)$$

Avec $\Delta T = \frac{1}{f_{ond}}$: la période de variation du courant du filtre.

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25% de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par :

$$L_f = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc} - V_{s\max}}{0.25i_{s\max}f_{ond}} \quad (II.15)$$

5. Etude de la partie contrôle-commande

La partie control-commande d'un filtre actif comprend les étages essentiels suivants :

- 1- Identification des courants harmoniques : ceci généralement à partir des courants absorbés par la charge non linéaire ;
- 2- Réglage de la tension du bus continu ;
- 3- Régulation des courants harmoniques injectés par l'onduleur de tension.
- 4- Boucle de verrouillage de la phase.

5.1 Identification des courants harmoniques

Elle consiste à générer les courants de référence que l'onduleur doit injecter pour contrer les harmoniques de la charge non linéaire. Cette identification peut être réalisée dans le domaine temporel ou fréquentiel. Dans le domaine temporel, deux méthodes sont très souvent utilisées :

la méthode des courants instantanés dans le référentiel synchrone dq, ou la méthode des

puissances instantanées pq dans le référentiel $\alpha\beta$. Les méthodes d'identifications vont être présentées dans le chapitre suivant.

5.2 Régulation de la tension continue

La tension aux bornes du bus continu doit être maintenue à une valeur supérieure de la tension maximale au PCC. L'onduleur de tension maintient cette tension en absorbant une puissance active du réseau afin de compenser ses propres pertes. Ainsi, le réglage de la tension continu est réalisé par un régulateur souvent de type PI qui génère une référence (I_{dc} ou P_{dc}) que l'onduleur doit absorber du réseau, en plus des courants harmoniques de référence. Ce courant supplémentaire est calculé par :

$$P_{dc} = K_p(V_{dc \text{ ref}} - V_{dc}) + K_i \int (V_{dc \text{ ref}} - V_{dc}) dt \quad (\text{II. 16})$$

Où K_p et K_i représentent les gains proportionnel et intégral du régulateur PI.

La boucle de régulation de la tension continue est donnée sur la Figure 9.

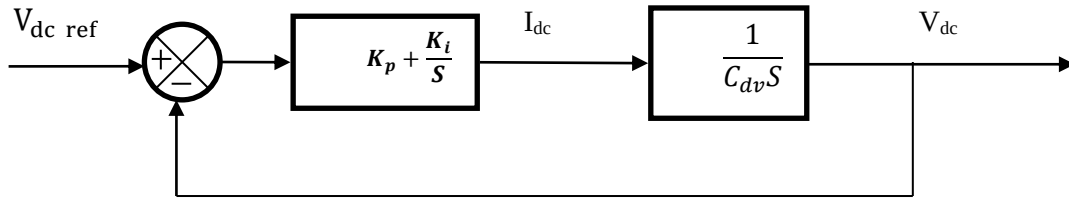


Fig.II.7 : Boucle de régulation de la tension continue

Ainsi le calcul des paramètres K_p et K_i est réalisé à partir de la fonction de transfert en boucle fermée en fixant une fréquence de coupure (environ 20 Hz) et un amortissement optimal (0.7).

5.3 Régulation de courant du filtre actif

En négligeant les résistances du filtre de sortie sur le courant de référence I_f (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation) [12], relation suivante caractérisant le courant du filtre actif I_f :

$$L_f \frac{d}{dt} I_f = V_f - V_s \quad (\text{II. 17})$$

Avec

$$L_f = L_{f1} + L_{f2} \quad (\text{II. 18})$$

Notons par ΔI_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_f \quad (\text{II. 19})$$

Des équations (17 et 19) nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = (V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref}) - V_f \quad (II.20)$$

Le premier terme de la partie droite de la relation 20 peut être défini comme tension de référence (V_{f-ref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (II.21)$$

L'écart entre V_{f-ref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation 21, la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_f , Lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la Figure 10.

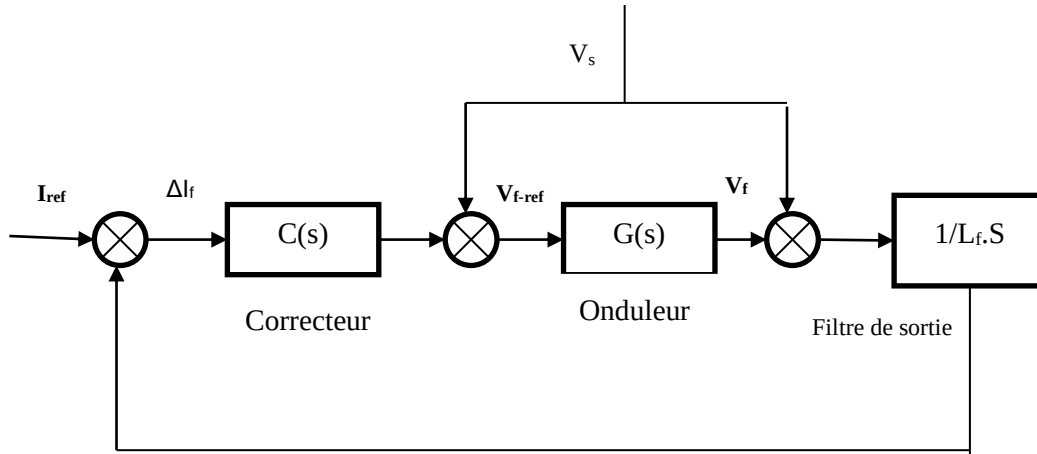


Fig.II.8 : Schéma de la régulation des courants du F.A.P

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur qui peut être modélisé par la relation suivante :

$$\begin{cases} C(s) = K \frac{1}{1+\tau s} \\ K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{cases} \quad (II.22)$$

Avec V_{dc} la tension côté continu de l'onduleur, V_p l'amplitude de la porteuse triangulaire et (τ) représentant le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

6. La commande de l'onduleur

Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont :

- La commande par hystérésis,
- La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

6.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur entre le courant de référence et le courant généré par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la limite inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé aux interrupteurs pour rendre l'erreur à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre est le principal atout de cette technique. Cependant, la fréquence de commutation n'est pas maîtrisée (aléatoire) ; en conséquence, les commutations évoluent librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis [13].

Cette commande est très adaptée pour les systèmes ayant une action à deux positions comme l'IGBT qui peut être ouvert ou fermé. En pratique la largeur de la bande d'hystérésis est fixée à 5% du courant nominal. Cependant elle ne garantit pas d'une manière systématique le respect de la fréquence maximale de commutation des semi-conducteurs [14]. Le Schéma de principe est donné par la Figure 11.

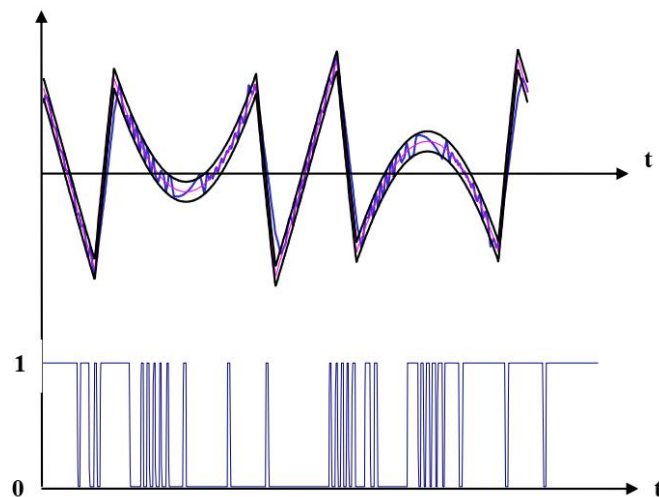


Fig.II.9 : Bande d'hystérésis et signal de commande d'un interrupteur

Le schéma synoptique de la commande des courants du filtre actif par des régulateurs à hystérésis est donné par la Figure 12.

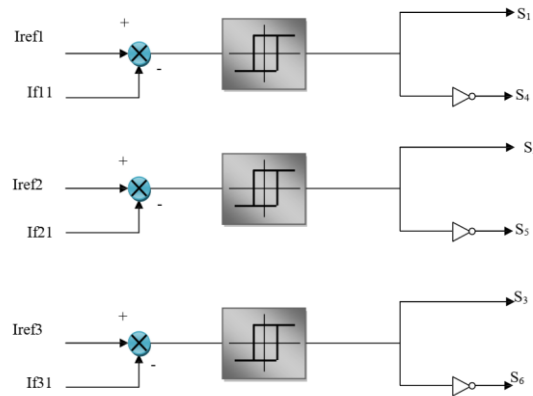


Fig.II.10 : Commande par hystérésis d'un filtre actif parallèle

6.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI):

Pour résoudre les problèmes précédents, nous introduisons une deuxième famille de commande de l'onduleur, c'est la technique de commande par MLI, qui résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs [15]. Le schéma de principe est donné par la Figure 13.

