

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIESDOMAINE : SCIENCES ET TECHNOLO TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUEFILIERE : électrotechnique

N° : ER-06



OPTION : énergie renouvelable

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par:**  
**Deloum Samira**  
**Heraiz Yousra**

**Intitulé**

**Amélioration de la qualité d'énergie électrique en  
utilisant un filtre hybride**

**Soutenu devant le jury composé de:**

Dr.	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Dr. DJAZIA Kamel	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Dr.	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2019/ 2020**

# **REMERCIEMENT**

*Le grand remerciement revient à dieu .qui nous a donne la force et le courage  
de pouvoir fermier ce travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur Dr djazia Kamel pour son soutien et  
son aide à l'élaboration de cette étude. Ainsi que tout les profs à  
L'Université de MOHAMED BOUDIAF-M'SILA.*

*Et Mes meilleurs amis pour leurs conseils et surtout leur compréhension.*

*Sans oublier tous ceux qui nous ont aidés et encouragés de prés ou de loin à la  
réalisation de Ce travail.*

# **Dédicaces**

*Je dédie ce travail à:*

*Ma famille pour ses encouragements, et en particulier Ma Mère qui a été mon  
ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie  
à m'encourager et a Mon Père bien sur*

*A mes frères et à ma sœur et leur fille «RAHAF»*

*Et ma fiancer "zaituni lahcen "*

*Mes chaleureux remerciements vont à tous et toutes mes camarades et  
collègues de notre promotion de master pour les beaux moments.*

*A mon prof de première «Maki Belkessam »*

*A tous ceux que j'aime*

*Que dieu les gardes et les protège.*

**D.SAMIRA**

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à:*

*Ma famille pour ses encouragements, et en particulier Ma Mère qui a été mon ombre durant toutes les années des études, et qui a veillé tout au long de ma vie à m'encourager et a Mon Père bien sur*

*A mes frères et à mes sœurs*

*Mes chaleureux remerciements vont à tous et toutes mes camarades et collègues de notre promotion de master et surtout " Marwa, Amal, Basma, manal, Chaima, Imane daloula nour Manel oum jan" pour les beaux moments.*

*A tous ceux que j'aime*

*Que dieu les gardes et les protège. H. Yousra*

ملخص :

ان التطورات الاخيرة التي ظهرت على عدة ميادين ادت الى زيادة استعمال الطاقة الكهربائية خاصة في ميدان الالكترونك الاستطاعة (القوة) الشيء الذي ادى الى تسبب في تدهور نوعية موجة التيار الكهربائي , بسبب ظهور و تضاعف تواجد التوافقات في شبكة النقل وتوزيع الطاقة الكهربائية و بالتالي افساد و تعطيل بعض الاجهزة المربوضة بالشبكة و ازدياد استهلاك الطاقة الغير فعالة .

بما ان معظم التوافقات مصدرها يكمن في الاستعمال المتزايد لتلك الاجهزة الملوثة فان مكافحتها تعود الى ارغام مستعمليها على اتخاذ اجراءات لتخفيض و تقليص نسبة هذه التوافقات الى ما هو مقبول من طرف المعايير الدولية . هناك عدة طرق من اجل التخلص من هذه التوافقات , استعمال المصفاة (FILTRE) الغير فعالة و المصفاة الفعالة حيث ان هذه الاخيرة تعتبر الامثل و الارجح .

قمنا في دراستنا هذه بشرح طريقة عمل كل من المصفاة الغير الفعالة واستعراض انواع منها كما قمنا بدراسة المصفاة الفعالة المتوازية من اجل الحصول على التيارات المرجعية استخدمنا طريقة التيارات الكهربائية . لهذا استعملنا برنامج (MATLAB) .

### Résumé :

Les récents développements apparus dans plusieurs domaines de l'utilisation de l'énergie électrique surtout dans le domaine de l'électronique de puissance, ont causée de la détérioration de la qualité de l'onde de courant fournie, en raison de l'apparition de harmoniques dans le réseau de transport et de distribution de l'énergie électrique, ayant ainsi des effets néfastes sur les charges sensibles alimentées par ce même réseau. Puisque la présence de ces harmoniques est due à l'utilisation croissante de ces appareils pollués, leur traitement donc revient à exiger aux consommateurs pollués de réduire à des valeurs acceptables les taux des harmoniques qu'ils injectent dans le réseau. Plusieurs solutions adoptées pour l'élimination de ces harmoniques : le filtrage passif et le filtrage actif. L'utilisation du filtre actif est la plus efficace et la plus appropriée. Dans ce travail nous avons abordé le principe de fonctionnement du filtre passif. Nous avons examiné les deux types de ce filtre : filtre passif résonnant, filtre passif amorti. En deuxième partie nous avons traité le redresseur MLI à absorption sinusoïdale et le filtre actif parallèle.

Pour le filtre actif shunt deux méthodes d'identification des courants perturbateurs sont présentées : méthode des courants et méthode des puissances instantanées. Pour la régulation du courant nous avons utilisé les deux méthodes, qui sont la commande MLI sinus triangle et la régulation par hystérésis. Les résultats de simulation sont obtenus en utilisant logiciel matlab.

## Sommaire

			<b>Sommaire</b>	
			<b>Liste des figures &amp; tableaux</b>	
			<b>Introduction Générale</b>	
<b>Chapitre I : LES PERTURBATIONS DES RESEUX ELECTRIQUES ET SOLUTIONS DE DEPOLLUTIONS</b>				
			I.1. Introduction	11
			I.2 Les perturbations électriques	11
			I.2.1 Creux et coupure de tension	11
			I.2.2 Variation des fréquences	12
			I.2.3 Fluctuation de tension	12
			I.2.4 Déséquilibres de système triphasé de tension	13
			I.2.5 Perturbations harmoniques en courant et en tension	13
			I.2.5.1 Harmoniques	13
			a) Déformation du signal périodique	14
			b) Origines des harmoniques	14
			c) Effets des harmoniques	14
			I.2.5.2 Conséquences des harmoniques	14
			I.3 solutions de dépollution des réseaux électrique	16
			I.3.1 Solutions traditionnelles	16
			1-Stato compensateur	16
			2- Filtre passif	16
			I.3.2 Solutions modernes	17
			I.4 conclusion	18
			<b>Chapitre II. stratégie de commande des filtres actifs</b>	19
			II.1. Introduction	20
			II.1.Filtre actif Parallèle a structure tension.	20
			II.1.1.Filtre de découplage	22
			II.2. principe de commande du filtre actif	22
			II.2.1 Détermination des courants harmonique de référence.	23
			II.2.1.1Méthode des puissances instantanées et sa variante	23
			II.2.2 Stratégie de commande de l'onduleur du filtre actif	27
			II.2.2.1 Contrôle par MLI	28
			II.2.2.2conventionnel par hystérésis	28
			II.2.2.3 Contrôle par hystérésis modulée	29
			II.2.3 Régulation de la tension continue	32
			II.3.Conclusion	32
			<b>Chapitre III :</b>	33
			<b>Filtre actif parallèle hybride (FAPH)</b>	
			III. Introduction	34
			III.1.Structure générale du FAPH	35
			III .2. stratégies de commande du FAPH	36
			III .3. Commande en puissance du FAPH	36
			III.3.1- Boucle de régulation du courant du FAPH	39

			III.3.2. Boucle de régulation du bus continu	41
			III .3.3 La PLL classique	42
			III.4. Schéma de simulation	43
			III .4 .1 Résultats de simulation	43
			A/ Régime Permanent	44
			B/Etude Dynamique	48
			III.5 .Conclusion	52
			Conclusion Générale	54
			Références	55
<b>Liste des figures &amp; tableaux</b>				
			Figure I.1 Creux et coupure de tension	12
			Figure I.2 variation de fréquence.	12
			Figure I .3 La fluctuation de la tension.	13
			Figure I .4 Déséquilibres de système triphasé de tension	13
			Figure I.5 : Onde déformé et sa décomposition	14
			Figure (I .6 . A.) Filtre passif résonant et B. Filtre passif amorti.	17
			Fig. II.1. Structure générale d'un filtre actif parallèle.	20
			Fig. II.2. Filtre actif à structure tension.	21
			Tab. II.1. Tensions en sortie de l'onduleur.	22
			Fig. II.3. Système à étudier.	23
			Fig. II.4. Détermination des courants de référence du filtre actif par la méthode classique des puissances active et réactive instantanées	24
			Fig. II.5. Deux types classiques de filtres d'extraction de la composante harmonique.	24
			Figure II. 6 principe du FMV	25
			Fig. II.7. Détermination des courants de référence du filtre actif à l'aide de FMV	26
			Figure. II.8. Principe de la commande par MLI.	28
			Figure. II.9. Commande conventionnelle par hystérésis.	29
			Figure. II.10. Commande par hystérésis modulée	29
			Figure II 11. Exemples de l'effet des paramètres de commande ( $A_{tr}$ , $B_h$ ).	30
			Figure. II.12. Détermination des paramètres ( $A_{tr}$ , $B_h$ ).	31
			Figure III.1 Structure générale du FAPH	35
			Figure III.2 Schémas équivalent de la phase	37
			Figure III. 3:Types de Filtres d'extraction de la composante alternative	38
			Figure III.4 Schéma équivalent par phase du filtre de couplage	39
			Figure III. 5 : Boucle de régulation des courants du FAPH	40
			Figure III .6 : Régulation de la tension $V_{dc}$ du bus continu.	41
			Figure III. 7 : Schéma de PLL classique	42
			Figure III. 8 :Schéma de simulation du FAPH par matlab	43
			Tableau III.1 Les Paramètres de simulations du FAPH	44
			Figure III.9 : Forme d'onde de la tension de source $V_{sa}$ en régime permanent	45
			Figure III. 10 : Forme d'onde du courant de la charge $I_{cal}$ en régime	45

			permanent	
			Figure III. 11: Forme d'onde du courant de la source $I_{sa1}$ en régime permanent	46
			Figure III. 12: Forme d'onde du courant du filtre $I_{fa1}$ en régime permanent	46
			Figure III.13: Forme d'onde du la tension du bus continu $V_{dc}$ en régime permanent	47
			Figure III. 14: Forme d'onde du courant et tension du source $I_{sa}, V_{sa}$ en régime permanent	47
			Figure III. 15: Forme d'onde de la tension de la source $V_{sa1}$ en régime dynamique	48
			Figure III. 16: Forme d'onde du courant du charge $I_{ca1}$ en régime dynamique	49
			Figure III. 17: Forme d'onde du courant du source $I_{sa1}$ en régime dynamique	49
			Figure III. 18: Forme d'onde du courant du filtre $I_{fa1}$ en régime dynamique	50
			Figure III. 19: Forme d'onde du tension du filtre $V_{dc}$ en régime dynamique	50
			Figure III. 20: Forme d'onde du courant et du tension de source en régime dynamique	51

# ***INTRODUCTION GENERALE***

## INTRODUCTION GENERALE :

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels (utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...), tertiaire (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (Téléviseurs, appareils électroménagers grand public,...).

La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements.

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent :

- la réduction de l'impédance de court-circuit,
- la modification du convertisseur statique polluant en termes de la topologie et/ou de la commande afin d'intervenir directement à la source des perturbations harmoniques,
- les dispositifs de filtrage.

L'utilisation de dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs dits résonnants et/ou amortis peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive. Cependant, le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau. Ainsi, cette solution présente un inconvénient majeur qui peut être intolérable dans ces circonstances particulières.

Une autre solution consiste à mettre en œuvre un filtrage actif afin d'éviter les inconvénients des filtres passifs. Une première solution consiste à connecter le filtre actif en parallèle avec le système polluant : ainsi, il injecte au réseau un courant de même amplitude que celle du courant harmonique à éliminer mais en opposition de phase. Une seconde approche consiste en

la connexion du filtre actif en série avec le réseau : il se comporte alors un générateur de tension qui impose une tension harmonique telle que, additionnée à celle du réseau, la tension au point de connexion soit rendue sinusoïdale.

## **Chapitre I**

### **LES PERTURBATIONS DES RESEUX ELECTRIQUES ET LES SOLUTIONS DE DEPOLUTIONS**

## **I.1.Introduction :**

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients et utilisateurs une énergie de bonne qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales constituant un réseau triphasé équilibré. La qualité de cette énergie dépend de celle de la tension aux points de raccordement. Toutefois, cette tension subit généralement des perturbations et des altérations durant son transport jusqu'à son arrivée chez le client industriel ou particulier. Les origines de ces altérations sont nombreuses ; outre les incidents relatifs à la nature physique et matérielle des organes d'exploitation du réseau, il existe aussi des causes intrinsèques spécifiques au fonctionnement de certains récepteurs particuliers. Afin d'éviter le dysfonctionnement, la destruction des composants du réseau électrique, il est indispensable de comprendre l'origine de ces perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer. Pour cela ce présent chapitre va aborder les différents types de perturbations et leurs effets néfastes sur la qualité de l'énergie électrique, ensuite le filtre passif est proposé comme une solution, parmi celles qui existent dans la littérature.

## **I.2 Les perturbations électriques :**

Sauf exception, les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 Hz.les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants :

- La fréquence
- L'amplitude des trois tensions
- La forme d'onde, qui doit être la plus sinusoïdale possible
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et leur déphasage relatif.

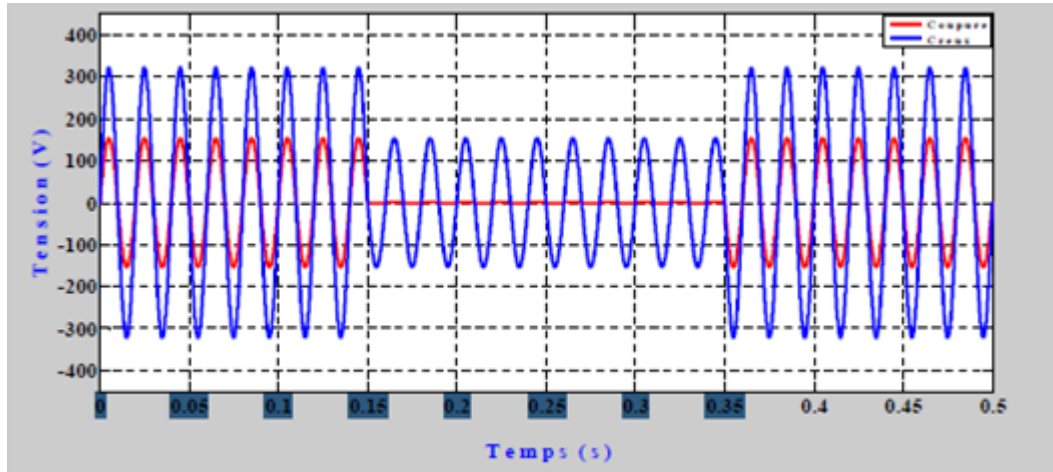
La qualité de la tension peut être aussi affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux obstacles liés à l'exploitation du réseau, soit de certains récepteurs non linéaires. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbation.

### **I.2.1 Creux et coupure de tension :**

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale [01] [02] pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation des réseaux électriques. Ils apparaissent également lors de manœuvre d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, est). Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur

supérieure à 90% de la tension nominale, disparition totale pendant une durée comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves, supérieur à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms.

La figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension. [01] :

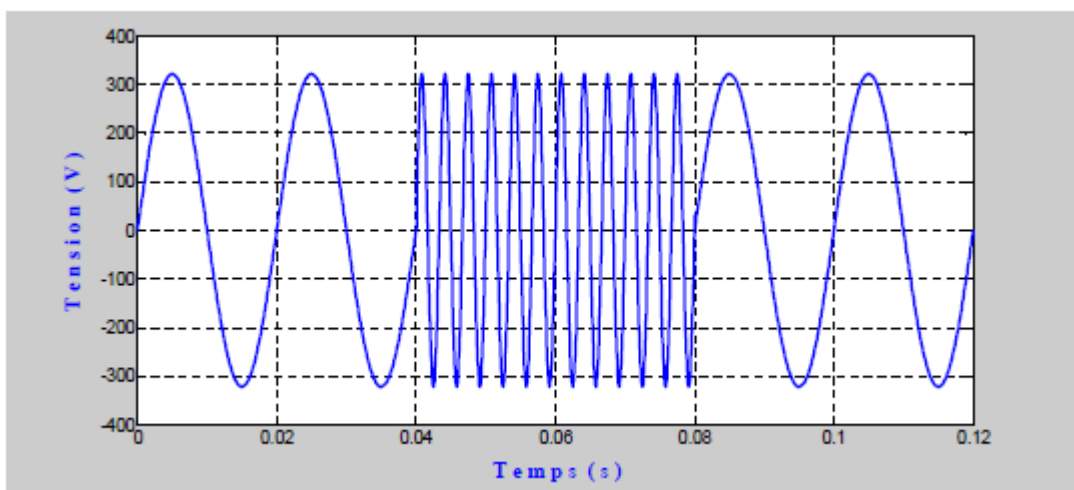


**Figure I.1 Creux et coupure de tension**

**Conséquences:** Perturbation ou arrêt du procédé, pertes de données, données erronées, ouverture de contacteurs, verrouillage de variateurs de vitesse, ralentissement ou décrochage des moteurs et extinction de lampes à décharge [03].

### I.2.2 Variation des fréquences.

Une variation sensible de la fréquence de réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique, comme le montre la figure I.2. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles comme dans le cas de certains défauts graves sur les réseaux. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50\text{Hz} \pm 1\%$ . [01]

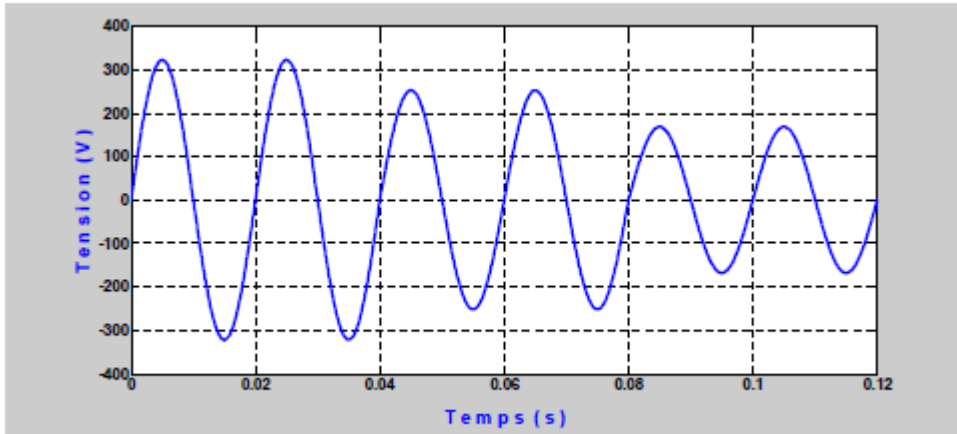


**Figure I.2 variation de fréquence.**

### I.2.3 Fluctuation de tension :

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension située dans une bande de

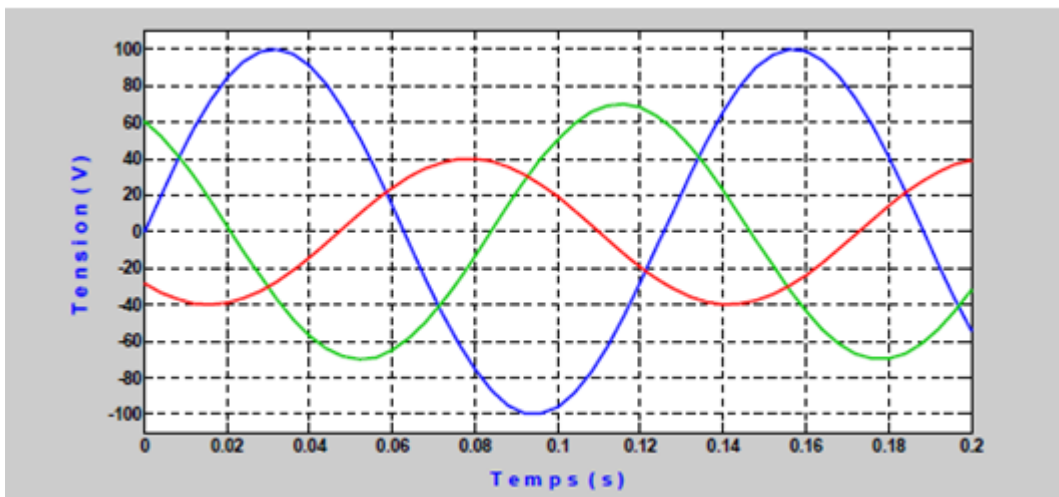
10% est se produisent sur un intervalle de temps de quelque centième de seconde. Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courant d'appel important. L'origine principale de ce courant et le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant un gêne visuel perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.3. [01].



**Figure I.3 La fluctuation de la tension.**

#### **I.2.4 Déséquilibres de système triphasé de tension :**

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalés d'un angle  $120^\circ$  les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure I.4. Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. [01]



**Figure I.4 Déséquilibres de système triphasé de tension**

**Conséquences:** Couples moteurs inverses (vibrations) et sur-échauffement des machines électriques [03]

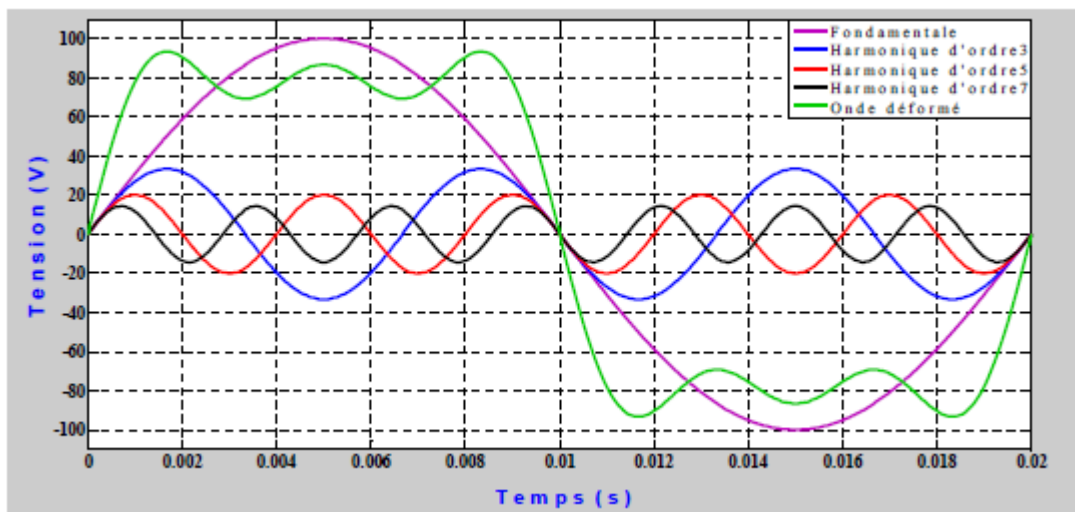
#### **I.2.5 Perturbations harmoniques en courant et en tension :**

##### **I.2.5.1 Harmoniques :**

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc, inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.)[04]. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. Le passage de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau [05][03].

**a) Déformation du signal périodique :**

Un signal déformé est dû principalement à la superposition des harmoniques sur la composante fondamentale. Les signaux illustrés sur la figure I.5, montrent l'effet des harmoniques d'ordre 3,5 et 7 sur le fondamental de la tension.



**Figure I.5 : Onde déformé et sa décomposition**

**b) Origines des harmoniques :**

L'augmentation sensible du niveau de la pollution harmonique du réseau électrique est une conséquence de la prolifération des convertisseurs statiques .En effet, ces convertisseurs sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques .Ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peuvent entrainer des tensions harmoniques aux points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau électrique. [06]

**c) Effets des harmoniques :** On distingue deux sortes d'effets possibles :

- **Les effets quasi instantanés :** sur certains types d'appareillage, tels que l'électronique de puissance, calculateurs, relais, systèmes de contrôle et régulation, etc., la présence des harmoniques sur les signaux provoque le déplacement du passage par zéro et des modifications de la valeur de crête de l'onde [03].
- **Les effets à terme :** dans les machines tournantes, les transformateurs et les condensateurs, ils se manifestent par des échauffements supplémentaires, ce qui entraîne la destruction du matériel ou plus fréquemment une diminution de leur durée de vie par surcharge thermique. [03][07].

### I.2.5.2 Conséquences des harmoniques :

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont :

- L'échauffement des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires.
- L'interférence avec les réseaux de télécommunication, causée par le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants.
- Les défauts de fonctionnements de certains équipements *électriques* comme les dispositifs de commande et de régulation, tout appareil dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro des grandeurs électriques (appareils utilisant la tension comme référence) peut être perturbé.
- Le phénomène de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par des inductances du transformateur et des câbles sont normalement élevées. Ce n'est pas le cas lorsque des batteries de capacité sont raccordées au réseau pour relever le facteur de puissance, les fréquences de résonance peuvent devenir assez faibles, et coïncider ainsi avec celles des harmoniques engendrés par les convertisseurs statiques. Dans ce cas, il y aura des phénomènes d'amplification d'harmoniques qui peut détruire les équipements raccordés.

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Le THD et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de la puissance réactive.

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

$$THD = \sqrt{\sum_2^{\infty} \frac{X_h^2}{x_1^2}} \quad (I.1)$$

Où  $X_h$  représente la composante harmonique de rang  $h$ ,  $X_1$  représente la composante fondamentale. En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500Hz, ce qui correspond au domaine des perturbations basses fréquences au sens de la normalisation. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes.

- **le facteur de puissance FP :** En présence des harmoniques, la puissance apparente  $S$  est composée de trois parties : active  $P$ , réactive  $Q$  et déformante  $D$ . Son expression est donnée comme suit :

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

La puissance déformante  $D$  est due aux harmoniques de courant avec :

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

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

Le facteur de puissance FP est égal au quotient de la puissance active  $P$  par la puissance apparente  $S$  :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{(P^2+Q^2+D^2)}} \quad (I.4)$$

De cette équation, le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1. De plus :

$$FP = 3V \cdot I_{c1} \cdot \cos\varphi. \quad (I.5)$$

On aura donc :

$$FP = \frac{I_{c1}}{I_C} \cdot \cos\varphi = F_{dis} \cdot \cos\varphi \quad (I.6)$$

Où  $F_{dis}$  représente le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et  $\varphi$  représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

### I.3 solutions de dépollution des réseaux électrique :

Pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, deux types de solutions sont envisageables. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions s'intéresse à la conception tandis que la seconde consiste à compenser les courants ou les tensions harmoniques [7]. Deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations peuvent être distingués : les solutions traditionnelles et les solutions modernes [8, 9].

#### I.3.1 Solutions traditionnelles :

Il s'agit notamment de mettre en œuvre les moyens suivants :

**1. Statu compensateur :** il s'agit d'une méthode de compensation utilisée pour relever le facteur de puissance.

**2. 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. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau figure (I.6.A) Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre figure (I.6.B) est préférable.

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. Malgré sa large utilisation dans l'industrie, ce dispositif simple à tout de même porte certains inconvénients :

- une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire.
- les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre.
- le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonnance sont amplifiées.
- Equipement volumineux.
- Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

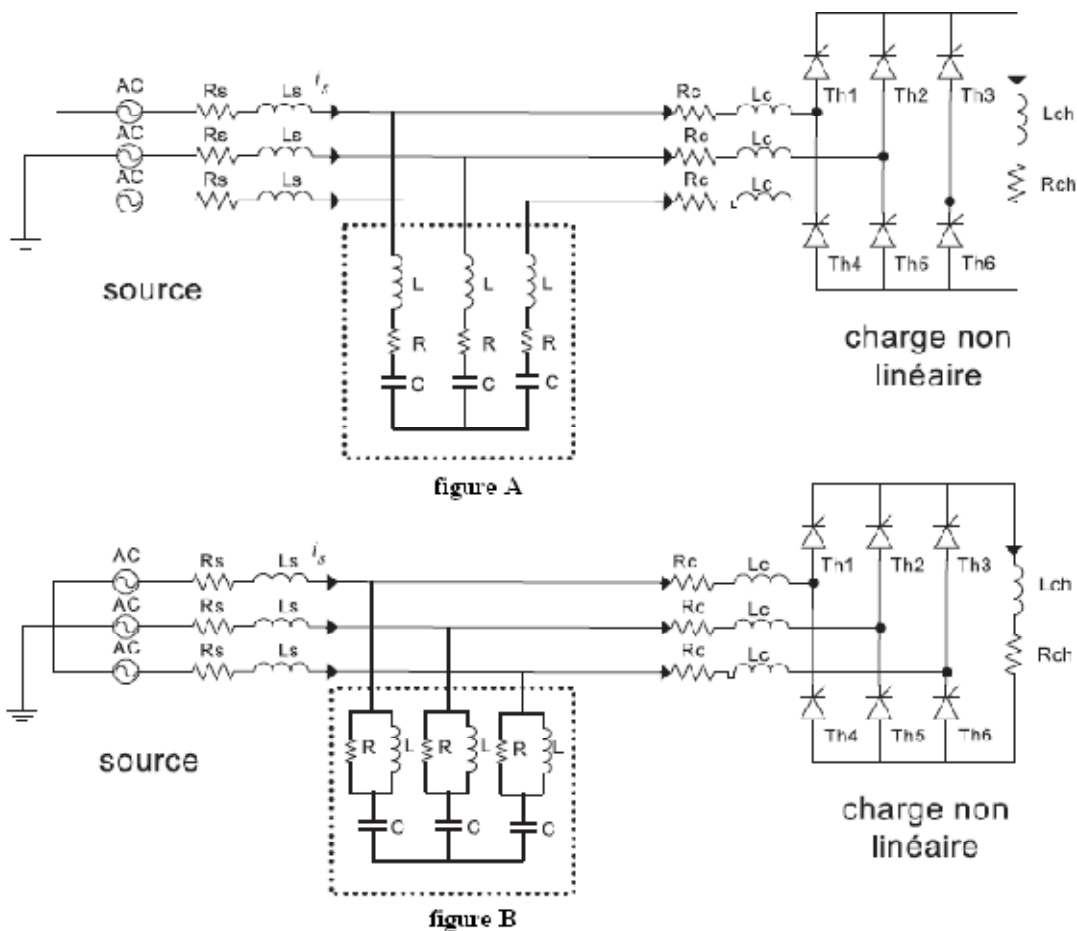


Figure (I.6 . A.) Filtre passif résonant et B. Filtre passif amorti.

### I.3.2 Solutions modernes :

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Nous citerons trois topologies possibles de filtres actifs :

- ✓ Le filtre actif parallèle (FAP).
- ✓ Le filtre actif série (FAS).
- ✓ Le filtre actif hybride.

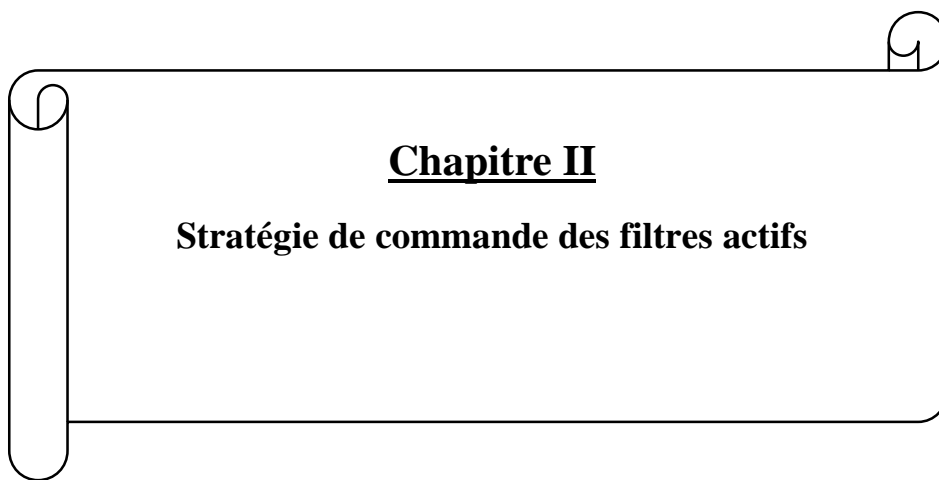
Il faut noter l'existence de plusieurs autres combinaisons mixtes de filtres actifs, cette fois-ci avec les filtres passifs. Ces structures sont conçues dans le but d'optimiser le rapport performance/coût. On peut citer trois configurations :

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

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques [8, 9].

#### **I.4 conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes origines des perturbations harmoniques affectant la qualité d'onde des tensions et/ou courants du réseau électrique ainsi que leurs effets néfastes sur les équipements électriques installés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Ainsi et afin de diminuer ces perturbations harmoniques et rendre le réseau non pollué, le développement des systèmes de compensation adaptatifs est favorisé. La suite de ce mémoire sera consacrée à l'étude théorique du filtre actif parallèle à structure tension (solution moderne), en vue d'une compensation globale des harmoniques de courant pour un système triphasé trois fils.



**Chapitre II**  
**Stratégie de commande des filtres actifs**

## Introduction :

Depuis quelques années, le filtrage actif fait l'objet de nombreux travaux de recherche afin de compenser les courants harmoniques générés par les charges polluantes connectées aux réseaux électriques. La figure II.1 rappelle la structure générale d'un filtre actif parallèle. Ce filtre peut être décomposé en deux parties: la partie puissance et la partie commande [10]. La première comporte un onduleur, un filtre de découplage et une source de stockage d'énergie. Ces deux derniers éléments déterminent la nature du filtre actif (structure tension ou courant), suivant qu'il est réalisé à l'aide d'un onduleur de tension ou de courant.