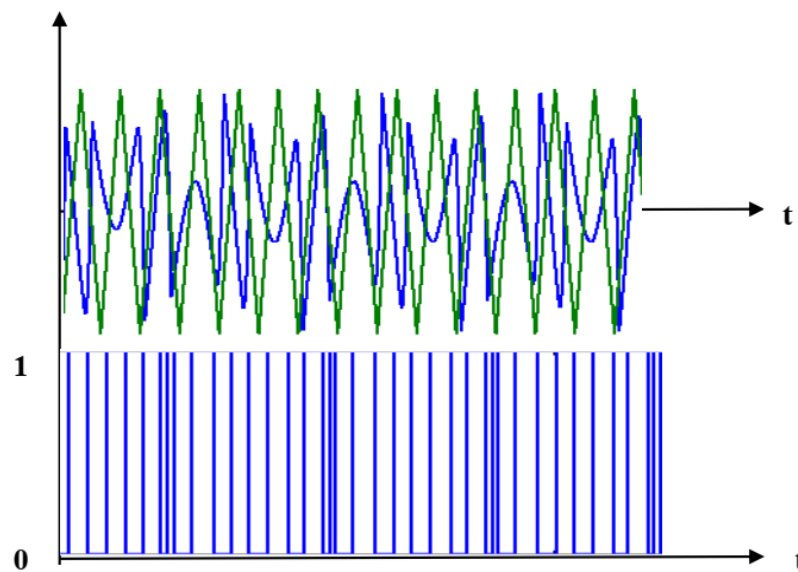


Fig.II.11 : Bande de MLI et signal de commande d'un interrupteur

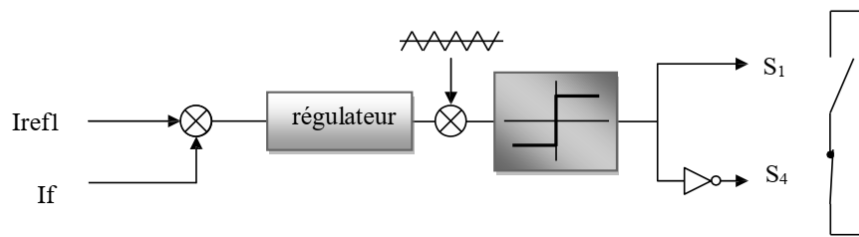


Fig.II.12 : Commande par MLI d'un filtre actif parallèle

7. Boucle à verrouillage de phase (PLL)

La synchronisation appropriée avec le réseau électrique est l'un des aspects les plus importants à considérer dans le contrôle des dispositifs reliés au réseau tels que les redresseurs commandés, les filtres actifs, et également dans les systèmes de génération de l'énergie électrique tels que les centrales éoliennes et photovoltaïques. La solution la plus largement adoptée pour la synchronisation est la PLL (*Phase Locked Loop ou Boucle à Verrouillage de Phase*).

Afin de contrôler les échanges de puissance, l'onduleur doit être toujours synchronisé avec le réseau. Pour améliorer la qualité de l'énergie au niveau du réseau tout en Assurant un facteur de puissance quasi-unitaire, la génération d'un signal sinusoïdal en phase avec la tension d'alimentation est nécessaire pour la détermination des courants de références. Cependant, le système de tension auquel nous avons accès (FAP) est celui mesure au niveau du point de raccordement (PCC), c'est-à-dire (V_s). Lorsque la charge est non linéaire, elle absorbe des courants non sinusoïdaux qui génèrent des harmoniques de courant, dégradant ainsi la tension au point commun de connexion (PCC). De plus, si les courants absorbés par la charge sont déséquilibrés, un système inverse de tension apparaît au niveau de PCC.

Par conséquent, des composantes harmoniques risquent de subsister dans le courant de source (i_s) après compensation.

En effet, l'objectif du bloc de synchronisation est d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau par la réalisation d'un suivi de phase de la composante en quadrature, ce qui se produit lorsque la phase estimée est égale à la phase du réseau. Dans la plupart des stratégies de commande conventionnelles pour les dispositifs électronique de puissance, spécialement pour le filtrage actif shunt, l'amplitude, la fréquence et la phase instantanée de la tension directe du réseau électrique, sont nécessaires.

7.1 Structure générale de la PLL classique

La Figure 15 montre l'ensemble de la structure du système à base de PLL. La PLL est utilisée pour détecter des composantes symétriques ainsi que la phase instantanée de la tension en utilisant un filtre passe-bas.

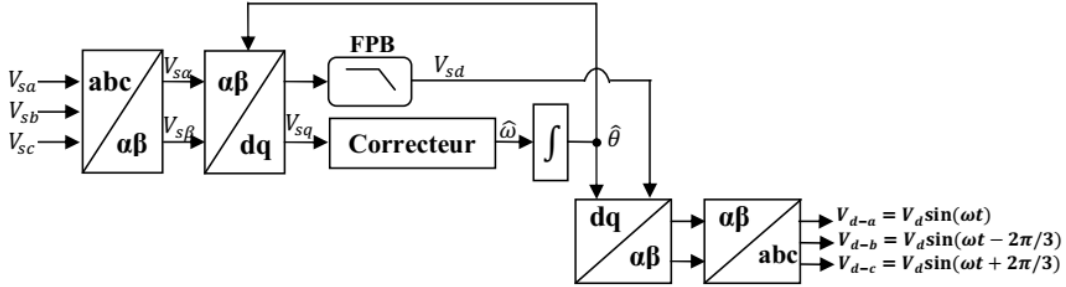


Fig.II.13 : Structure classique d'une PLL

7.2 Utilisation d'un filtre multi-variable

Dans cette approche simple, le filtre multi-variable est utilisé pour générer les signaux $\cos(\theta)$ et $\sin(\theta)$ des courants. Ce filtre permet aussi d'obtenir la phase instantanée à partir des signaux cos ou du sin.

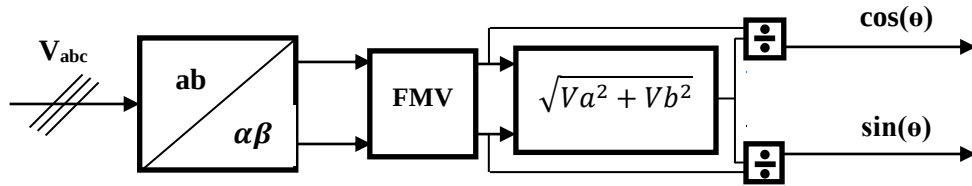


Fig.II.14 : Structure d'une PLL avec filtre multi-variable.

8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la partie puissance du FAP, où plusieurs éléments ont été introduits : l'onduleur de tension, le circuit de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Nous avons également abordé dans la partie commande l'identification des courants harmoniques, la régulation de la tension continue et celle du courant du FAP et la boucle de verrouillage de la phase. Enfin, nous avons brièvement présenté les stratégies de commande de l'onduleur, notamment l'utilisation de l'hystérésis.

Chapitre III

Identification des Courants Harmoniques avec les Réseaux de Neurones

1. Introduction

L'identification des harmoniques est une étape très importante dans le processus de Compensation active. En effet, le système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer des corrections suffisantes si les harmoniques parasites sont mal identifiées.

Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature.

Dans ce chapitre nous présentons des techniques d'identifications des courants harmoniques pour les réseaux électriques. Ces méthodes se basent sur l'utilisation des réseaux de neurones de type Adeline. En effet, une fois estimée, la valeur référence des courants harmoniques est injectée, en opposition de phase, sur le réseau électrique au moyen d'un dispositif de puissance. De cette manière, nous obtenons une solution qui peut répondre aux nouvelles normes de d'pollution imposée aux industriels par les distributeurs d'énergie électrique.

2. Identification des harmoniques avec la méthode directe

2.1 Décomposition des courants

Considérons l'expression suivante, représentant les courants perturbés par des harmoniques dans un système électrique triphasé :

$$i_c(t) = i_{cf}(t) + i_{ch}(t) = \sum_{n=1...N} [I_{n1} \cos n(\omega t - \alpha) + I_{n2} \sin n(\omega t - \alpha)] \quad (III.1)$$

Dans cette expression i_{cf} représente le courant fondamental et i_{ch} représente le courant harmonique tel que :

$$I_{cf}(t) = [I_{11} \cos(\omega t - \alpha) + I_{12} \sin(\omega t - \alpha)] \quad (III.2)$$

Et

$$i_{ch}(t) = \sum_{n=2...N} [I_{n1} \cos n(\omega t - \alpha) + I_{n2} \sin n(\omega t - \alpha)] \quad (III.3)$$

Où ω est la fréquence fondamentale du réseau électrique, α est un angle quelconque qui peut être égale à zéro, I_{11} et I_{12} sont les amplitudes associées aux cosinus et sinus du courant fondamental, I_{n1} et I_{n2} sont associés aux cosinus et sinus du courant harmonique d'ordre n .

2.2 Identification des courants avec les AdaLines

De nombreuses techniques basées sur des réseaux Neur mimétiques et sur l'Adeline en particulier ont été développées pour identifier et filtrer les harmoniques dans les systèmes électriques. Le réseau de neurones appelé Adeline (Adaptive Liner Elément) relie un vecteur d'entrée à une seule sortie à travers un unique poids adaptatif. Le neurone effectue ce lien à travers une fonction d'activation linéaire. Avec une règle d'apprentissage du type LMS (Least-Meany-Square), l'apprentissage est réalisé par itération. Dans ce travail nous utilisons cette règle dont la convergence a été démontrée [16].

L'expression du courant de charge $i_c(t)$ peut être alors écrite sous la forme matricielle suivante :

$$i_c(t) = W^T X(t) \quad (\text{III. 4})$$

Dans cette expression, W représente le vecteur des poids de l'Adeline et $X(t)$ le vecteur des entrées constitué des composants cosinus et sinus des différentes harmoniques :

$$W^T = [I_{11} I_{11} \dots I_{n1} I_{n2}]$$

$$\text{Et } X(t) = [\cos(\omega t - \alpha) \sin(\omega t - \alpha) \dots \cos n(\omega t - \alpha) \sin n(\omega t - \alpha)] \quad (\text{III. 5})$$

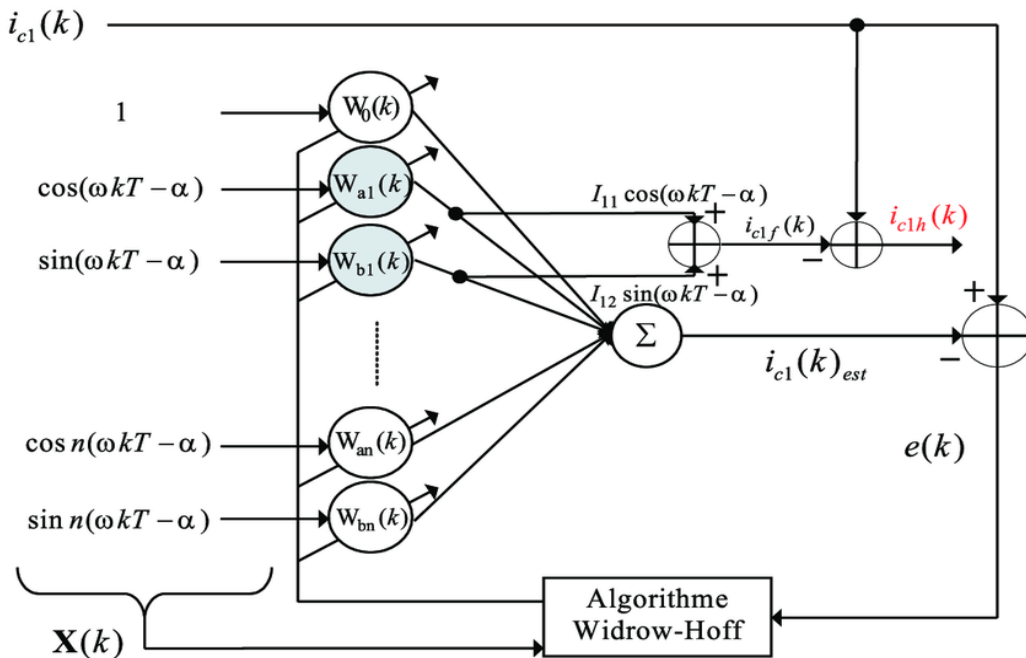


Figure III. 1 : Structure de l'Adeline pour la méthode d'identification directe.

L'erreur $e(k)$ est la différence entre le courant $i_{c1}(k)$ à l'instant K et le courant estimé $i_{c1}(k)_{est}$. Elle est utilisée par l'algorithme d'apprentissage de Widrow-Hoff, pour la mise à jour des poids.

Le courant fondamental estimé est alors évalué comme suit :

$$i_{cf}(t) = W_{c1} \cos(\omega t - \alpha) + W_{s1} \sin(\omega t - \alpha) \quad (III.6)$$

Où W_{c1} et W_{s1} représentent les poids du réseau Adeline associés aux entrées constituées des termes cosinus et sinus pour la fréquence fondamentale.

La différence entre le courant de charge $i_c(t)$ et le courant fondamental $i_{cf}(t)$ donne la somme des harmoniques et donc de ce fait le courant de référence :

$$i_{ref}(t) = i_{ch}(t) = i_c(t) - i_{cf}(t) \quad (III.7)$$

Avec cette méthode, dans le but de sélectionner les harmoniques que l'on veut compenser, il est possible d'identifier les courants harmoniques individuellement. Il suffit alors de prélever les amplitudes identifiées par les poids de l'Adeline correspondant aux composantes des cosinus et sinus des harmoniques en question. Ainsi, pour une harmonique d'ordre n on peut écrire :

$$i_{cn}(t) = W_{cn} \cos(\omega t - \alpha) + W_{sn} \sin(\omega t - \alpha) \quad (III.8)$$

3. Identification des harmoniques avec la méthode des PIRI

La méthode des puissances active et réactive est une technique de compensation bien établie. Elle n'est cependant valable que si les tensions appliquées à l'entrée de l'identificateur forment un système direct de tension.

3.1 Identification des harmoniques avec la méthode des PIRI classique

Cette méthode nécessite la composante directe de la tension du réseau électrique. De plus, cette méthode ne peut-être employée que pour un système triphasé. La méthode neuronale des PIRI qui remplace les filtres passe-bas par des réseaux Adeline, possèdent les mêmes caractéristiques.

Notons respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé sans composante homopolaire par (V_a, V_b, V_c) et (I_a, I_b, I_c) . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé dont les axes sont en quadrature.

Cette transformation appliquée aux tensions du réseau et aux courants de ligne mène à :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Et

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 9})$$

La puissance réelle instantanée p et la puissance réactive instantanée q peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III. 10})$$

Puissance réelle instantanée : $p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta$

Puissance imaginaire instantanée : $q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha$

La puissance réelle instantanée ainsi que la puissance imaginaire instantanée peuvent être exprimées de la façon suivante :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{q} \\ q = \bar{q} + \tilde{p} \end{cases}$$

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale dans les équations s'effectue à l'aide de deux filtres passe-bas de Butter Worth d'ordre deux

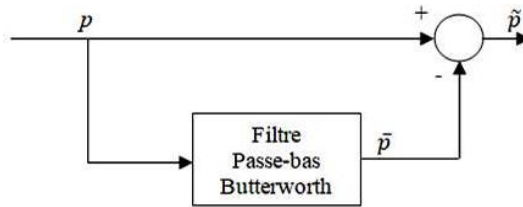


Figure III.2 : Filtrage de la composante de la puissance continue.

Donnant les puissances réelle et imaginaire instantanées découle l'expression suivante pour les courants

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \\ p \end{bmatrix} \quad (\text{III. 11})$$

Nous pouvons séparer le courant dans le repère $(\alpha\beta)$ en trois composants, active et réactive à

la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_{ref\ 1} \\ I_{ref\ 2} \\ I_{ref\ 3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{2}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

L'algorithme de la figure (3.4) illustre la méthode d'identification des différents courants deréférence pour la partie parallèle du filtre

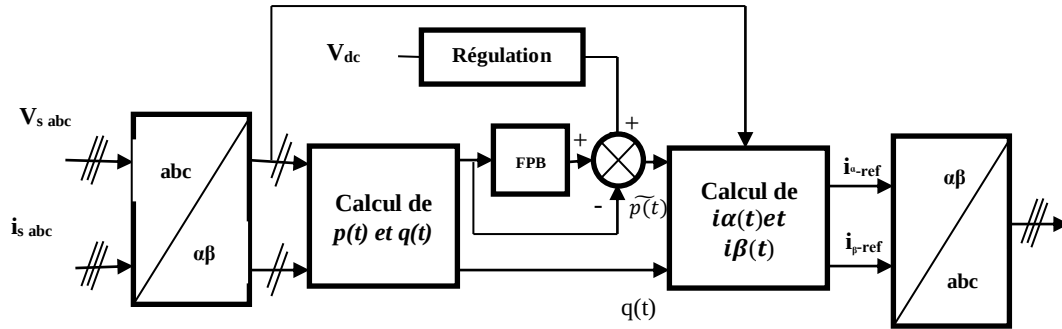


Figure III.3 : Algorithme d'identification des courants harmoniques avec la méthode des PIRI

3.2 Identification des harmoniques avec la méthode des PIRI neuronale

Il est possible de décomposer le courant et la tension directe d'un réseau électrique de la façon suivante [17] :

$$i(t) = \sum_{n=1 \dots N} [I_{n1} \cos n(\omega t - \alpha) + I_{n2} \sin n(\omega t - \alpha)] \quad (III.13)$$

$$V(t) = \sum_{n=1 \dots N} [V_{n1} \cos n(\omega t) + V_{n2} \sin n(\omega t)] \quad (III.14)$$

Où ω est la fréquence fondamentale du réseau électrique, α l'angle de déphasage entre le courant et la tension, I_{n1} et I_{n2} sont les amplitudes des composantes en sinus et en cosinus du courant, V_{n1} et V_{n2} les amplitudes des composantes en cosinus et en sinus de la tension réseau.