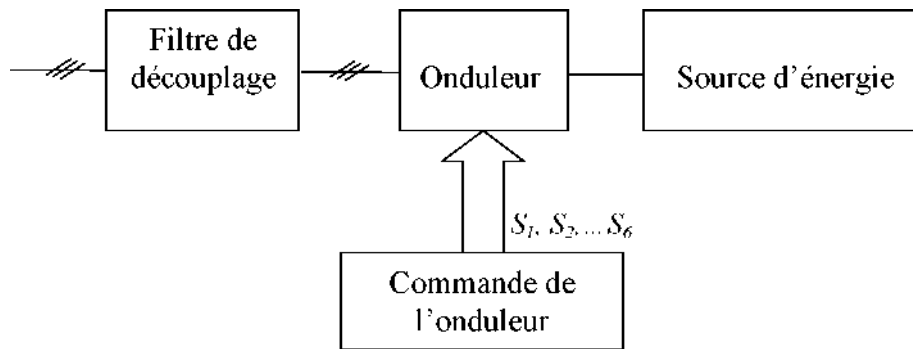


Figure. II.1. Structure générale d'un filtre actif parallèle.

Nous distinguons donc deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Dans cette étude, théorique et expérimentale, nous nous intéressons uniquement au filtrage actif parallèle à structure tension. Nous allons présenter successivement :

- ✓ la structure générale du filtre actif parallèle de type tension
- ✓ une variante de la méthode des puissances active et réactive instantanées, développée au sein de notre laboratoire. Cette nouvelle méthode permet d'identifier les courants harmoniques de référence et met en œuvre des filtres sélectifs dits « multi-variables ».
- ✓ l'intérêt d'utiliser des FM  $V_s$ ,
- ✓ le contrôle du filtre actif par trois types de commandes, hystérésis, hystérésis modulée ou MLI pour la génération des courants de référence, le comportement du filtre actif en régime transitoire.

### II.1. filtre actif parallèle a structure tension :

La figure II.2 présente le filtre actif à structure tension où l'onduleur de tension est connecté en parallèle sur le réseau via un filtre de découplage ( $L_f$ ,  $R_f$ ). La capacité  $C$  se comporte comme une source de tension continue. La tension  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur doit être positive et maintenue constante par la commande. Ses fluctuations doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant. Ils sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension,
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mise en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs. Antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs. .

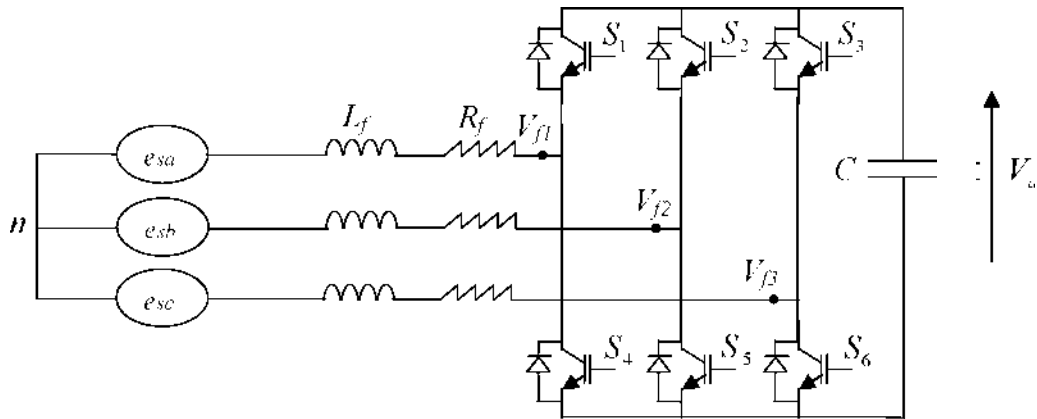


Figure. II.2. Filtre active à structure tension

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. II.2 dépendent de l'état de trois signaux de commande (T1, T2, T3), définis ci-dessous :

- $S_1$  fermé et  $S_4$  ouvert
- $S_4$  fermé et  $S_1$  ouvert
- $S_2$  fermé et  $S_5$  ouvert
- $S_5$  fermé et  $S_2$  ouvert
- $S_3$  fermé et  $S_6$  ouvert
- $S_6$  fermé et  $S_3$  ouvert

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  $T1$ ,  $T2$  et  $T3$ , on obtient huit cas possibles pour les tensions de sortie du filtre actif  $V_{fi}$  (référencées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau II.11 [11], [12].

Cas N°	$T_3$	$T_2$	$T_1$	$V_{f3}$	$V_{f2}$	$V_{fi}$
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
2	0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
3	0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
4	1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
5	1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
6	1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
7	1	1	1	0	0	0

Tab.II.1. Tensions en sortie de l'onduleur.

### II.1.1. Filtre de découplage:

Le but du filtre de découplage est de permettre la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est très souvent considéré comme une source de courant qui génère des courants harmoniques à partir de la différence des tensions entre la sortie du pont onduleur et le réseau [10]. Ce filtre est un filtre qui limite certes la dynamique du courant mais réduit en même temps la propagation sur le réseau électrique des composantes dues aux commutations. Dans ce travail, nous avons utilisé un filtre entre l'onduleur et le réseau électrique qui se compose d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ , comme le montre la figure II.2. Notons toutefois que des filtres de découplage du troisième ordre, de type L-C-L, pourraient également être utilisés. Dans notre étude, nous emploierons ce filtre du premier ordre. D'autres études, y compris dans notre laboratoire, ont déjà été consacrées à ces filtres de découplage [11], [12].

### II.2. principe de commande du filtre actif :

Le rôle de la commande est la génération de courants harmoniques produits par le filtre actif afin qu'ils suivent en temps réel leurs références harmoniques. Dans un premier temps, il faut donc déterminer ces courants harmoniques de référence. L'objectif est de compenser l'ensemble des harmoniques de courant générés par la charge non linéaire. La figure II.3 présente le système global à étudier, constitué du réseau d'alimentation, de la charge polluante et du filtre actif parallèle.

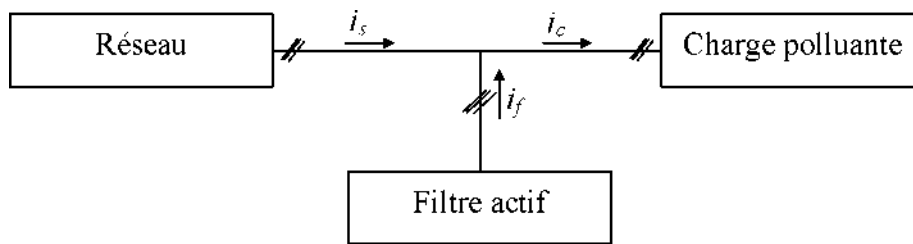


Figure. II.3. Système à étudier.

La partie commande du filtre actif est constituée de trois modules distincts réalisant les fonctions suivantes :

- détermination des courants harmoniques de la charge polluante,
- commande de l'onduleur du filtre actif ou poursuite des références de courant,
- régulation de la tension aux bornes de la source de tension continue.

**II.2.1 Détermination des courants harmoniques de référence :** La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante. Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, ...) [14]-[15]. Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, nous avons choisi de mettre en œuvre une variante de la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées, développée au sein de notre laboratoire. Elle utilise des filtres FMV au lieu des filtres classiques (FPB et FPH). La méthode classique des puissances instantanées est devenue aujourd'hui très courante dans les applications comme le filtrage actif car elle réalise le meilleur compromis entre performances statique et dynamique [10].

### II.2.1.1 Méthode des puissances instantanées et sa variante :

La méthode des puissances instantanées est une méthode temporelle. Elle a été utilisée afin d'éviter les difficultés dues au nombre élevé de calcul lors de la mise en œuvre de méthodes fréquentielles telle que la méthode de Fourier (Transformées de Fourier rapide ou discrète). Cette méthode a été introduite par H. Akagi [15]. Son principe est basé sur le passage de systèmes triphasés constitués par les tensions simples et les courants de ligne, à un système diphasé (repère a-P) en utilisant la transformation de Concordia, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées. Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Pour les harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Dans la méthode classique des puissances instantanées [15], on utilise généralement, soit un filtre passe-haut, soit un filtre passe-bas afin de ne garder que la composante harmonique du signal. La figure suivante II.4 présente le principe de cette méthode.

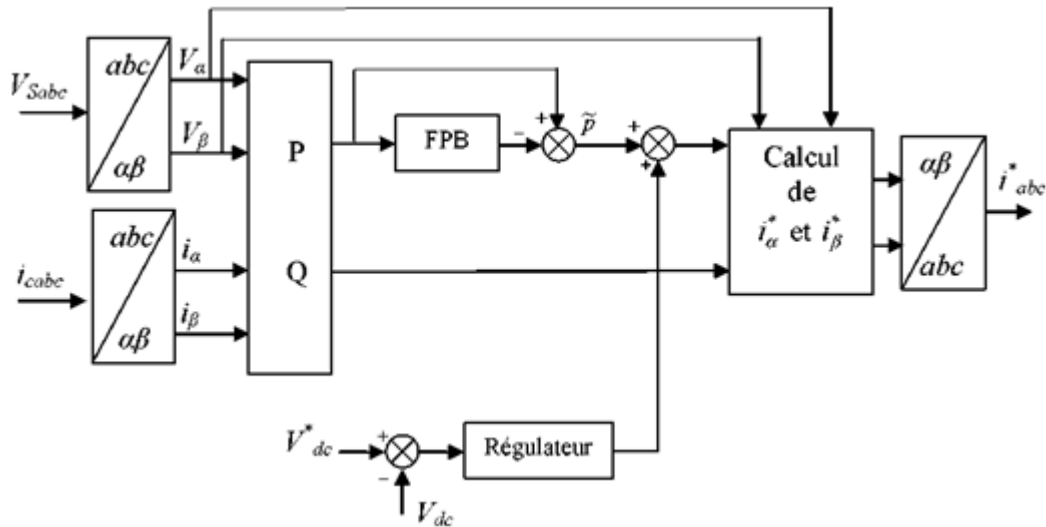


Fig. II.4. Détermination des courants de référence du filtre actif par la méthode classique des puissances active et réactive instantanées

Les deux types de filtre d'extraction sont figure suivante :

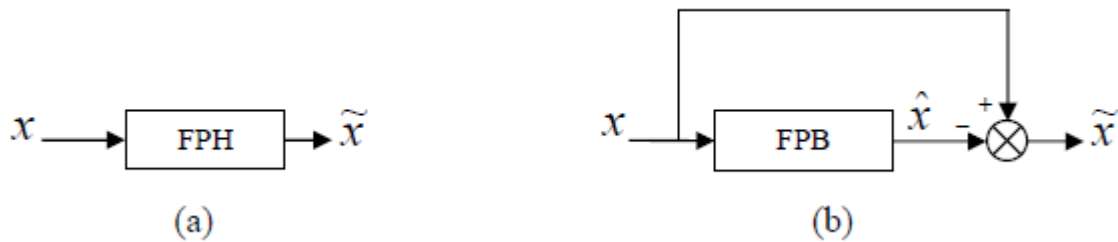


Figure. II.5 : Deux types classiques de filtres d'extraction de la composante harmonique.

Cependant, comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ces deux types de filtres ont été étudiés dans notre laboratoire par M. Benhabib lors de sa thèse de Doctorat [12]. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car :

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En général, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif de puissance lors de variations rapides de la charge.
- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante.

Pour ces raisons, un nouveau type de filtre d'extraction nommé ici FMV a été développé au sein de notre laboratoire. Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok [15] et est basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes  $\alpha$ - $\beta$  comme cela est présenté à la figure II.6.

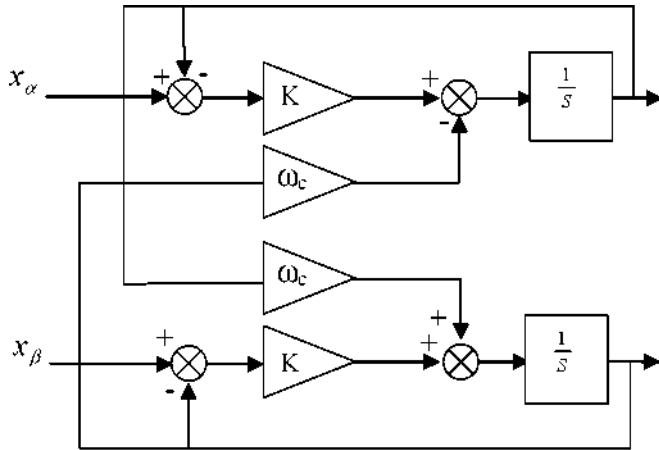


Fig. II.6. Principe du FMV.

Selon les axes  $\alpha$ - $\beta$ , les expressions liant les

composantes  $\hat{x}_{\alpha-\beta}$  en sortie du FMV aux composantes d'entrée  $x_{\alpha \beta}$  sont les suivantes :

$$x_a = \left( \frac{K}{s} x_a^{(s)} - \hat{X}_a^{(s)} \right) - \frac{\omega_c}{s} \cdot \hat{X}_\beta^{(s)} \quad (II.1)$$

$$x_\beta = \frac{k}{s} [x_\beta(s) - \hat{X}_\beta(s)] - X_b^{(s)} + \frac{\omega_c}{s} \hat{X}_a(s) \quad (II.2)$$

Sont représentés par :

où  $X_{aj}$  : le signal électrique d'entrée selon les axes a-b, de nature tension ou courant

$X_{\alpha\beta}$  : les composantes fondamentales de  $x_{\alpha-}$

$K$  : constante à fixer

$\omega_c = 2\pi f$  : pulsation fondamentale du réseau

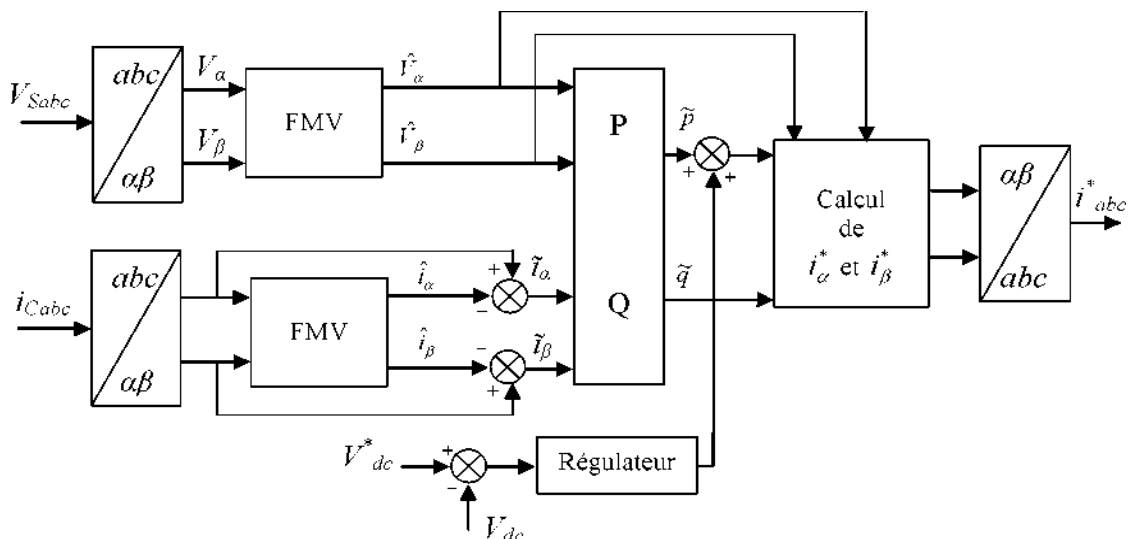


Fig. II.7. Détermination des courants de référence du filtre actif à l'aide de FMV

Ce filtre FMV sera systématiquement mis en œuvre dans toutes les commandes étudiées tout au long de ce travail. La figure II.7 présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des FMVs.