A l'aide d'une analyse fréquentielle, il est possible de développer les expressions des puissances instantanées :

$$p(t) = \underbrace{p_1 \cos \alpha}_{\bar{p}} + \underbrace{p_5 \cos(6\omega t - 5\alpha) - p_7 \cos(6\omega t - 7\alpha) - \dots}_{\tilde{p}}$$

$$p(t) = \underbrace{-q_1 \cos \alpha}_{\bar{q}} - \underbrace{q_5 \sin(6\omega t - 5\alpha) - q_7 \sin(6\omega t - 7\alpha) - \dots}_{\tilde{q}}$$

Dans ces équations $p_1 \cos \alpha$ et $q_1 \sin \alpha$ représentent les parties continues des puissances

instantanées $\bar{p}$ et $\bar{q}$ les autres parties représentent respectivement les composantes alternatives $\tilde{p}$ et $\tilde{q}$. Les deux signaux représentés par les équations peuvent être écrits sous la forme générale suivante :

$$f(t) = A_0 + \sum \begin{pmatrix} A_{n1} \cos(n\omega t - (n-1)) \\ + A_{n2} \cos(n\omega t - (n+1)) \\ + B_{n1} \sin(n\omega t - (n-1)) \\ + B_{n1} \sin(n\omega t - (n+1)) \end{pmatrix}$$

où A_0 est la composante continue et A_{n1} , A_{n2} , B_{n1} et B_{n2} les amplitudes des cosinus et sinus.

Après avoir montré dans la section précédente qu'une identification des composantes alternatives des puissances instantanées permettait de filtrer les perturbations, nous introduisons une stratégie de filtrage qui reprend ce principe mais basée cette fois sur l'utilisation des techniques neuromimétiques. Notre démarche consiste à remplacer les deux filtres passe bas de la méthode de puissances instantanées par deux réseaux Adaline. Selon le schéma présent sur (la figure 3.5).

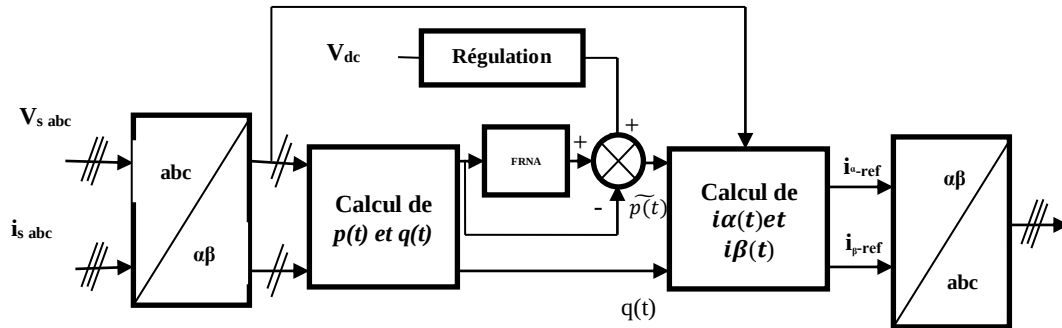


Figure III.4 Structure d'identification des courants de références avec la méthode des Puissances instantanées utilisant des ADALINE

À l'aide d'une analyse fréquentielle, il est possible de développer les expressions de puissances instantanées :

$$p(t) = p_1 \cos(\alpha) + p_5 \cos(6\omega t - 5\alpha) - p_7 \cos(6\omega t - 7\alpha)$$

$$q(t) = q_1 \cos(\alpha) + q_5 \cos(6\omega t - 5\alpha) - q_7 \cos(6\omega t - 7\alpha)$$

4. Identification des harmoniques avec la méthode de référentiel synchrone

4.1 Méthode classique

La méthode de référentiel lié au synchronisme, est appelée aussi méthode des courants instantanés (dq). Pour calculer les courants de références dans un filtre actif.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (III.15)$$

Actuellement, les courants biphasés i_α et i_β à axes $\alpha\beta$ fixes sont converties en courants biphasés dans un repère tournant (ou synchrone), $\cos(\theta)$ et $\sin(\theta)$ montre les vecteurs de l'unité synchrone qui peuvent être créés en utilisant un système en boucle (PLL).

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

Les d-q courants ainsi obtenus comprennent des parties alternatives et continues. La composante fondamentale du courant est représentée par la partie DC fixe et la partie AC représente la composante harmonique. Ce composant harmonique peut être extrait à l'aide d'un filtre passe-bas. Le courant de l'axe d est une combinaison du courant fondamental actif (i_{dc}) et du courant harmonique de charge (i_{dh}). La composante fondamentale du courant tourne de manière synchronisée avec le cadre en rotation et peut donc être considérée comme un courant continu.

En filtrant (i_{dh}), on obtient la composante fondamentale du courant de charge dans la trame synchrone. Ainsi, la composante alternative i_h peut être obtenue en soustrayant (i_{dc}) une partie du courant total d'axe d (i_d), ce qui laisse elle la composante harmonique présente dans le courant de charge. Dans le cadre en rotation, le courant d'axe q (i_q) représente la somme des courants de charge réactifs fondamentaux et d'une partie des courants harmoniques de charge.

Ainsi, le courant de l'axe des q peut être totalement utilisé pour calculer les courants de compensation de référence. On effectue maintenant une transformation inverse pour transformer les courants d'une trame synchrone biphasée d-q en une trame stationnaire biphasée $\alpha\beta$ [17].

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_q \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

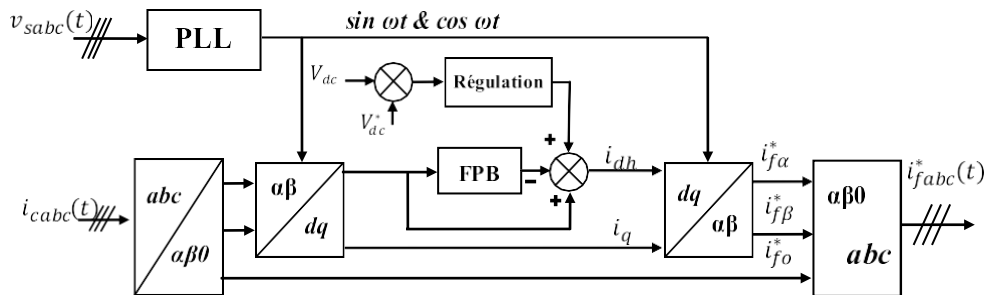


Figure III.5– Identification par la méthode de référentiel synchrone avec FPB.

4.2 Méthode utilisant un filtre RNA

Nous considérons la relation simplifiée du courant pollué, sur les trois phases comme suite :

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = I_1 \begin{bmatrix} \cos(wt - \alpha_1) \\ \cos\left(wt - \alpha_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(wt - \alpha_1 + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} + \sum_{n=2 \dots N} \ln \begin{bmatrix} \cos(nwt - \alpha_n) \\ \cos\left(nwt - \alpha_n - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(nwt - \alpha_n + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (III. 18)$$

Où la première partie représente les courants fondamentaux et la seconde modélise la somme des harmoniques. La première phase de notre transformation consiste à écrire les courants dans le repère $\alpha\beta$:

$$\begin{bmatrix} i_\beta \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = \sum_{n=1 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} \ln \begin{bmatrix} \cos(nwt - \alpha_n) \\ \sin(nwt - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (III. 19)$$

C_{32} : est la matrice de Concordia.

Les courants fondamentaux et les courants harmoniques peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \cos(wt - \alpha_1) \\ \sin(wt - \alpha_1) \end{bmatrix} + \sum_{n=2 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \cos(nwt - \alpha_n) \\ \sin(nwt - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (III. 20)$$

i_α et i_β représentent les courants dans le repère Concordia.[17]

Séparer les composantes harmoniques de la composante fondamentale A partir du courant de charge en signe $\alpha\beta$, on utilise des filtres Neurones.

Transformée de Park (P), avec un angle de rotation de $-\omega t$, pour les courants L'équation III.20 donne les nouveaux courants :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = P(-\omega t) \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) \\ \sin(\alpha_1) \end{bmatrix} + \sum_{n=2 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \cos((n-1)wt - \alpha_n) \\ \sin((n-1)wt - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (III. 21)$$

i_d et i_q représentent les courants dans le repère dq.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \begin{bmatrix} \cos(\alpha_1) \\ -\sin(\alpha_1) \end{bmatrix} \quad (III. 22)$$

Et

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} = \sum_{n=1 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \begin{bmatrix} \cos((n-1)wt - \alpha_n) \\ \sin((n-1)wt - \alpha_n) \end{bmatrix} \quad (III. 23)$$

Les composantes continues $\bar{i}_d$ et $\bar{i}_q$ de l'équation (III.22) représentent les courants fondamentaux dans le repère diphasé. Les composantes alternatives $\tilde{i}_d$ et $\tilde{i}_q$ de l'équation (III.23) représentent les courants harmoniques dans le même repère.

Si on choisit de séparer les composantes continues des composantes alternatives dans le repère de Park (d-q) au lieu de faire la séparation dans le repère α - β , on peut utiliser deux filtres neuronaux qui remplacent les deux FPB. Pour retrouver les courants harmoniques de référence.

Dans le repère triphasé, on réalise successivement les transformations C_{32} et $P(\omega t)$ sur les courants de l'équation (III.23) :

$$\begin{bmatrix} I_{\text{ref } 1} \\ I_{\text{ref } 2} \\ I_{\text{ref } 3} \end{bmatrix} = C_{32} P(\omega t) \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{III. 24})$$

De la même manière avec le repère $\alpha\beta$, deux réseaux Adaline sont nécessaire pour la reconstitution des courants i_d et i_q dans le repère dq. Les courants de l'équation (III.23) peuvent s'écrire séparément comme suit :

$$\begin{aligned} i_d &= \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \cos(\alpha_1) + \sum_{n=2 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \cos((n-1)\omega t - \alpha_n) \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \cos(\alpha_1) + \sum_{n=2 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n [\cos((n-1)\omega t) \cos(\alpha_n) + \sin((n-1)\omega t) \sin(\alpha_n)] \end{aligned} \quad (\text{III. 25})$$

$$\begin{aligned} i_q &= \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \sin(\alpha_1) + \sum_{n=2 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \sin((n-1)\omega t - \alpha_n) \\ &= \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \sin(\alpha_1) + \sum_{n=2 \dots N} \sqrt{\frac{3}{2}} I_n [\sin((n-1)\omega t) \cos(\alpha_n) + \cos((n-1)\omega t) \sin(\alpha_n)] \end{aligned} \quad (\text{III. 26})$$

$$i_d = W_d^T X_d(t) \quad (\text{III. 27})$$

$$i_q = W_q^T X_q(t) \quad (\text{III. 28})$$

avec:

$$W_d^T = \sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \cos(\alpha_1) \sqrt{\frac{3}{2}} I_5 \sin(\alpha_5) \cdots \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \sin(n\alpha_n) \quad (\text{III. 29})$$

$$X_d(t) = [1 \cos(4\omega t) \cdots \sin((n-1)\omega t)] \quad (\text{III. 30})$$

$$W_q^T = -\sqrt{\frac{3}{2}} I_1 \sin(\alpha_1) \sqrt{\frac{3}{2}} I_5 \cos(\alpha_5) \cdots \sqrt{\frac{3}{2}} I_n \sin(n\alpha_n) \quad (\text{III. 31})$$

$$X_q(t) = [1 \sin(4\omega t) \cdots \cos((n-1)\omega t)] \quad (\text{III. 32})$$

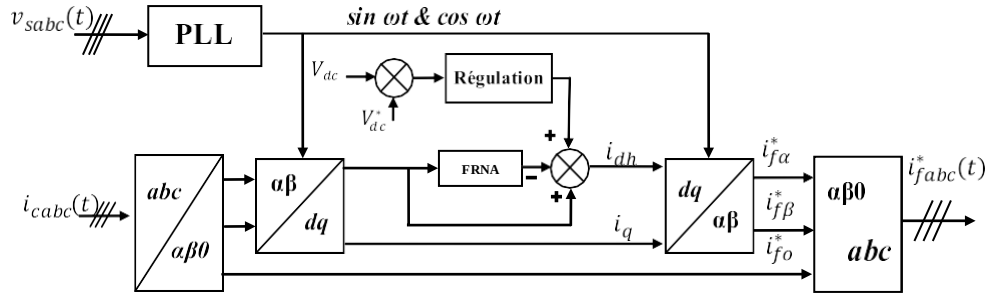


Figure.III.6 : Identification des courants de références avec des Adaline dans le repère dq.

Les vecteurs $X_d(t)$ et $X_q(t)$ sont les entrées des deux Adaline. Les vecteurs W_d^T et W_q^T représentent les poids des Adaline. Le poids $W_{d0}(k)$ du premier réseau Adaline représente l'estimation de la partie continue i_d du courant diphasé i_d suivant l'axe d, et le poids $W_{q0}(k)$ du seconde Adaline représente la composante continue i_q du courant i_q suivant l'axe q.

Les composantes alternatives $\tilde{i}_d$ et $\tilde{i}_q$ représentant les courants harmoniques sur les axes d et q, seront données par les deux équations :

5. Conclusion

Ce chapitre a traité l'identification et la commande du filtre FAP. Trois méthodes à base de réseaux Adaline pour l'extraction des distorsions harmoniques ont été introduites.

La première méthode, appelée méthode directe, est simple et peut facilement être mise en œuvre. Elle travaille sur la transformée de Fourier du signal des courants sur chaque phase.

La deuxième méthode, appelée méthode des puissances instantanées réelle et imaginaire PIRI, travaille dans l'espace p et q et utilise un Adaline à la place du filtre passe bas pour séparer les composantes continues et les composantes perturbatrices des puissances instantanées réelle et imaginaire.

La troisième méthode et la méthode du référentielle synchrone. Dans cette méthode on remplace le filtre passe bas par un réseau Adaline.

Chapitre IV

Simulation du Filtre Actif Parallèle

1- Introduction :

Dans ce chapitre, nous présenterons une étude sur le FAP par simulations sur Matlab/Simulink/SimPowerSystems dans le but de compenser les courants harmoniques.

Dans ces simulations, l'identification sera réalisée par deux méthodes : La méthode par réseau de neurones avec réseau ADALINE et la méthode de puissances instantanées classique. Pour bien examiner les performances de FAP, la charge va subir une variation à $t=0.1$ s. la régulation de la tension du bus continu est faite par PI.

2- Paramètres de simulation :

L'ensemble des paramètres de simulation sont rassemblés dans le tableau suivant :

Réseau d'alimentation					
Paramètres	V_s [v]	F [Hz]	R_s [Ω]	L_s [mH]	L_c [mH]
Valeurs	40.5	50	0.42	3	1

Charge non – linéaire		
Paramètres	R_d [Ω]	L_d [mH]
Valeurs	18	2

Filtre actif parallèle		
Paramètres	L_f [mH]	V_{dc} [v]
Valeurs	1	120

Dans ce travail, le THD est calculé pour les vingt premiers harmoniques. Le nombre de neurones est de 19 et le coefficient d'apprentissage choisi est de 0.001. Le temps de simulation est de 0.2 s. A $t=0.1$ s la charge est doublée.

3- Résultats de simulation

3.1 Sans filtrage

Dans la première partie, nous allons simuler le réseau électrique triphasé à trois fils, ainsi que sa charge non linéaire, sans connecter le FAP, tel que représenté sur la Figure 1.

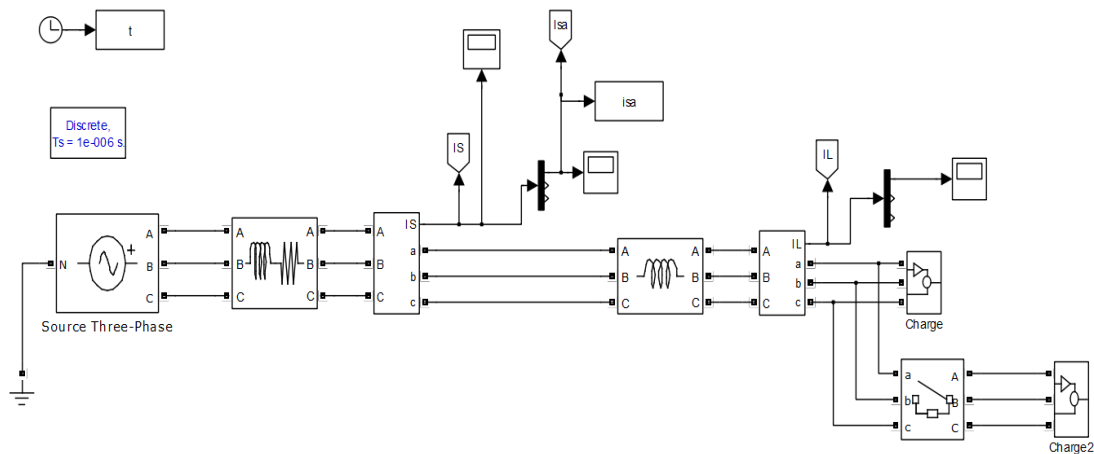


Fig.IV.1 : Schéma de simulation d'une charge non linéaire.

La Figure 2 montre que le courant est non-sinusoïdal. La Figure 3 montre son THD qui est égale à 26.48 %. Ce THD est supérieur au norme IEEE qui est de 5 %.