Les étapes suivantes détaillent le calcul des références par cette variante. Dans le cas d'un système triphasé trois fils (donc sans composante homopolaire), caractérisé par ses tensions simples ( $V_{Sa}$ ,  $V_{Sb}$ ,  $V_{Sc}$ ) et ses courants de ligne ( $i_{ca}$ ,  $i_{cb}$ ,  $i_{cc}$ ), la transformation de Concordia permet de ramener ce système à un système diphasé de tensions et de courants :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Le premier FMV, utilisé au niveau des tensions diphasées, permet de filtrer efficacement les composantes harmoniques des tensions d'alimentation, comme nous pourrions le démontrer de façon théorique dans la suite de ce chapitre. Ainsi, sa mise en œuvre permet d'améliorer les performances du filtrage. Quant aux courants diphasés d'axes  $\alpha$  et  $\beta$ , ils peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique :

$$\begin{cases} i_\alpha = a + a \\ i_\beta = \beta + \beta \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Le rôle du FMV est d'extraire les composantes fondamentales du courant de charge à la pulsation  $\omega_c$ , directement selon les axes  $\alpha - \beta$ . Ensuite, les composantes harmoniques du courant selon les axes  $\alpha - \beta$ , notées ici  $\tilde{i}_\alpha$  et  $\tilde{i}_\beta$ , sont obtenues en soustrayant sur chaque axe, la sortie du FMV à son entrée. Après isolation des composantes fondamentales en tension notées  $V_{\alpha\beta}$ , et des courants harmoniques  $a_\beta$ , nous pouvons alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle ( $p$ ) et imaginaire ( $q$ ) instantanées par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & \beta \\ -\beta & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ \beta \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

$\tilde{p} \tilde{q}$  : Composantes alternatives de p et q Les composantes harmoniques du courant sont alors définies par :

$$\begin{bmatrix} a \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & \beta \\ -\beta & a \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} a & \beta \\ -\beta & a \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\frac{2}{a} + \frac{2}{\beta}} \begin{bmatrix} a & \beta \\ \beta & a \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

La transformation de Concordia inverse nous permet alors d'obtenir les références triphasées des courants harmoniques:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

## II.2. 2.Stratégie de commande de l'onduleur du filtre actif :

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant). Deux stratégies de commande de l'onduleur de tension du filtre actif sont couramment mises en œuvre, à savoir :

- La commande dite directe dont le principe est basé sur la comparaison du courant de référence  $i^*f$  avec le courant réel  $if$  injecté par le filtre actif ;
- La commande dite indirecte pour laquelle le courant de référence  $i^*f$  est comparé avec le courant de source  $i_s$ [12]. Deux types de commandes rapprochées des convertisseurs statiques sont principalement mis en œuvre : la commande par MLI et la commande par hystérésis. La commande MLI peut être à échantillonnage naturel ou optimisée. Quant à la commande par hystérésis, elle peut être à :

- MLI à échantillonnage naturel,
- Hystérésis conventionnelle,
- Hystérésis modulée.

### II.2.2.1 Contrôle par MLI :

Le principe du contrôle par MLI est décrit à la figure II.8. Dans ce cas, la différence entre le courant référence  $i_f^*$  et le courant réel  $i_f$  est appliquée à l'entrée d'un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice, est ensuite comparé à un signal triangulaire de fréquence fixe (porteuse) afin de déterminer les ordres de commutations des interrupteurs. La fréquence de la porteuse triangulaire fixe donc la fréquence de découpage des semi-conducteurs de puissance.

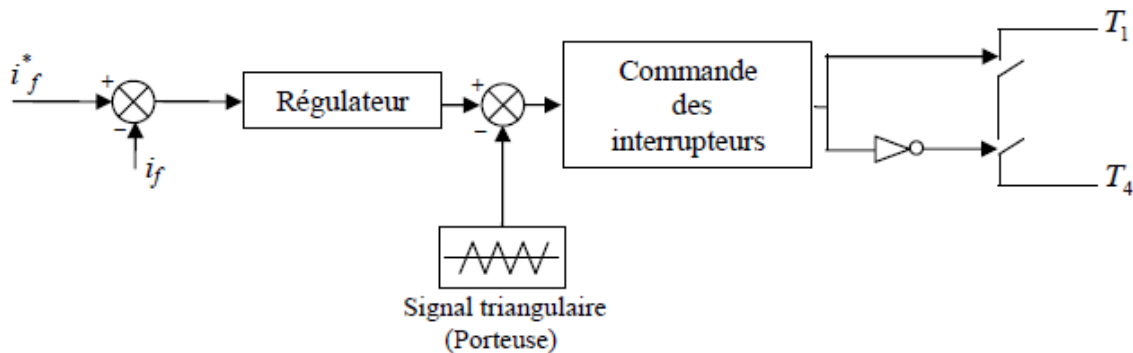


Figure. II.8. Principe de la commande par MLI.

Le contrôle par MLI est d'une complexité réduite; il garantit un fonctionnement à fréquence fixe et conduit à un contenu harmonique parfaitement identifié. Cependant, cette technique a des propriétés dynamiques qui peuvent être limitatives et la réponse du système lors d'un changement brutal des courants de référence est plus lente que celle d'une commande par hystérésis.

### II.2.2.2 conventionnel par hystérésis :

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure II.9 expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence  $i_f^*$  et le courant produit par l'onduleur

$i_f$ . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs,

d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

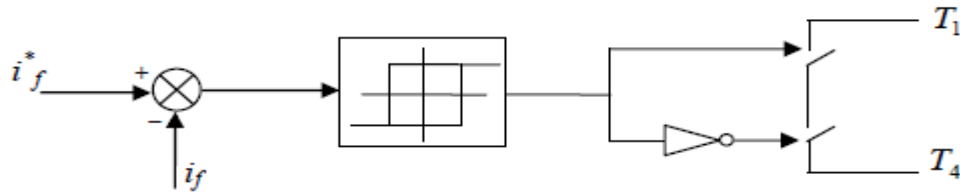


Figure. II.9. Commande conventionnelle par hystérésis.

### II.2.2.3 Contrôle par hystérésis modulée :

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle en fixant la fréquence de commutation des semi-conducteurs [18]-[17]. Cette commande consiste à ajouter au signal d'erreur  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = i_f^* - i_f$ ) un signal triangulaire  $S_{tr}$ , de fréquence  $f_{tr}$  et d'amplitude  $A_{tr}$ . La fréquence  $f_{tr}$  doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis de largeur de bande  $2B_h$  dont la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. Le schéma de cette commande est décrit à la figure II.10.

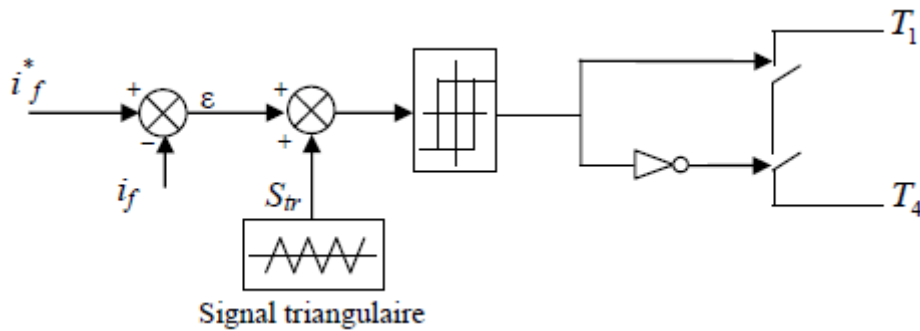
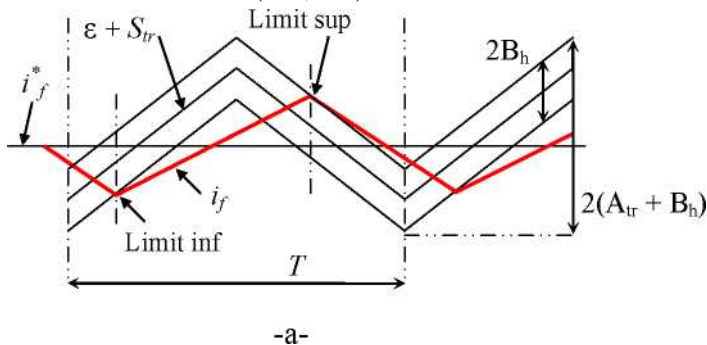


Fig. II.10. Commande par hystérésis modulée.

Dans le cas du contrôle par hystérésis modulée, il est important de dimensionner correctement les valeurs des deux paramètres déterminants, à savoir  $A_{tr}$  du signal triangulaire et  $B_h$  [16], [17]. Si ces paramètres ne sont pas correctement déterminés, la fréquence de commutation des interrupteurs de puissance sera soit supérieure (figure II.11-b), soit inférieure (figure II.11-c), à la fréquence souhaitée. La figure II.11, montre quelques exemples illustrant l'effet de ces paramètres de commande ( $A_{tr}$ ,  $B_h$ ).



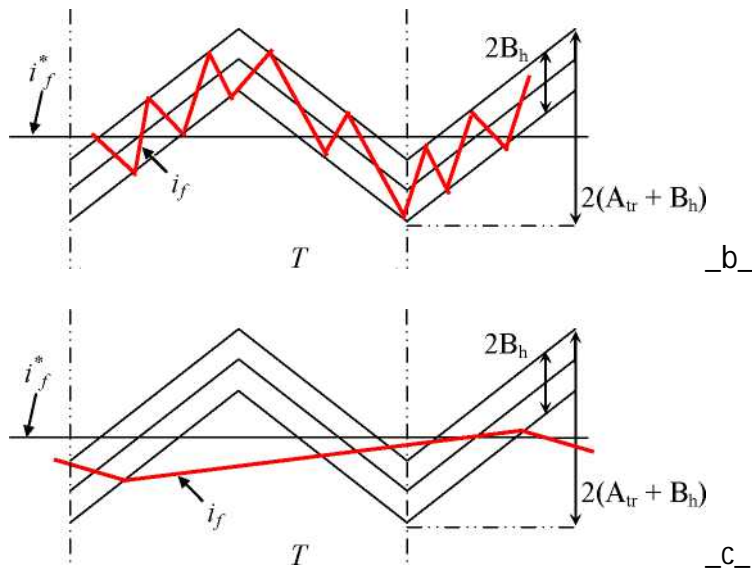


Figure. II.11. Exemples de l'effet des paramètres de commande ( $A_{tr}$ ,  $B_h$ ).

- (a): fréquence de commutation égale à la fréquence désirée,
- (b): fréquence de commutation supérieure à la fréquence désirée.
- (c): fréquence de commutation inférieure à la fréquence désirée

En effet, afin de fixer la fréquence de commutation en régime permanent, il ne doit exister que deux intersections entre le courant réel  $i_f$  et la bande hystérésis pendant chaque période  $T$  : la première avec la limite inférieure du contrôleur d'hystérésis et la deuxième avec sa limite supérieure [18], [19]. Si cette condition est respectée, on aura ainsi une fréquence de commutation des interrupteurs constante et égale à celle du signal triangulaire. La figure précédente II.11-a présente le cas idéal où le moment d'allumage d'un interrupteur est déterminé par l'intersection du courant réel avec la limite inférieure et le moment d'extinction est déterminé par l'intersection avec la limite supérieure. Différents travaux ont été réalisés sur la commande par hystérésis modulée. Différentes méthodes ont été notamment étudiées pour déterminer ces paramètres [17], [18], [19]. Nous allons baser notre étude sur le principe présenté dans les travaux d'A. Com sa [18]. La figure II.12 illustre la relation entre  $A_{tr}$ ,  $B_h$  et la variation temporelle du courant réel  $i_f$  dans une période  $T$ .

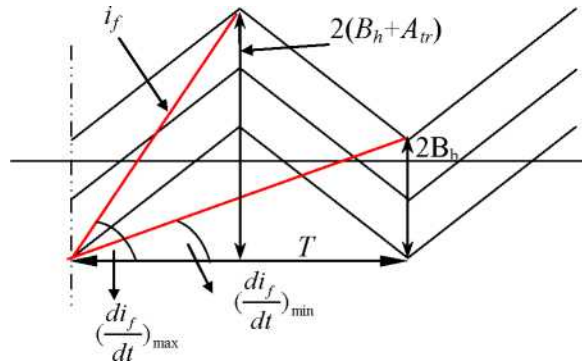


Figure. II.12. Détermination des paramètres ( $A_{tr}$ ,  $B_h$ ).

Comme l'illustre la figure II.12, on peut calculer  $A_{tr}$ ,  $B_h$  à partir des deux cas extrêmes de vitesses de changement du courant  $\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max}$  et  $\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{min}$ . Dans le cas où la vitesse de changement du courant est maximale et pour que la fréquence de commutation soit égale à celle du signal triangulaire, nous obtenons la condition suivante :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max} < 2 \frac{(A_{tr} + B_h)}{\left(\frac{T}{2}\right)} = \frac{4(A_{tr} + B_h)}{T} \quad (\text{II.11})$$

Dans le cas où la vitesse de changement du courant est minimale, pour avoir toujours une commutation par période  $T$ , la condition suivante doit être satisfaite :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{min} > \frac{2 \cdot B_h}{T} \quad (\text{II.12})$$

Pour trouver les valeurs de  $A_{tr}$ ,  $B_h$  il faut donc connaître les valeurs  $\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max}$  et  $\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{min}$ .

Sachant que l'onduleur doit générer un courant  $i_f$  capable de suivre sa référence  $i_f^*$ , nous avons la relation suivante pour la tension  $V_f$  imposée par l'onduleur pour chaque phase, la résistance du filtre  $L_f$  étant négligée :

$$V_f = V_s + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (\text{II.13})$$

A partir de cette équation nous avons:

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{(V_f - V_s)}{L_f} \quad (\text{II.14})$$

A l'aide de toutes les variables qui dépendent directement du système étudié, telles que la tension du réseau  $V_s$ , l'inductance  $L_f$ , et la tension  $V_f$  (déterminée en fonction de la tension  $V_{dc}$  et de l'état des interrupteurs), on peut donc calculer le terme  $di/dt$ , puis utiliser les relations (II.11) et (II.12) pour déterminer les valeurs de  $A_{tr}$  et  $B_h$ . Cette commande sera validée expérimentalement dans la suite de notre étude.

### II.2.3 Régulation de la tension continue :

La tension aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne  $V_{dc}$  aux bornes du condensateur sont les suivants:

- Les pertes statique et dynamique dans les semi-conducteurs de puissance de l'onduleur,
- Les pertes dans les inductances de découplage  $L_f$ ,
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

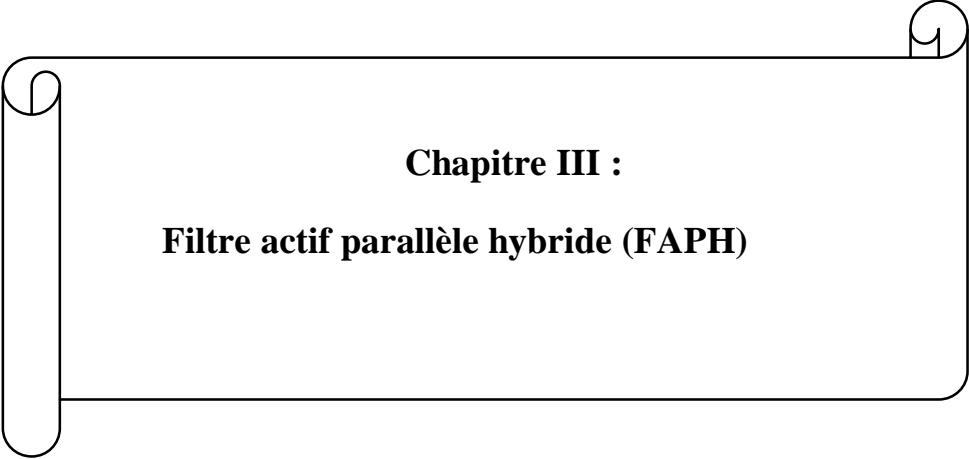
Pour que cette tension  $V_{dc}$  soit maintenue constante, nous ajoutons à la puissance réelle instantanée une consigne de puissance active  $P_c$ . Cette régulation est plus lente que celle des courants harmoniques, ce qui permet de la considérer comme parfaite à l'échelle de la régulation des harmoniques.

### II.3.Conclusion :

L'efficacité de la méthode d'identification harmonique est exigée par une bonne compensation à base de filtre actif.

L'identification. 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. La méthode d'identification considérée pour l'extraction des courants harmoniques à des courants absorbés par la charge non linéaire, a été présentée.

Le chapitre aussi montre que la modulation par hystérésis à bande fixe est la meilleure en termes de qualité du filtrage, mais elle représente une fréquence de commutation variable qui représente un inconvénient majeur. La modulation par MLI sinusoïdale donne de bons résultats avec l'avantage d'une fréquence de commutation contrôlable.



**Chapitre III :**  
**Filtre actif parallèle hybride (FAPH)**

## Introduction :

Le filtrage actif parallèle (ou shunt) Hybride (FAPH), nous allons examiner un autre type de structure de filtre actif de puissance qui est de plus en plus utilisé ces derniers temps. Il s'agit du Filtre Actif de Puissance Hybride (FAPH) à structure tension, qui est également conçu dans le but de dépolluer les réseaux électriques. Ce choix est justifié par le fait que les filtres actifs séries ou shunts utilisés seuls ne sont pas convenables dans certains cas, en particulier lorsqu'il faut compenser les harmoniques engendrés par des charges non-linéaires de haute puissance. Par conséquent, les filtres hybrides s'imposent comme solution permettant d'exploiter les avantages de chacun des deux types de filtre, passif et actif, tout en éliminant les inconvénients de ceux-ci. Il est à noter que le choix des industriels d'utiliser des filtres hybrides est clairement constaté ces dernières années en raison des particularités que cette structure apporte comparativement au filtre actif parallèle pur (FAPP) ou série classiques utilisés seuls. [20], [21], [19] :

- Possibilité d'utiliser des semi-conducteurs de puissance moins onéreux, comme par exemple les MOSFETs au lieu des IGBTs, en raison de la plus faible tenue en tension requise,
- La tension  $V_{dc}$  plus faible que pour un filtre actif parallèle pur (FAPP),
- L'énergie stockée dans l'élément de stockage  $C_{dc}$  est plus faible.
- Solutions pratiques et économiques aux problèmes des harmoniques, particulièrement dans le cas des charges non-linéaires de hautes puissances (de quelques centaines de kVA à quelques MVA).
- Le Filtre actif utilisé dans ce cas est de faible puissance (généralement de 2 à 10% de la puissance apparente de la charge non-linéaire).
- Pour certaines topologies le *filtre actif* peut être mobile en le déplaçant d'un site à un autre selon le besoin.
- Le filtre hybride est aussi capable de réguler la tension au point de raccordement (VPCC).

Notre objectif est d'étudier un FAPH à structure tension ainsi que ses deux commandes, afin de compenser les harmoniques de courant des charges polluantes connectées au réseau. A cet effet et en se basant sur les critères de simplicité d'implémentation, de la performance et de la robustesse, le type de commande appliquée au FAPH va être étudié en simulation. Il s'agit de:

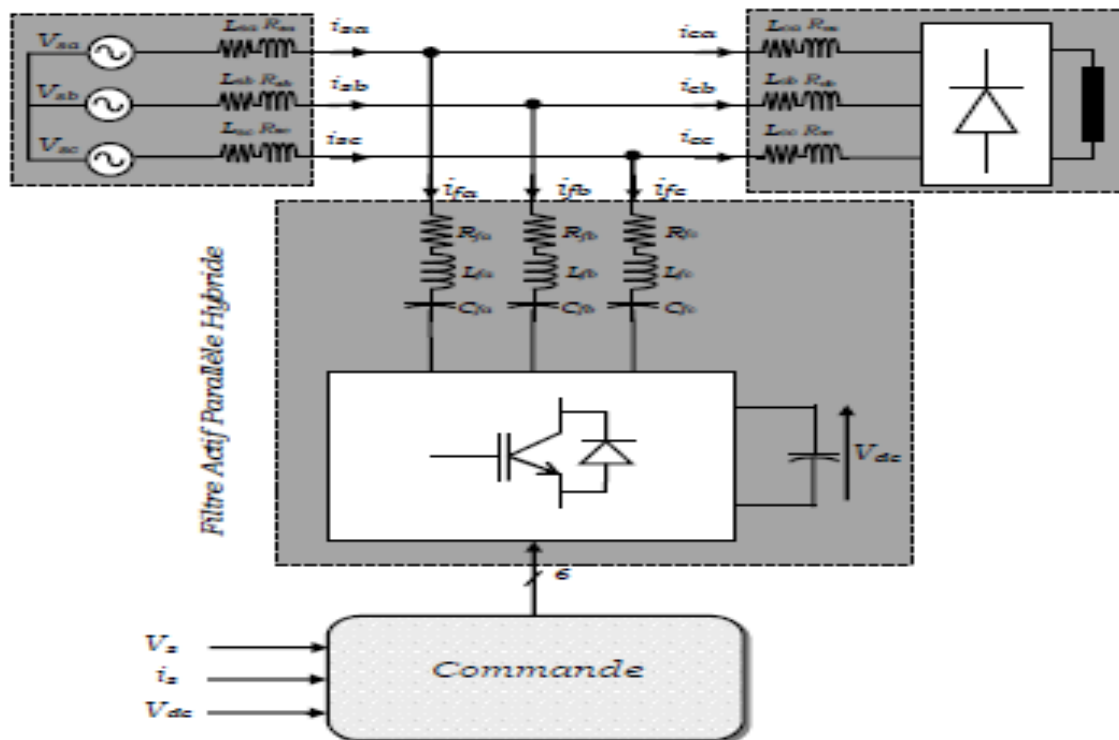
- La commande en puissance en utilisant *la méthode p-q*.

### III .1. Structure générale du FAPH :

Parmi les différentes topologies de filtres hybrides ont été proposées dans la littérature [26], [27], nous nous intéressons ici au filtre hybride parallèle à structure tension, notamment pour la complexité réduite de sa commande [20]. Lorsque ce filtre hybride est relié à un réseau triphasé trois fils, nous pouvons imaginer deux topologies selon le nombre de bras d'onduleur, à savoir un filtre hybride de puissance à trois bras et un filtre hybride à deux bras avec un condensateur à point milieu. [24], [25].

Dans Ce paragraphe, nous allons étudier le FAPH avec ses deux stratégies de commande. Le système global à étudier est représenté à la figure III.1. Ces système se compose de quatre parties:

- Le réseau triphasé d'alimentation,
- La charge non linéaire modélisée ici par un pont à diodes (PD3) débitant sur, soit une charge inductive (source de courant : une inductance  $LD$  en série avec une résistance  $RD$ ), soit une charge capacitive (source de tension : un condensateur  $CD$  en parallèle avec une résistance  $RD$ ).
- Le FAPH (onduleur à structure tension en série avec un filtre passif triphasé LC),
- La commande du FAPH.



### Figure III.1 Structure générale du FAPH

Le FAPH est composé d'un filtre actif triphasé à structure tension et d'un filtre passif triphasé, classiquement accordé sur l'harmonique 7 pour des raisons liées à l'encombrement. Ces deux filtres sont directement connectés en série sans transformateur. L'ensemble est ensuite connecté en parallèle sur le réseau près de la charge non linéaire, comme le présente la figure III .1

Il est à rappeler que pour cette topologie, la puissance du filtre actif est encore plus réduite puisque le courant qui le traverse est plus faible; ainsi le filtre actif est à l'abri de courant de court-circuit éventuel au niveau de la charge car il est placé en série avec les filtres passifs parallèles et en dérivation par rapport à la charge non linéaire. Le filtre passif absorbe les courants harmoniques de rang 7 générés par la charge et le filtre actif améliore l'efficacité du filtre passif [22], [24], [23].

La structure de l'onduleur est identique à celle de l'onduleur d'un filtre actif à structure tension, déjà présentée. La capacité  $C_{dc}$  joue le rôle d'une source de tension continue. L'onduleur est constitué de semi-conducteurs de puissance, commandable à l'ouverture et à la fermeture (IGBT), comportant chacun une diode en antiparallèle. Le filtre passif  $LC$  triphasé permet d'absorber la tension fondamentale du réseau et d'en soulager ainsi l'onduleur du filtre actif. En revanche, il faut noter que pour cette configuration et afin d'absorber une puissance à valeur moyenne non nulle, le filtre actif doit générer un courant en phase et de même fréquence que la composante fondamentale du courant du filtre passif. En effet, le courant fondamentale qui circule dans le filtre passif est de nature réactive. De ce fait, la puissance est de nature réactive et devra être ajoutée à la consigne de la composante harmoniques de la puissance réactive.

#### III.2. Stratégies des commandes du FAPH:

Plusieurs stratégies de commande du filtre hybride (FAPH) à structure tension ont été proposées dans la littérature. Dans cette recherche, en se basant sur les critères de simplicité d'implémentation, de la performance et de la robustesse, deux types de commande appliquée au FAPH vont être étudiés en simulation puis validés expérimentalement. Il s'agit de:

- La commande en puissance en utilisant la méthode  $p-q$ .
- La commande en tension dans le référentiel  $d-q$ .

A cet effet, deux types de charges non linéaires vont être utilisés, l'une de type source de courant et l'autre de type source de tension.

#### III .3. Commande en puissance du FAPH :

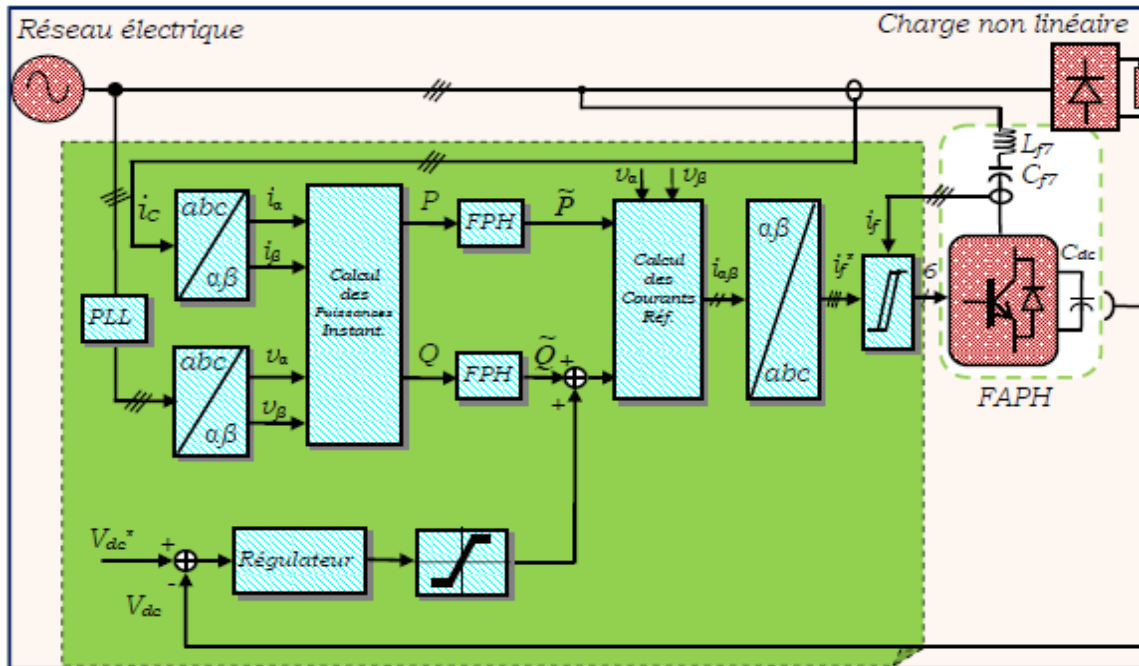


Figure III.2 Commande du FAP Hybride par la méthode des puissances active et Réactive instantanées.

La stratégie de commande fait l'objet de notre étude sur le filtre hybride, le but étant d'améliorer les caractéristiques du filtrage tout en utilisant une méthode de commande de complexité réduite. Nous utilisons la méthode des puissances instantanées afin d'identifier les références de courant. Pour cela, trois grandeurs sont mesurées :

- Les courants de charge  $i_c$
- Les courants du filtre  $i_f$
- Les tensions de source pour la PLL.

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

Notons qu'en présence des harmoniques, la puissance apparente est composée de trois parties:

- Active (P)
- Réactive (Q)
- Déformante (D)

Comme l'indique la relation suivante :

$$S = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (III.1)$$

Notons par  $(V_\alpha, V_\beta)$  et  $(I_\alpha, I_\beta)$  les composantes orthogonales du repère  $\alpha$ - $\beta$  associées respectivement aux tensions simple  $(V_{sa}, V_{sb}, V_{sc})$  du système triphasé trois (03) fils (sans composante homopolaire), et aux courants  $(i_{ca}, i_{cb}, i_{cc})$  absorbés par les charges non linéaire. La transformation  $\alpha$ - $\beta$  permet d'écrire, la relation des tensions suivante :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (III.2)$$

Et la relation des courants suivante :

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

La puissance active instantanée  $P(t)$  est définie par la relation suivante :

$$P(t) = V_{sa} \cdot i_{sa} + V_{sb} \cdot i_{sb} + V_{sc} \cdot i_{sc} = V_\alpha \cdot I_\alpha + V_\beta \cdot I_\beta \quad (III.4)$$

L'avantage de la transformation  $\alpha$ - $\beta$  est la séparation des séquences homopolaires d'un système triphasé quatre fils de courant ou de tension. De la même façon, la puissance imaginaire instantanée peut à son tour s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sa} - V_{sb}) \cdot i_{cc} + (V_{sb} - V_{sc}) \cdot i_{ca} + (V_{sc} - V_{sa}) \cdot i_{cb}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (III.5)$$

A partir des relations III.3 et III.4, nous pouvons établir la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

Ensuite, pour déterminer les courants harmoniques de la charge, la composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Sachant que chacune des puissances  $p$  et  $q$  comporte une partie continue et partie alternative, nous pouvons les écrire sous la forme suivante :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (III.7)$$

Avec :

- $p$  une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- $q$  une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.
- $p \sim$  et  $q \sim$  des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

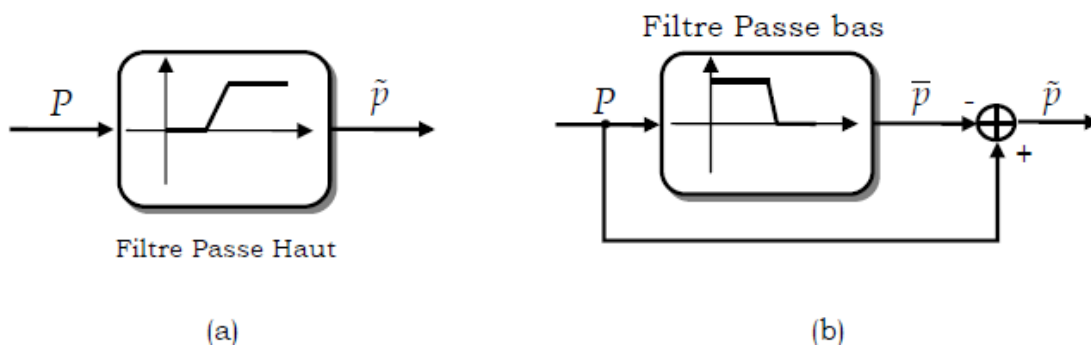


Figure III. 3:Types de Filtres d'extraction de la composante alternative

L'ordre du filtre passe bas (ou passe haut) utilise définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Par ailleurs, nous pouvons déduire les courants dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  en inversant la relation 2 comme le montre l'équation III.6.

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (III.8)$$

En combinant les équations III.6et III.7, le courant peut être sépare, dans le repère  $\alpha$  - $\beta$ , en trois composantes, active et réactive a la fréquence fondamentale et les harmoniques. Nous obtenons alors en posant  $\Delta = \frac{1}{(V_\alpha)^2 + (V_\beta)^2}$  :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (III.9)$$

$\Delta$  est suppose constante pour un réseau parfaitement sinusoïdal et équilibre. De l'équation 7 nous pouvons conclure que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  revient a séparer des composantes continues des puissances réelle et imaginaire instantanées. La transformée de Concordia inverse nous permet alors d'obtenir les courants de références triphasés ( $I_{refa}, I_{refb}, I_{refc}$ ) donnees par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} I_{refa} \\ I_{refb} \\ I_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (III.10)$$

### III.3.1- Boucle de régulation du courant du FAPH :

La Figure III.5, illustre le schéma équivalent par phase de la boucle du courant du FAP Hybride.