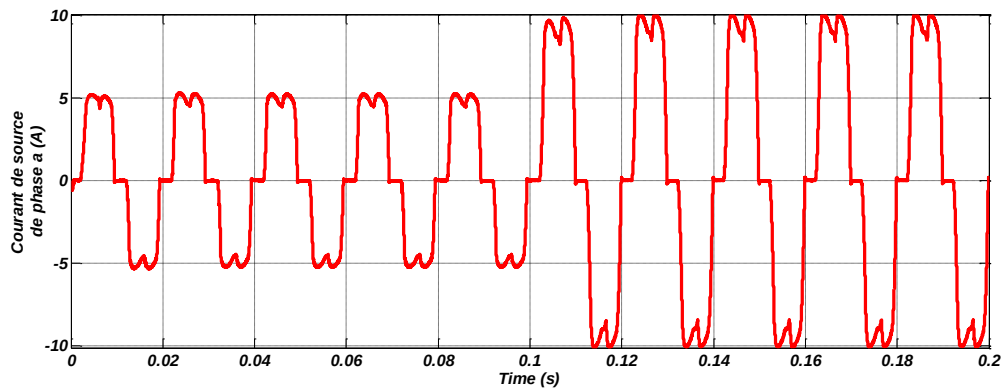


Fig.IV.2 : Courant de source pour la phase a

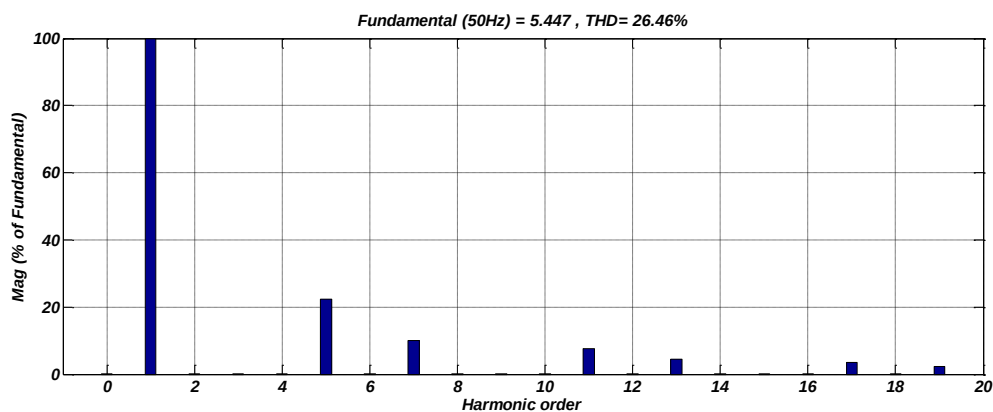


Fig.IV.3 : Spectre d'harmonique du courant de source avant le filtrage.

3.2 Avec filtrage :

Dans la deuxième partie, nous allons simuler le réseau électrique triphasé à trois fils, ainsi que sa charge non linéaire, en connectant le filtre actif en parallèle avec le réseau tel que présenté dans la Figure 4.

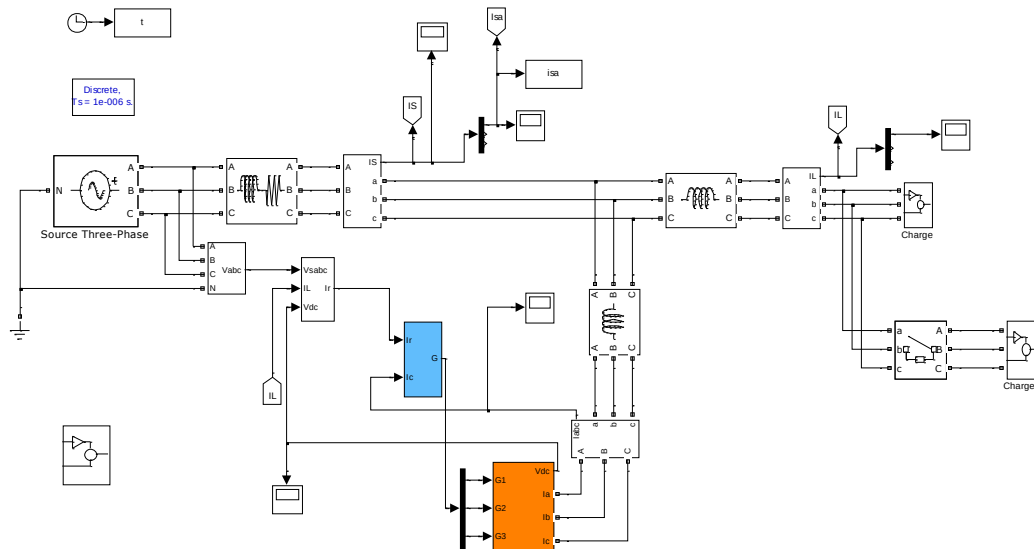


Fig.IV.4 : Schéma de simulation du filtre actif parallèle.

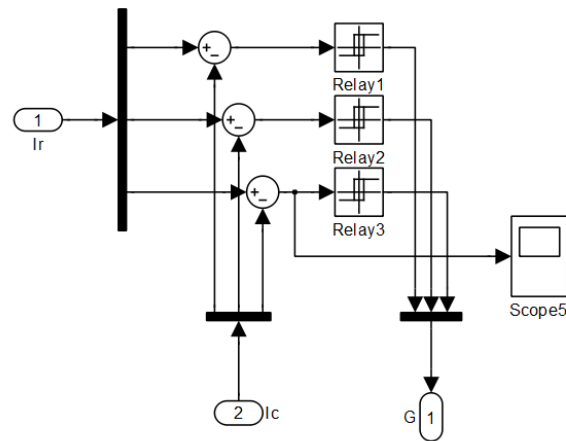


Fig.IV.5 : La Commande par hystérésis

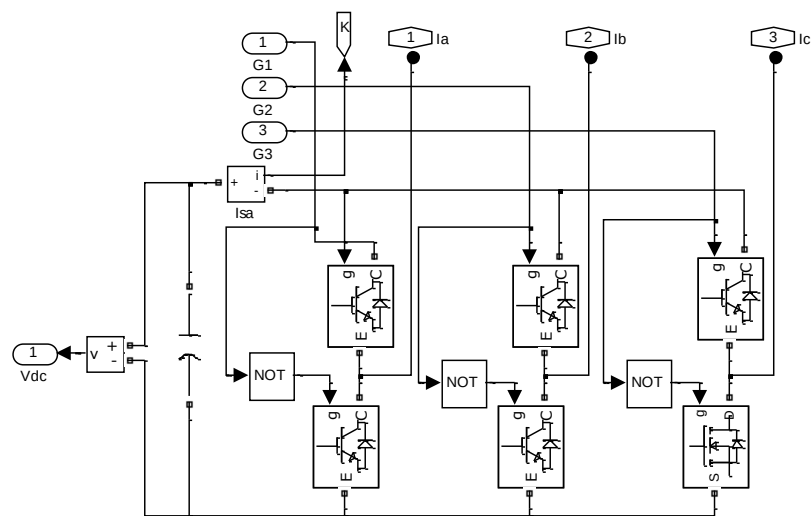


Fig.IV.6 : L'onduleur

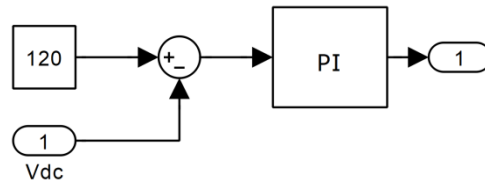


Fig.IV.7 : Schéma de la régulation de V_{dc}

A) Filtrage par réseau de neurones :

La courbe sur la Figure 9 présente le courant de source pour la première phase a. Ce courant de source après la compensation est presque sinusoïdal (Fig.IV.9).

La Figure 10 montre l'analyse spectrale du courant de source pour la première phase a après filtrage. Nous pouvons voir que la valeur du taux de distorsion harmonique est de $THD = 1,28\%$. Ce qui prouve une bonne qualité du filtrage avec FAP.

La régulation de la tension du bus continu par PI (Fig.IV.13) est parfaite. La tension initiale était de 80 V, lors de l'insertion du filtre, la régulation commence et la tension devient égale à la tension de référence = 120 V.