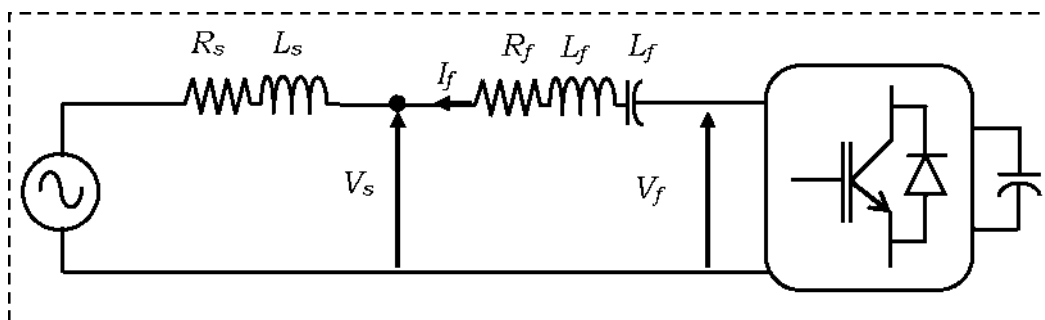


Figure III.4 Schéma équivalent par phase du filtre de couplage

En négligeant la valeur de la résistance  $R_f$  du filtre de couplage, nous pouvons écrire la relation suivante:

Soit :

$$L_f \frac{d}{dt} \vec{I}_f = \vec{V}_f - \vec{V}_s \quad (III.11)$$

A partir des équations III.10. Et III.11. Nous pouvons alors déduire l'expression suivante :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta \vec{I}_f = (\vec{V}_s + L_f \frac{d}{dt} d\vec{I}_f^*) - \vec{V}_f \quad (III.12)$$

Si l'on définit une tension de référence  $V_f^*$  comme suit :

$$\vec{V}_f^* = \vec{V}_s + L_f \frac{d}{dt} d\vec{I}_f^* \quad (III.13)$$

Nous remarquons que cette tension de référence  $V_f^*$  est composée termes. Le premier représente la tension du réseau  $V_s$  directement mesurable. Le second représente la chute de tension aux bornes de l'inductance de couplage  $L_f$  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 III.5, où  $G(s)$  est la fonction de transfert de l'onduleur de tension dont la modélisation est donnée par la relation suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} G(s) = \frac{K}{1 + \tau.s} \\ K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \end{array} \right. \quad (III.14)$$

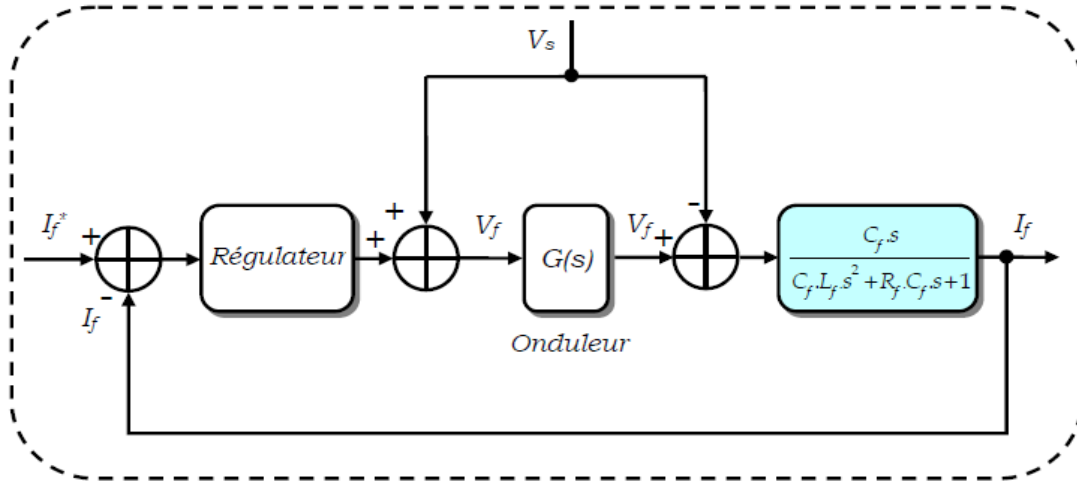


Figure III. 5 : Boucle de régulation des courants du FAPH

### III.3.2. Boucle de régulation du bus continu :

Les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie) sont la principale cause susceptible de modifier la tension moyenne  $V_{dc}$  du bus continu, et qui de ce fait doit être maintenue à une valeur fixe. La régulation de cette tension  $V_{dc}$  doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur  $P_c$  s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice  $\tilde{p}$  et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi  $V_{dc}$ .

La puissance  $P_c$  représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension  $V_{dc}$  égale à la valeur de la tension de référence souhaitée ( $V_{dc}^*$ ).

Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple ( $K$ ) avec une action de filtrage au préalable sur la tension mesurée  $V_{dc}$ , réalisée par un filtre passe-bas du deuxième ordre de manière à atténuer les fluctuations à 300 Hz.

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (III.15)$$

Pour des faibles variations de la tension  $V_{dc}$  autour de sa référence  $V_{dc}^*$ , la relation peut être linéarisée pour devenir :

$$p = cv * \left( \frac{d(v)}{dt} \right) \quad (III.16)$$

Soit en lui appliquant la transformation de Laplace :

$$P_c(s) = C_{dc} V_{dc}^* s V_{dc}(s) \quad (III.17)$$

Donc :

$$V_{dc}(s) = \frac{P_c(s)}{V_{dc}^* C_{dc} s} \quad (III.18)$$

La régulation de la tension du bus continu en boucle fermée est représentée par le schéma bloc de la figure III .7 en prenant en considération le régulateur proportionnel  $K$  dont le paramètre doit être choisi de façon à obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire a la dynamique du FAP.

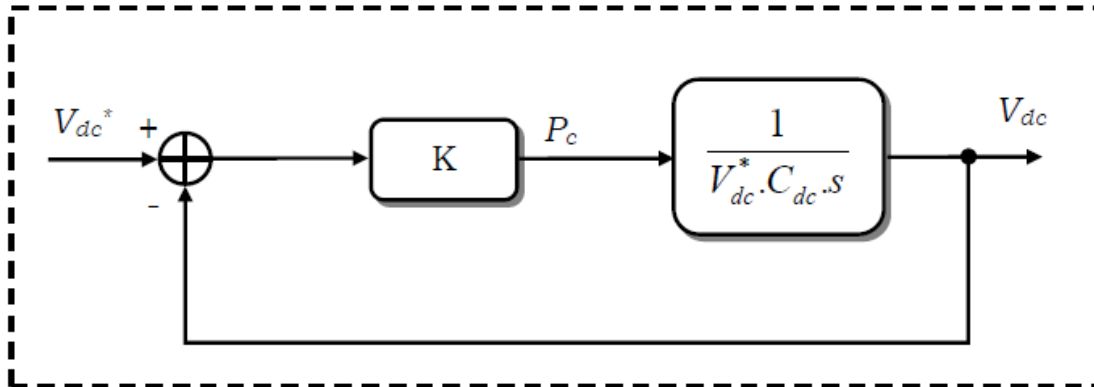


Figure III .6 : Régulation de la tension  $V_{dc}$  du bus continu.

### III .3.3 La PLL classique:

Comme nous l'avons montré précédemment, la tension du réseau doit être sinusoïdale et équilibrée, sinon la méthode des puissances instantanées n'est pas applicable. Puisque la tension du réseau est souvent perturbée et/ou déformée, le système à base de PLL (Phase Locked Loop ou Boucle à Verrouillage de Phase) est proposé pour extraire la composante fondamentale directe de la tension du réseau.

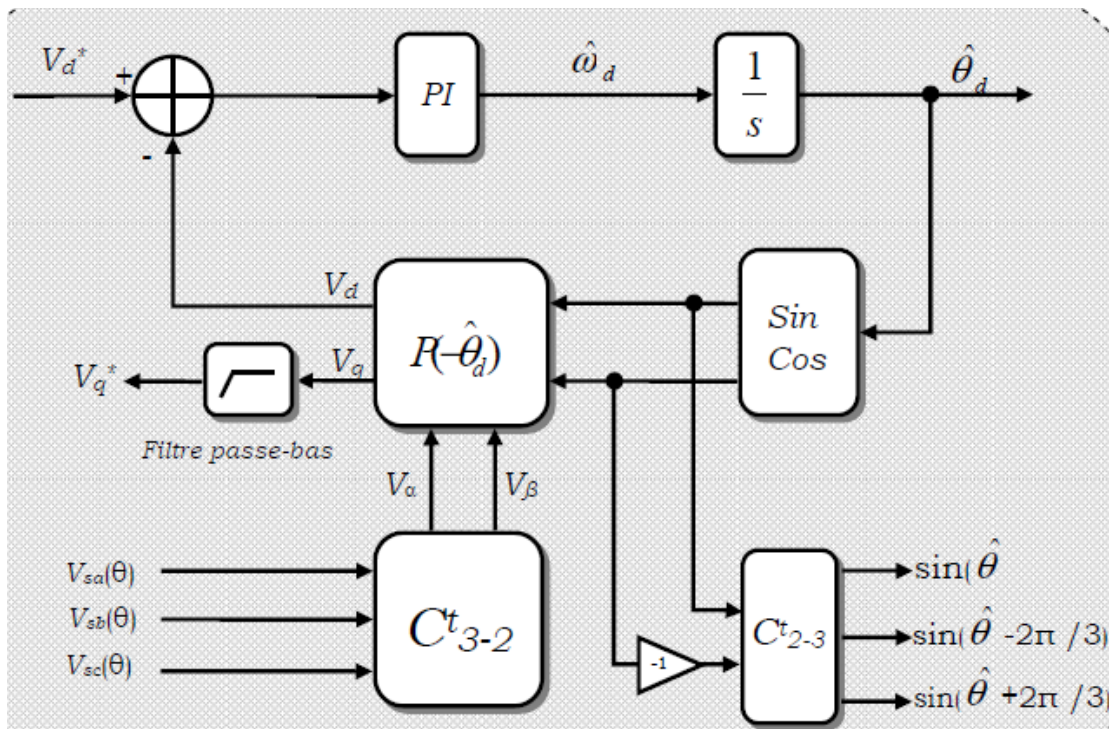


Figure III. 7 : Schéma de PLL classique

Le principe de la PLL, dans notre cas, est basé sur l'emploi d'un simple régulateur *PI*. Son fonctionnement se base sur la transformation de Park dans le repère *d-q*. Les tensions  $V_{s\_abc}(\theta)$ , mesurées au point de raccordement du filtre actif parallèle, subissent dans un premier temps la transformation de Concordia ( $\alpha$ - $\beta$ ). Les tensions ainsi obtenues sont exprimées dans le repère de Park par une rotation  $P(-dq^{\wedge})$ . L'angle de cette rotation, issu de l'intégration de l'estimation de la pulsation  $d\hat{w}$ , est déterminé par le régulateur *PI*. La PLL sera verrouillée lorsque l'angle estimé  $dq^{\wedge}$  sera égal à  $q^{\wedge}$ . Les tensions simples mesurées au point de raccordement dans le repère  $\alpha$ - $\beta$  sont données par l'équation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha}(\theta) \\ V_{\beta}(\theta) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.19})$$

Puis en appliquant la transformée de Park (*d,q*) avec un angle de rotation  $\hat{\theta}$  donnée par :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{\alpha} \\ V_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Nous obtenons alors la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{3}V_m \begin{bmatrix} \sin(\theta - \hat{\theta}) \\ -\cos(\theta - \hat{\theta}) \end{bmatrix} \approx \sqrt{3}V_m \begin{bmatrix} \sin(\Delta\theta) \\ -\cos(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{III.21})$$

Où  $V_m$  est la valeur efficace la tension du réseau. La PLL sera verrouillée lorsque l'angle estimé  $\hat{\theta}$  sera égal à l'angle  $\theta$  du réseau, ce qui implique que  $Dq = 0$ , nous pouvons ainsi écrire:

$$\text{et } \begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = -\sqrt{3}V_m \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

#### III.4. Schéma de simulation:

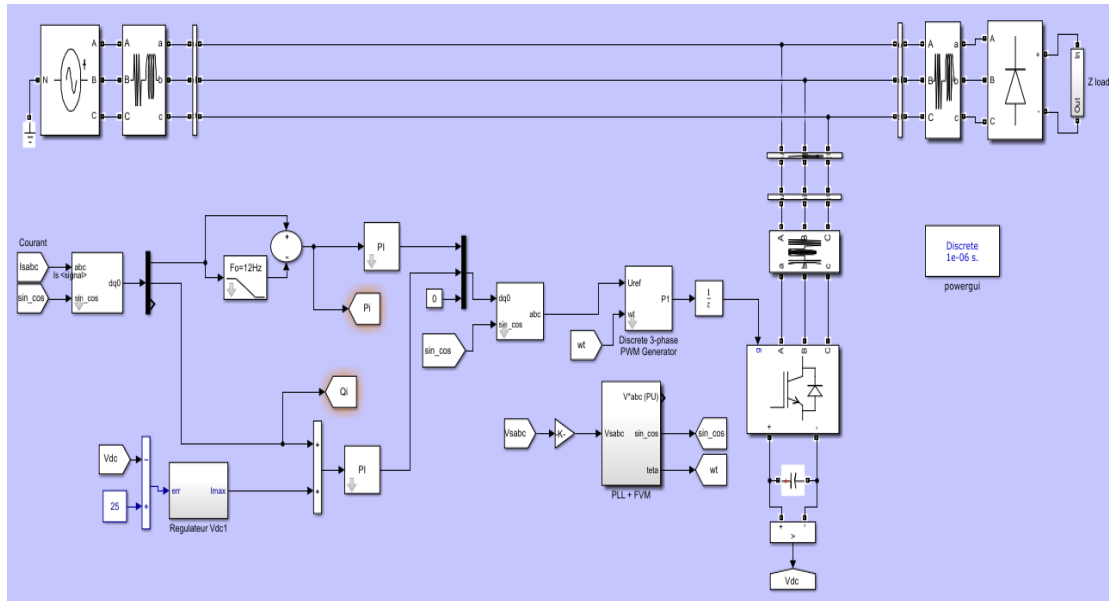


Figure III. 8:Schéma de simulation du FAPH par matlab

### III .4 .1 Résultats de simulation:

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation concernant l'étude effectuée pour ce premier type de commande que nous venons de développer à savoir la méthode des puissances active et réactive instantanées, pour une charge non linéaire, a savoir qu'il modélisée par un pont de diodes (PD3) débitant sur une résistance  $RD$  en série avec une inductance  $LD$ , elle se comporte comme une source de Courant.

Il est à noter que, les paramètres de simulation récapitulés dans le Tableau III.1, sont identiques à ceux utilisés pour le de filtre hybride que nous allons étudier tout au long de ce chapitre. À l'exception des composants du filtre passif ( $RF$ ,  $LF$  et  $CF$ ) dimensionnés de façon qu'il soit accorde sur l'harmonique 7 et la tension de référence  $Vdc\_ref$  de la boucle de régulation du bus continu qui vaut 25V au lieu de 142V avec le FAP pour les mêmes conditions du système en question.

Tableau III.1 Les Paramètres de simulations du FAPH :

Partie du système	Désignations	Valeurs
Réseau électrique	- Tension efficace	- $V_s = 100 V$
	- Fréquence	- $f = 50 Hz$
	- Impédance interne	- $R_s = 0.1\Omega$
		- $L_s = 0.5 mH$
Charge non linéaire	- PontRedresseur triphasé	

	(PD3) débitant sur une: · charge inductive ( <i>RD en</i> série avec LD) - Impédance de filtrage al'entrée dupont (PD3).	- $RD1 = 15\Omega$ - $LD = 1\text{ mH}$ - $RC = 0.01\ \Omega$ - $LC = 0.566\ \mu\text{H}$
<b>FAPH</b> <b>Paramètres de</b> <b>Simulations</b>	- Condensateur de stockage	- $CDC = 1100\ \mu\text{F}$
	- Filtre de couplage	- $RF = 0.01\ \Omega$
	- Tension de référence	- $LF = 1.9\ \text{mH}$ - $CF = 110\ \mu\text{F}$ - $Vdc\_ref = 25\ \text{V}$
	- Temps d'échantillonnage	- $Te = 1\ \mu\text{s}$
	- Type de pas	- Pas fixe
	- Méthode de résolution	- Algorithme : Euler (Ode45)
	- Bande d'hystérésis	- $HB = 0.2\ \text{A}$

### A/ Régime Permanent :

Les figures III. 9 -10-11-12-13 illustre, de haut en bas et pour la phase (a), Les Forme d'onde de la tension et du courant de source  $V_{sa}(V)$ ,  $I_{sa}(A)$ , courant de charge  $I_{ca}(A)$ , courant de compensation  $I_{fa}(A)$  et la tension du bus continu  $V_{dc}(V)$  après mise en marche du FAPH. Par ailleurs, en régime permanent.

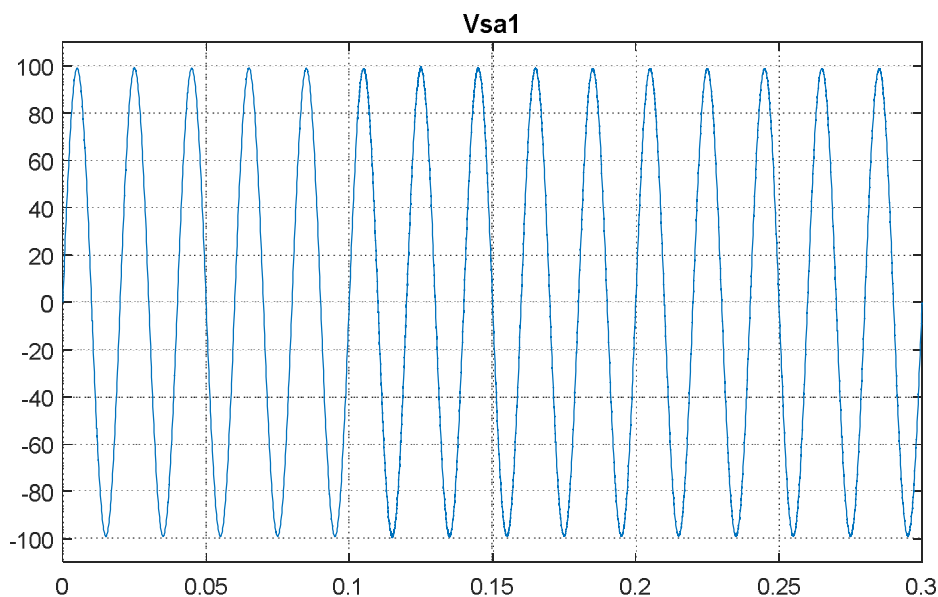


Figure III.9 : Forme d'onde de la tension de source  $V_{sa}$  en régime permanent

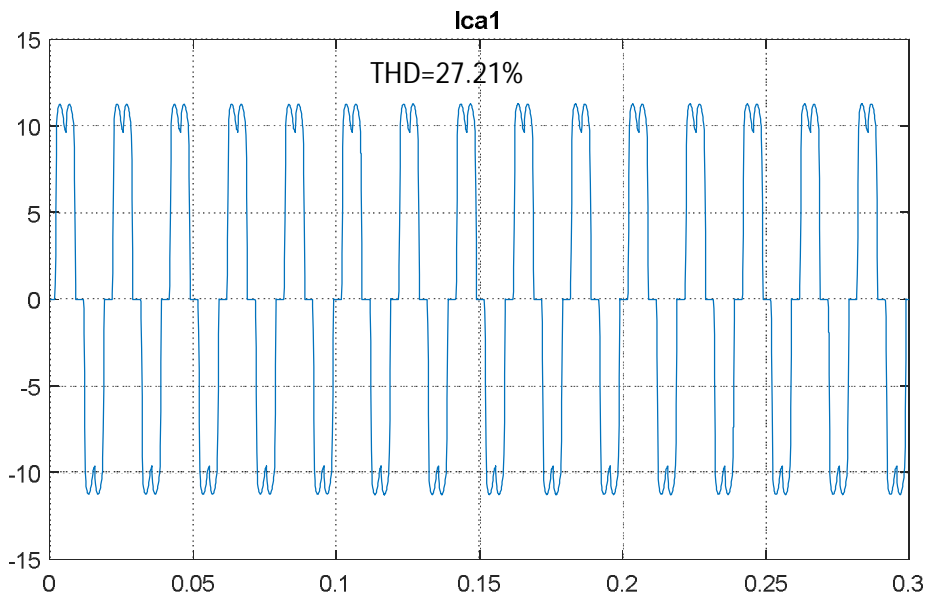


Figure III. 10 : Forme d'onde du courant de la charge  $I_{ca1}$  en régime permanent

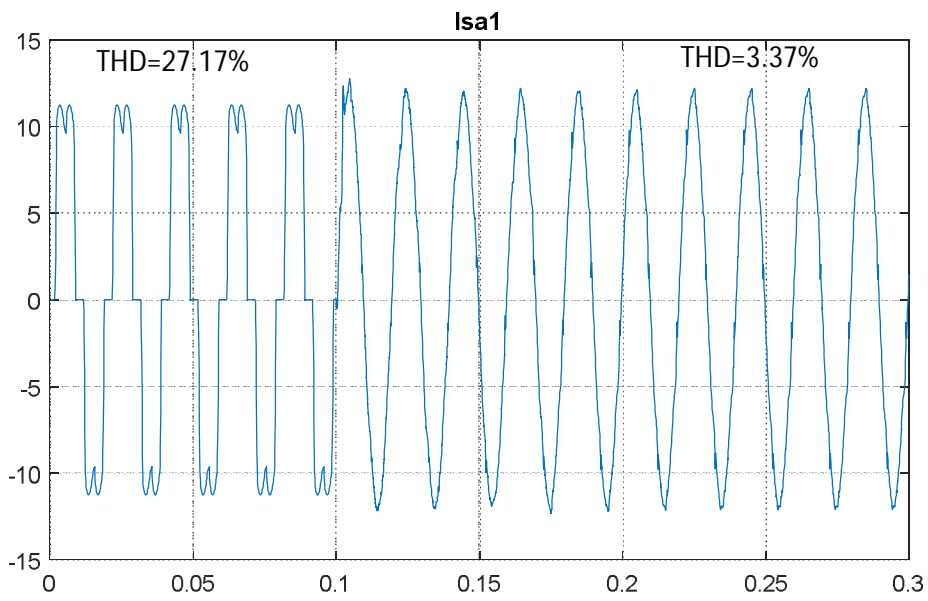


Figure III. 11: Forme d'onde du courant de la source  $I_{sa1}$  en régime permanent

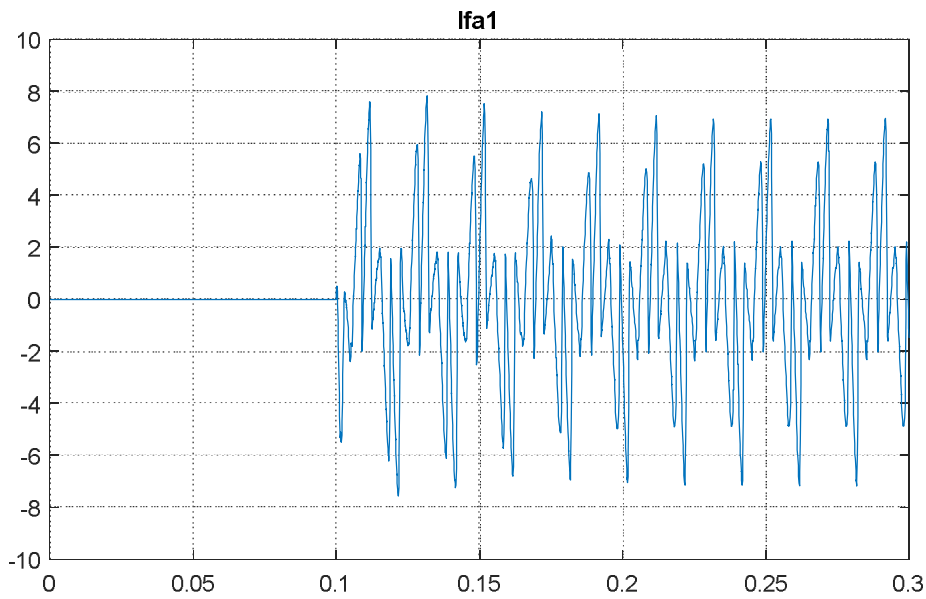


Figure III. 12: Forme d'onde du courant du filtre  $I_{fa1}$  en régime permanent

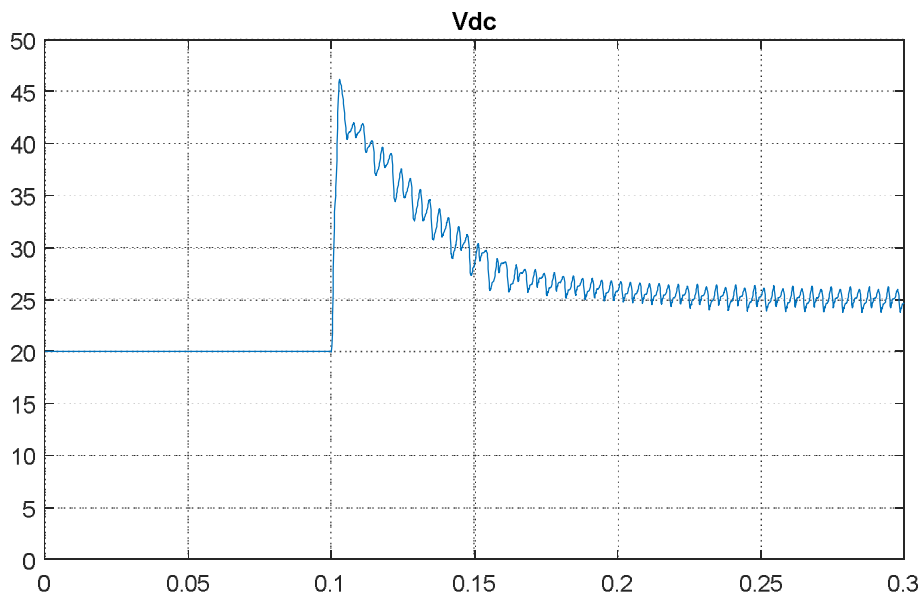


Figure III. 13: Forme d'onde de la tension du bus continu  $V_{dc}$  en régime permanent

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation concernant le comportement en régime permanent de la *commande p-q* appliquée au FAPH. Le système global est composé dans ce cas du réseau électrique, de la charge non linéaire et du FAPH. Les figures III. 9 -10-11-12-13 exposent le compte rendu relatif au comportement du FAPH en

régime permanent.

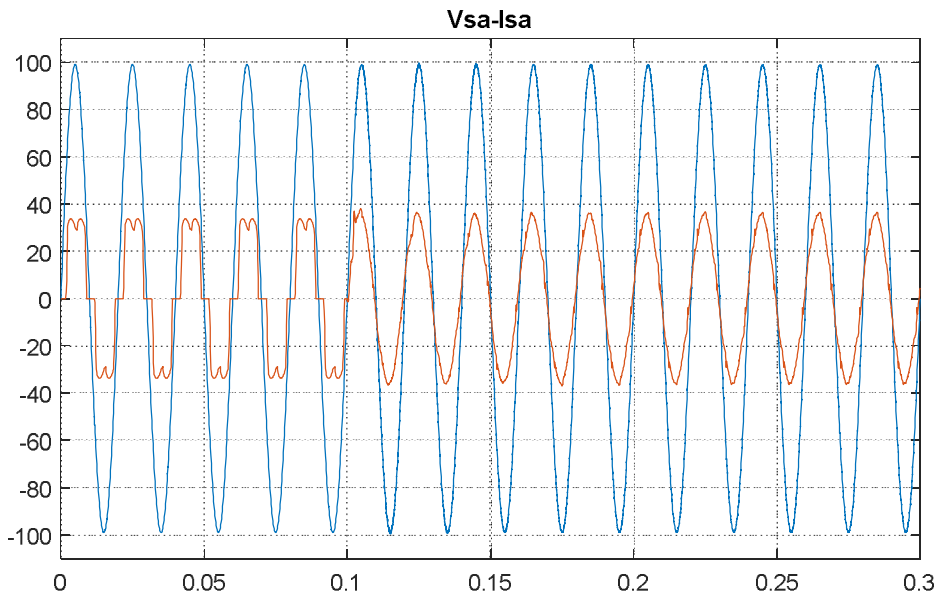


Figure III. 14: Forme d'onde du courant et tension du source  $I_{sa}, V_{sa}$  en régime permanent

En remarque que les formes d'onde du courant et tension du source  $I_{sa}, V_{sa}$  en régime permanent sont en phase (le déphasage est nulle) .

La mise en service du FAPH, il commence à injecter les courants de compensation  $I_f$  ce qui permet, aux courants du réseau de redevenir quasi-sinusoïdaux, avec un  $THD$  qui décroît de 27.17% à 3.37%, et en phase avec leurs tensions correspondantes. Par ailleurs, la tension  $V_{dc}$  du bus continu arrive à atteindre sa valeur de référence  $V_{dc\_ref}$  pratiquement fixée à 25 V au lieu de 142 V, après un transitoire de l'ordre de 17 ms ce qui atteste de la bonne dynamique de la commande  $p-q$  appliquée au FAPH.

### B/ Etude Dynamique :

Les figures III. 15-16-17-18-19 illustre, de haut en bas et pour la phase (a), Les Forme d'onde de la tension et du courant de source  $V_{sa}(V)$ ,  $I_{sa}(A)$ , courant de charge  $I_{ca}(A)$ , courant de compensation  $I_{fa}(A)$  et la tension du bus continu  $V_{dc}(V)$  après mise en marche du FAPH. Par ailleurs, en régime permanent.

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats de simulations concernant le comportement en régime transitoire du FAPH commande par la méthode  $p-q$  lors de la connexion du FAPH au système (réseau, charge non linéaire) suivi d'un double saut brusque de la charge non linéaire. Après mise en service du FAPH à l'instant  $t=0.1s$ , la charge non linéaire de type source de courant subit une augmentation brusque (passage de la valeur  $RD1$  à  $RD2$ ), à l'instant  $t=0.17s$ . Les résultats de simulations sont illustrés par les figures III. 15-16-17-18-19.

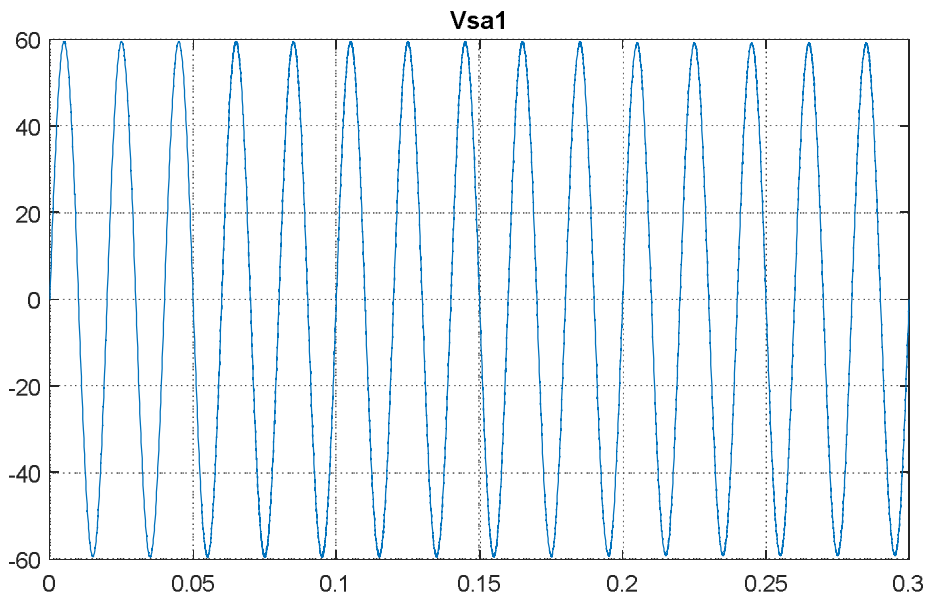


Figure III. 15: Forme d'onde de la tension de la source  $V_{sa1}$  en régime dynamique

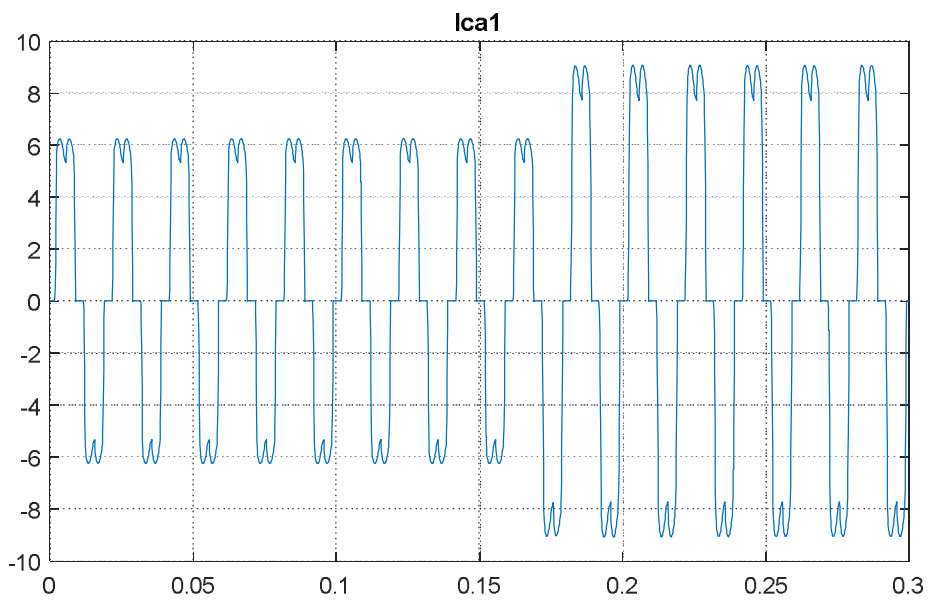


Figure III. 16: Forme d'onde du courant du charge  $I_{ca1}$  en régime dynamique

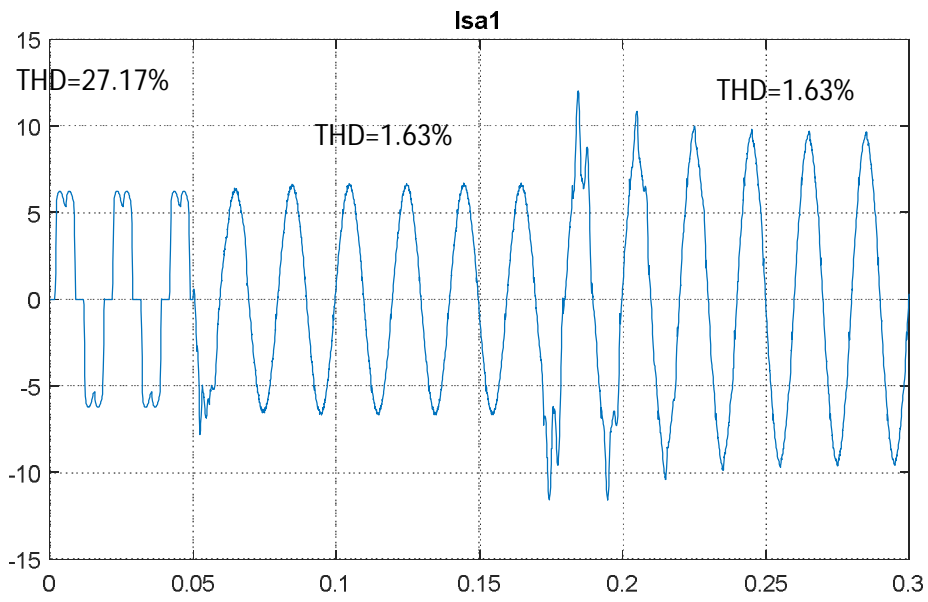


Figure III. 17: Forme d'onde du courant du source  $I_{sa1}$  en régime dynamique