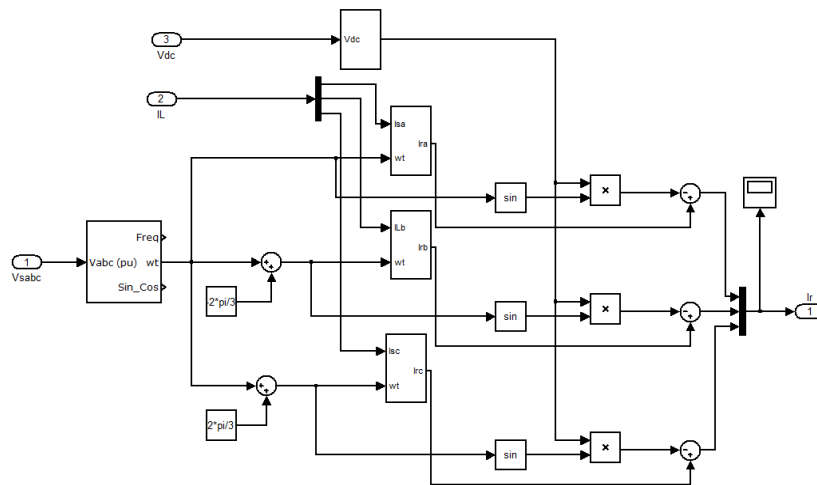


Fig.IV.8 : Schéma de l'identification

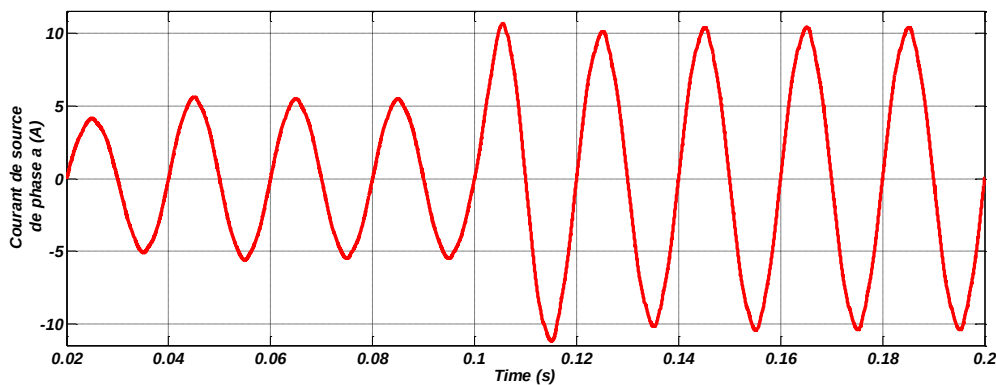


Fig.IV.9 : Courant de source pour la phase a

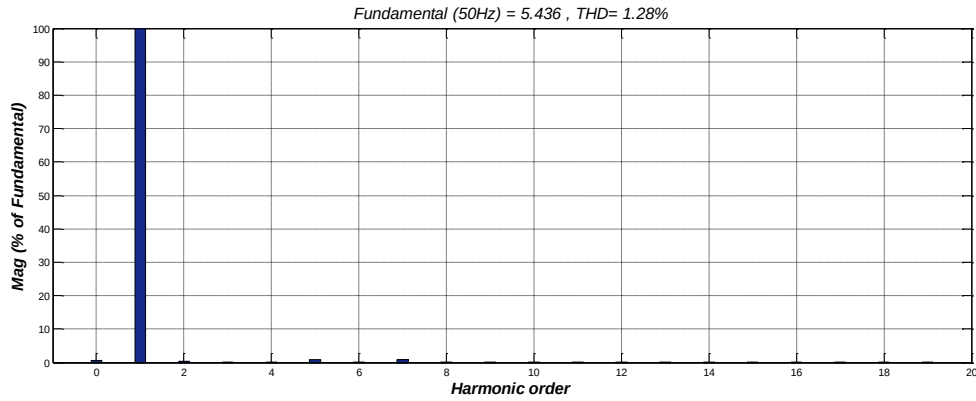


Fig.IV.10 : Spectre harmonique du courant de source après le filtrage

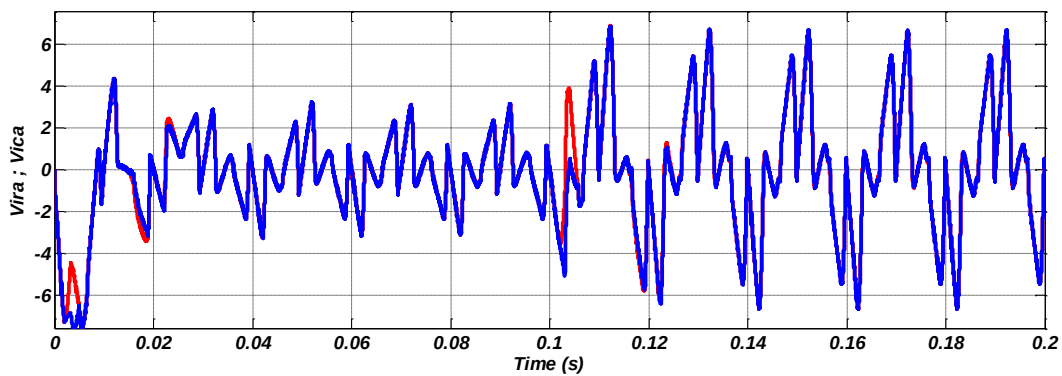


Fig.IV.11 : Courant de référence pour la phase a et Courant injectés par le filtre pour la phase a

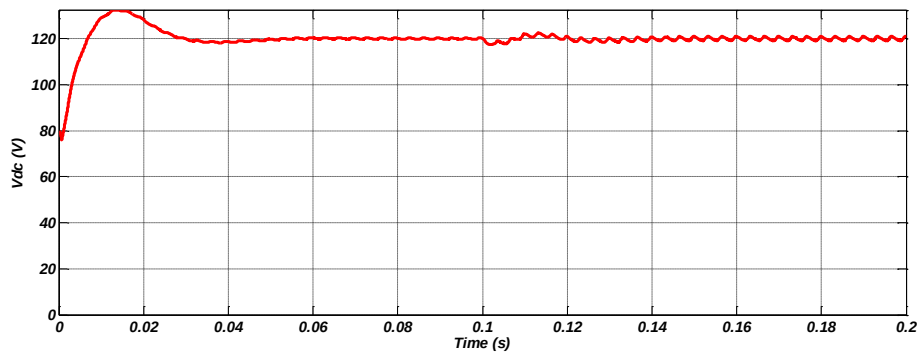


Fig.IV.12 : Régulation de V_{dc}

B) Filtrage par puissances instantanées classique :

La Figure 15 représente la forme d'onde du courant de source après filtre. Son analyse spectrale est dans la Figure 16. On remarque que le courant de source est devenu sinusoïdal. $THD = 1.48\%$ après le filtrage, ce qui prouve une bonne qualité du filtrage avec FAP.

On remarque qu'aussi, le courant du filtre actif suit bien sa référence (Fig.IV.18). La tension du bus continu de l'onduleur est bien régulée à sa valeur de référence avec présente des légères d'ondulations autour de sa référence (Fig.IV.19). Donc le régulateur de tension règle

parfaitement la tension du bus continu, c.-à-d. il assure la tension aux bornes condensateur est presque stable.