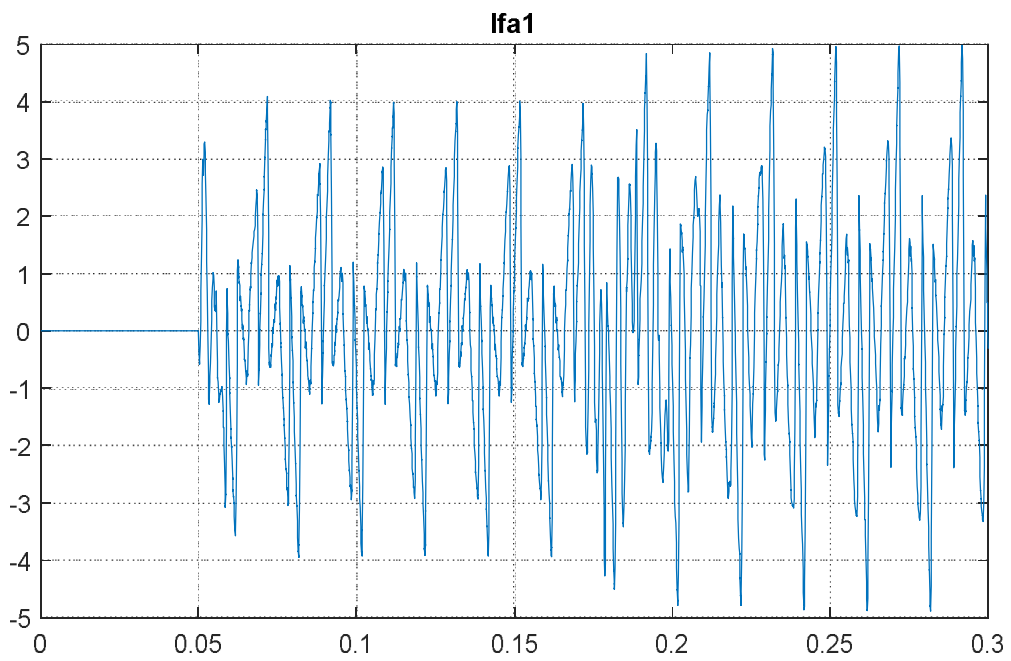


Figure III. 18: Forme d'onde du courant du filtre  $I_{fa1}$  en régime dynamique

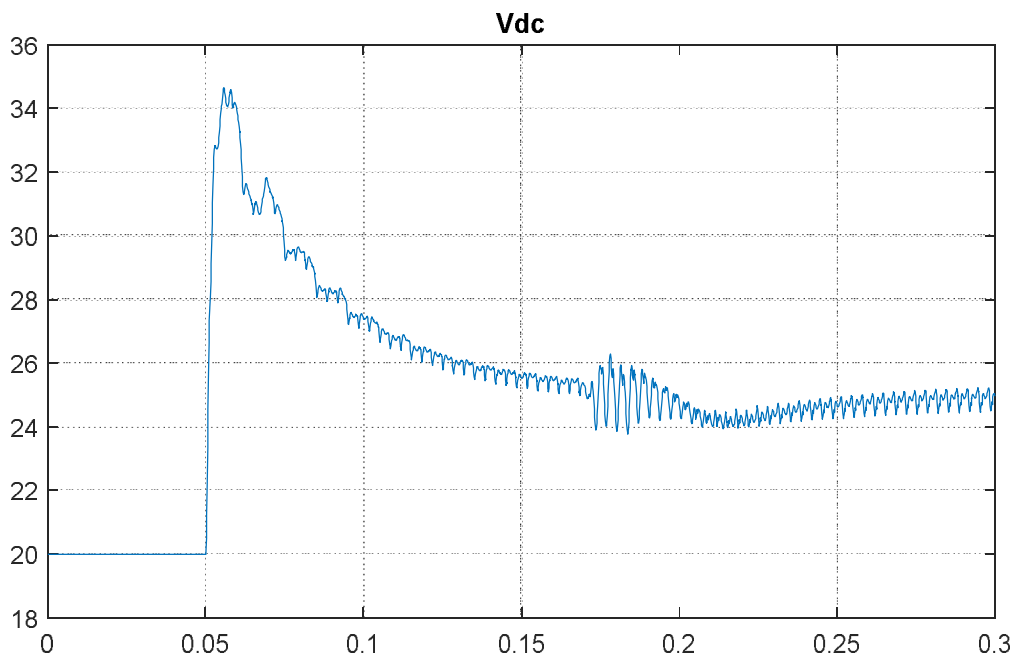


Figure III. 19: Forme d'onde du tension du filtre  $V_{dc}$  en régime dynamique

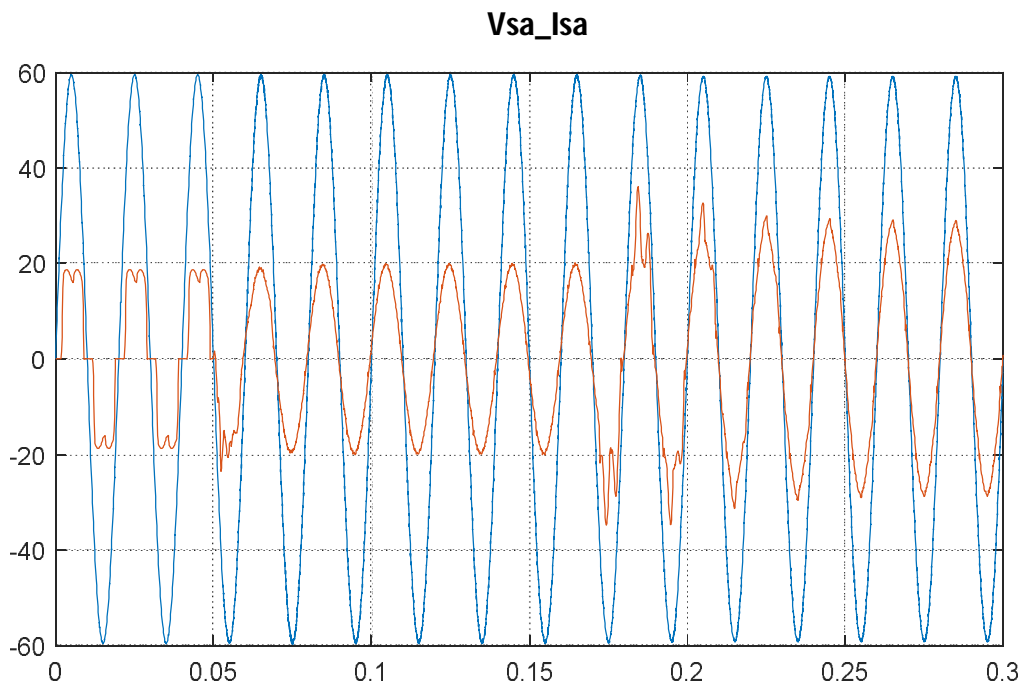


Figure III. 20: Forme d'onde du courant et du tension de source en régime dynamique

En remarque que les formes d'onde du courant et tension du source  $I_{sa}, V_{sa}$  en régime permanent sont en phase (le déphasage est nulle) .

D'après ces résultats de simulation que des la mise en service du FAPH, il commence instantanément à dépolluer le réseau en injectant des courants de compensation  $I_f$  dans ce dernier par conséquent le courant de source  $I_s$  devient sinusoïdal, et la tension  $V_{dc}$  du bus continue demeure bien régulée en se presque stabilisant a sa valeur de consigne  $V_{DC\_ref}$ . La robustesse de cette méthode de commande appliquée au FAP est prouvée par le fait que le courant de source  $I_{sa}$  reste quasi-sinusoïdal et inaffecté par les changements brusques de la charge non linéaire aux instants  $T_2=0.17s$ . En effet, nous remarquons que suite à ce saut de charge, l'appel en courant est instantané sans pour autant affecter sa forme sinusoïdale ni sa qualité. Il en est de même pour la tension du bus qui demeure, elle aussi, inaffectée suite au saut subit par la charge non linéaire. (Figure III. 17).

### III.5 .Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons étudié le type de filtre actif de puissance dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie d'un réseau électrique pollué par la présence des charges non linéaires. Il s'agit du Filtre Actif Parallèle Hybride (FAPH). Ce filtre hybride est constitué d'un filtre actif triphasé à structure tension placé en série avec un filtre passif  $LC$  triphasé accordé sur le 7<sup>ème</sup> harmoniques ; L'ensemble est connecté directement et sans transformateur au réseau.

Nous avons, ensuite, présenté le type de stratégies de commande du FAPP:

- La commande en puissance basée sur la méthode de puissance instantanées actives  $P$  et réactives  $Q$ : Commande  $p-q$ .

Le système complet (réseau électrique, FAPH, charge non linéaire) pour les stratégies de commande en simulation sous environnement Matlab /Simulink puis valide expérimentalement en exploitant le banc d'essai. Les travaux de simulations et d'expérimentalement ont été réalisés selon deux régimes de fonctionnement à savoir le régime permanent et le régime transitoire, et avec une charge non linéaires (source de courant). En conclusion, tous les résultats de simulations et d'expérimentation obtenues pour la stratégie de commande est très satisfaisants et montrent bien le bon fonctionnement, l'efficacité et la robustesse du FAPH et confirment la bonne réponse dynamique des stratégies de commande appliquées.

En revanche, il y a eu une légère différence concernant les taux de distorsions harmoniques (en simulation).

## *Conclusion Générale*

## ***Conclusion Générale:***

Ce travail a été consacré à l'étude théorique et à la simulation de nouvelles stratégies destinées à la commande de la topologie de filtres actifs parallèles à structure tension : le filtre hybride. Ces nouvelles stratégies s'appuient notamment sur la mise en œuvre, au niveau de l'isolation des harmoniques de courant, d'un filtre hautement sélectif, dit « filtre multi-variable ». Cette structure et sa commande a pour objectifs de compenser les courants harmoniques des Charges non linéaires connectées aux réseaux et d'améliorer les performances du filtrage tout en ayant recours à des stratégies de commande de complexités réduites.

Le premier chapitre a été consacré à la problématique des perturbations ou distorsions harmoniques générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques. L'augmentation régulière du nombre de dispositifs d'électronique de puissance utilisés dans Les systèmes électriques ne fait qu'accentuer ces perturbations. En outre, les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, comme par exemple les dispositifs de filtrage actif, objets de ce manuscrit. Nous avons alors Conclu ce premier chapitre par présenter, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage : filtres passifs, filtres actifs ou bien encore la combinaison des deux.

Le second chapitre est plus particulièrement dédié à l'étude des stratégies de commande proposées dans la littérature, à savoir les différents types de commande en courant, les différentes techniques d'extraction des harmoniques, les principaux régulateurs et en fin de compte les différentes techniques de commande.

Le troisième chapitre a été consacré au filtre actif parallèle hybride (FAPH) triphasé et plus particulièrement à l'optimisation de sa commande. Dans un premier temps, nous avons étudié théoriquement la topologie de filtre hybride triphasé, associée à Plusieurs nouvelles stratégies de commande. Le filtre hybride étudié est constitué d'un filtre actif triphasé à structure tension connecté en série avec un filtre passif triphasé de type LC, accordé sur l'harmonique 7. La première commande en puissance étudiée est basée sur la méthode des puissances instantanées active et réactive (p-q). Ensuite, nous avons étudié la commande en tension (d-q) et ce pour une charge non linéaire: se comportant par un Pont de diode débitant sur une résistance R en série avec une inductance L).

Les résultats de simulation obtenus du filtre hybride (FAPH) montre l'amélioration de la qualité de l'énergie en rendant les courants sinusoïdaux et en phase avec les tensions du réseau électrique.

## Références

- [01] **Omeiri.Amar.** "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant "Thèse Doctorat. Université Annaba 2007.
- [02] **G. Desquilbet, C. Foucher, P. Fauquembergue,** "Statistical analysis of voltage dips", Notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- [03] **NEKKAR Djamel.** "Contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés " ,Mémoire de magister .Université de Souk-Ahras 2013\_2014.
- [04] **V .Ignatova** " Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique Application aux creux de tension et à la pollution harmonique " , Thèse Doctorat. Université de Grenoble 2006.
- [05]**C. Fetha,** " Analyse et amélioration de l'indice de la non-symétrie de tension dans la qualité de l'énergie électrique", Thèse Doctorat. Université de Batna 2006.
- [06]**Cour master II.** "Principes de Compensation des harmoniques".
- [07]**A.L.D.Bermeo,** "Commandes avancées des systèmes dédiés à amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la tension", Thèse Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2006.
- [08]**B. Gattal,** " Méthode d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension", Mémoire de Magister. Université de Batna 2012.
- [09] **A.Arora,** "Solutions innovatrices pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique", Revue Qualité De L'énergie Electrique ABB3/1998.[10] **M. A. E. Alali,** « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ». Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur Strasbourg I, France, (2002).
- [11] **S. NIA,** « Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commandes analogique et numérique temps réel ». Thèse de doctorat de l'I.N.P.L, Nancy, France, (1996).
- [12] **M. C. Benhabib,** « Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension, Modélisation, simulation et validation expérimentale de la commande ». Thèse, Université Henri Poincaré, Nancy-France, (2004).
- [13] **L. Asiminoaei, S. Hansen,** C. Lascu and F. Blaabjerg, « Selective harmonic current mitigation with shunt active power filter ». EPE, Aalborg, (2007).
- [14] **J. H. Kim and S. K. Sul,** « Overmodulation strategy for a three-phase four-leg voltage source converter ». IEEE, Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting, (2003).
- [15] **M. A. S. Nejad, S. Pierfederici,** J. P. Martin and F.Meibody-Tabar, « Study of AC modulated hysteresis current controller for a single phase voltage source inverter ». IEEE, 37th Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea, (2006).
- [16] **M. A. S. Nejad, S. Pierfederici,** J. P. Martin and F. M. Tabar, « Modelling and design of an hybrid modulated hysteresis current controller application to a single phase voltage source inverter ». PESC, IEEE, 37th Power Electronics Specialists Conference, Jeju, Korea, (2006).
- [17] **G. H. Bode and D. G. Holmes,** « Load independent hysteresis current control of a three-level single phase inverter with constant switching frequency ». PESC, IEEE, 32nd annual Power Electronics Spécialistes Conférence, Vancouver, Canada, (2001).
- [18] **M. A. S. NEJAD,** « Architectures d'alimentation et de commande d'actionneurs tolérants aux défauts - régulateur de courant non linéaire à large bande passante ». Thèse de doctorat de l'I.N.P.L, Nancy, France, (2007).
- [19] **H. Akagi,** "Active and Hybrid Filtes for Power Conditioning ", IEEE ISIE, TU26 TU36. (2000)

- [20] **H. Akagi**, S. Srianthumrong, Y. Tamai. "Comparisons in circuit configuration and filtering performance between hybrid and pure shunt active filters". Industry Applications Conference (I.A.S), vol.2, p. 1195 - 1202. (2003).
- [21] **H. Akagi, K Isozaki**, "A Hybrid Active Filter for a Three-Phase 12-Pulse Diode Rectifier Used as the Front End of a Medium-Voltage Motor Drive", IEEE transactions on Power electronics, vol. 27, NO. 1, pp. 69-77, (2012).
- [22] **Singh, B. and V. Verma** "Indirect Current Control of Series Hybrid Filter: An Experimental Study". International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), vol.2, p. 1364-1369. (2006).
- [23] **B. Singh and V. Verma**, « An improved hybrid filter for compensation of current and voltage harmonics for varying rectifier loads ». Electric Power and Energy Systems, Vol. 29, pp. 312-321, (2007). B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra; "A new control approach to three-phase active filter for harmonics and reactive power compensation", IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 13, No. 1, pp. 133- 138. (1998).
- [24] **S. Srianthumrong**, H. Akagi, "A Medium-Voltage Transformer less AC/DC Power Conversion System Consisting of a Diode Rectifier and a Shunt Hybrid Filter ", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 39, n° 3, pp. 874-882, May/Jun. 2003.
- [25] **Sukin, P., S. Jeong-Hyoun**, K. Nam. "A new parallel hybrid filter configuration minimizing active filter size". Power Electronics Specialists Conference (PESC), vol. 1, p. 400-405. (1999).
- [26] **L. Chen, A. V. Jouanne**, « A comparison and assessment of hybrid filter topologies and control algorithms ». PESC, IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Ann. Meeting Conf, Vol. 2, pp. 545-570, (2001).
- [27] **Fujita, H., T. Yamasaki**, et al. "A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 15, n°2, p. 215-222. (2000).