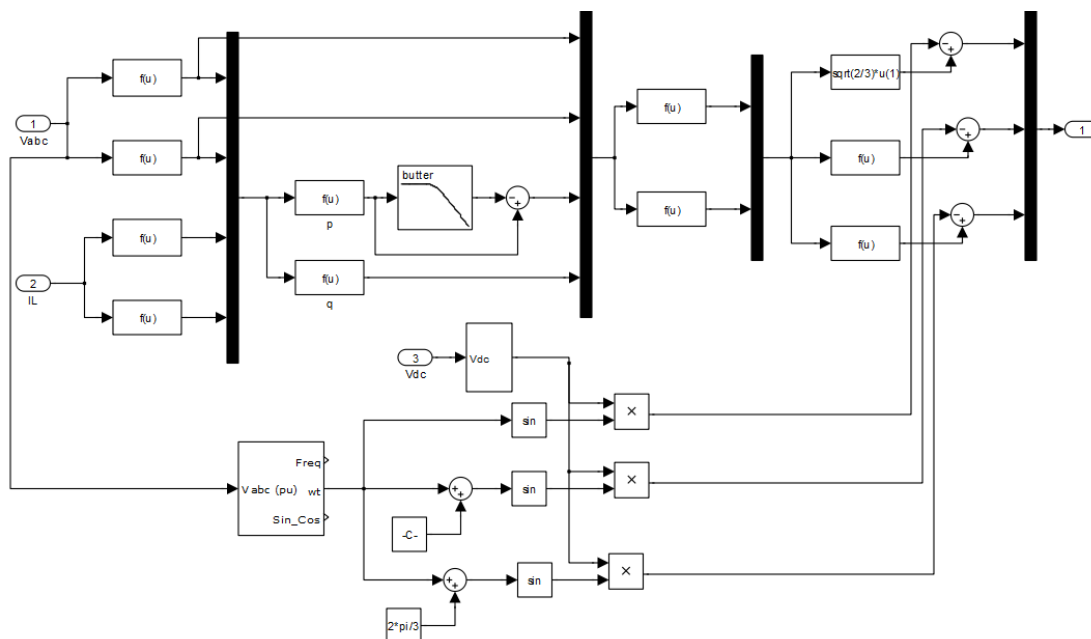


Fig.IV.13 : Schéma de l'identification

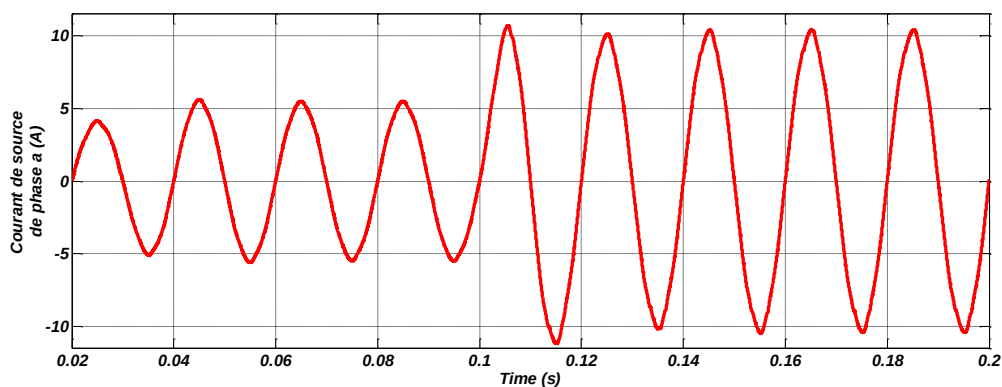


Fig.IV.14 : Courant de source pour la phase a

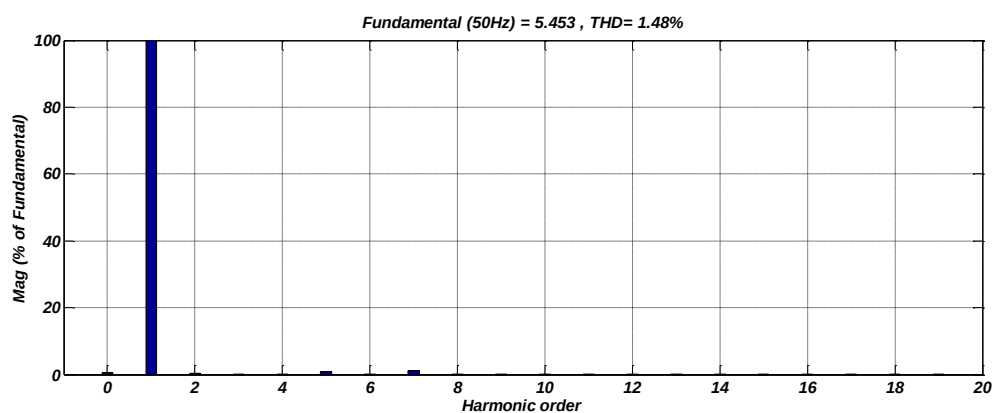


Fig.IV.15 : Spectre harmonique du courant de source après le filtrage

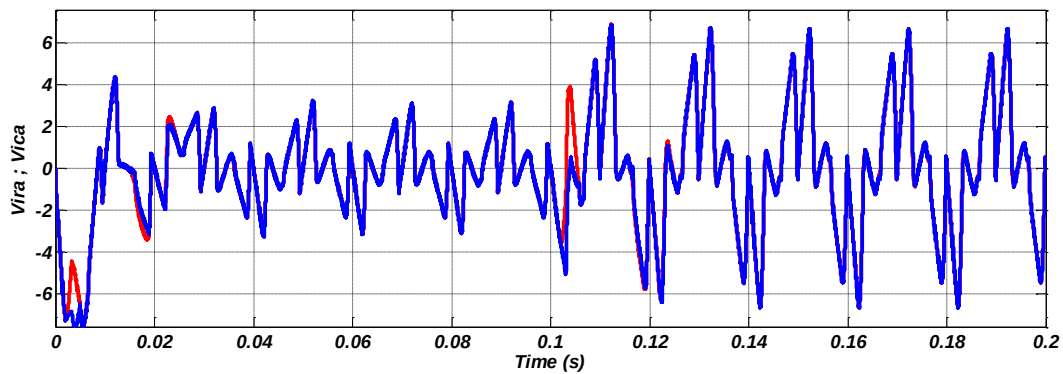


Fig.IV.16 : Courant de référence pour la phase a **et** Courant injectés par le filtre pour la phase a

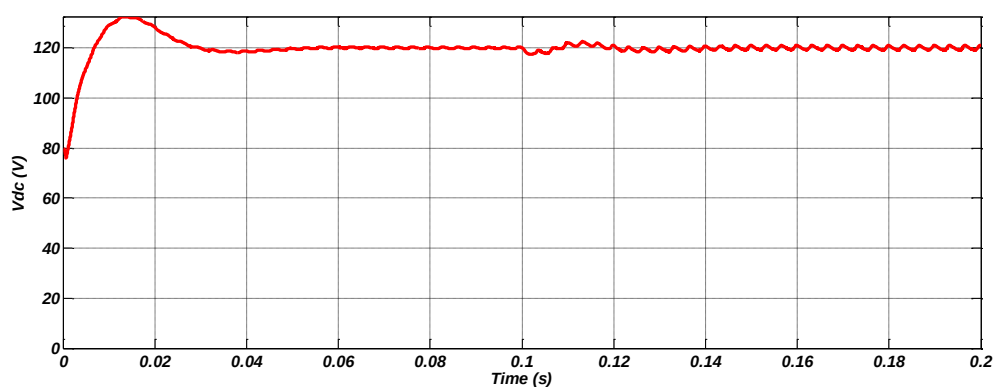


Fig.IV.17 : la régulation de V_{dc}

4- Conclusion

Les résultats des simulations démontrent l'efficacité de la méthode neuronale directe dans l'identification des courants harmoniques comparés avec la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires, ainsi que la rapidité de réponse lors des variations des charges non linéaires. La régulation de la tension du bus continue était parfaite. Ces résultats confirment donc la capacité d'apprentissage et l'excellente adaptabilité des réseaux de type AdaLine.

Conclusion générale

Dans ce travail, une stratégie d'identification des courants harmoniques est présentée. Cette stratégie est basée sur une technique neuronale intelligente qui surmonte les limites des techniques conventionnelles.

Notre étude s'est concentrée sur un onduleur de tension à trois bras qui fonctionne comme un FAP. Cette étude concentre sur trois parties : la première est la détermination des courants de compensation, la deuxième est la génération du signal de commande de l'onduleur et la dernière est la régulation de la tension de bus continue.

Nous avons présenté les différentes origines des perturbations qui affectent les réseaux électriques. Nous avons remarqué que les harmoniques et les changements de tension et de courant affectent les équipements électriques, et pour cette raison nous avons présenté des solutions traditionnelles et modernes pour lutter contre la pollution. Cependant, le filtre actif parallèle est considéré comme la solution la plus pertinente pour supprimer la pollution des réseaux.

Ensuite, nous avons divisé la structure du FAP en deux parties : la partie puissance et la partie contrôle, et nous avons présenté les éléments chaque partie séparément.

Puis, nous avons présenté des méthodes d'identification des courants harmoniques.

Au final, les résultats des simulations effectuées par la méthode neuronale directe et la méthode des puissances instantanée ont confirmé les bonnes performances de ces deux méthodes, et qu'ils s'adaptent aux changements de charge non linéaire au fil du temps. La régulation de la tension a été parfaite par PI.

Ce travail a permis d'envisager des perspectives et d'orientations futures :

- D'autres techniques d'intelligence artificielle peuvent être appliquées.
- Ce concentrer sur les perturbations engendrées par l'onduleur, leurs importances, leurs causes et la possibilité de les compenser.
- De plus, d'autres types de compensateur actif (filtre actif série, la combinaison parallèle série actifs UPQC) commandés avec les techniques intelligentes peuvent être utilisés pour compenser d'autres types de perturbations.

Bibliographie

- [1] M. A. E. Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension » (Automatisation des systèmes de puissance électriques). Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2002.
- [2] D. Ould Abdeslam, « Techniques Neur mimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension ». Thèse de doctorat, université Haute-Alsace, Décembre 2005.
- [3] M. Boudjedaim, « Commande d'un onduleur par des approches basées sur des réseaux de neurones artificiels ». Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Tizi ouzou, 2009.
- [4] S. Guffon, « Modélisation et commandes a structure variable de filtres actifs de puissance ». Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000.
- [5] T. Gouraud, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ». Thèse de doctorat, université de Nantes, janvier 1997.
- [6] E. Bettega, J.N. Fiorina, « Harmoniques : convertisseurs propres et compensateurs actifs ». Cahier Technique Schneider Electrique n°183, édition janvier 2000.
- [7] Electric Economics: Regulation and Deregulation Geoffrey Rothwell and Tomas Gomez.
- [8] Electric Power Systems: Analysis and Control, Fabio Saccomanno.
- [9] N. Bryant, Etude et commande généralisée de filtres actifs parallèles : Compensation globale ou sélective des harmoniques : Régime équilibré ou déséquilibré. Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 1999.
- [10] Farid Hamoudi, " Commande Robuste D'un Filtre Actif Shunt A Quatre Fils", Thèse Doctorat De L'Université EL Hadj Lakhder Batna, 2008.
- [11] M.A. Alali, « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », thèse de doctorat en Automatisation des systèmes de puissance électriques, université de Louis Pasteur – Strasbourg I, 12 Septembre 2002.
- [12] P. Ladoux, G. Ollé, " Compensateur D'harmoniques Et De Puissance Réactive", Publication RESELEC 2002.
- [13] Mohammed Alaa Eddin Alali, "Contribution A l'Etude Des Compensateurs Actifs Des Réseaux Electriques Basse Tension", Thèse Doctorat De L'universite LOUIS PASTEUR – SATRASBOURG, 2002.
- [14] T. Ghennam, "Etude Et Réalisation D'un Compensateur Actif De Puissance Commandé Par DSP", Thèse De Magister, EMP, 2005.

- [15] Zellouma Laid, " Filtrage Actif Parallèle Des Harmoniques Du Courant Générés Par Un Pont Redresseur Triphasé Non Commandé ", Mémoire Magistère Université ANNABA, 2006
- [16] A. Ben Amar, « Commande par Réseaux de Neurones Artificiels d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé ». Mémoire doctorat en sciences, Université d'El-Oued, 2022
- [17] M. Boudjedaimi, P. Wira, D. Ould Abdeslam, S. djennoune et J. -P. Urban, « Voltage Source Inverter Control with Adaline Approach for the Compensation of Harmonic Currents in Electrical Power Systems ». 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON08), Orlando, FL, USA, 2008, PP. 2708-2713