

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département Electromécanique et Génie Mécanique



N° Ref :.....

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER

Spécialité : Electromécanique

Elimination des harmoniques du réseau électrique
et diminution de taux de distorsion (THD) par
l'application du filtre actif série

Réalisé par :

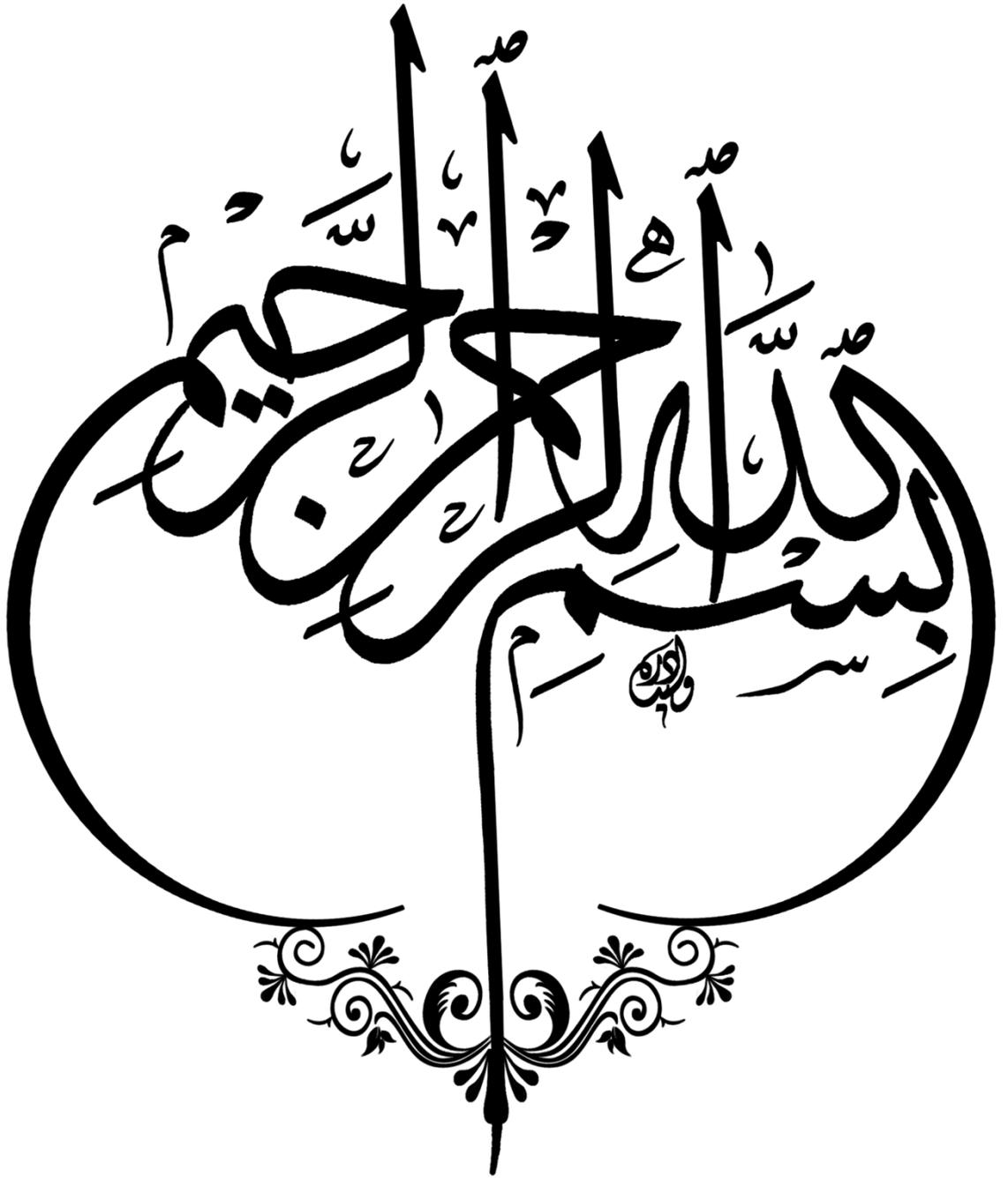
- SABAA Anes Abderrahmane
- KHELOUF Abderaouf

Soutenu devant le jury :

Mme. S. HADEF
M. B. SMAANI
Mme. S. DIB

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2023/2024



Remerciements

En premier lieu, nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance.

En second lieu, nos remerciements les plus sincères vont droit à nos parents qui n'ont pas cessé de nous encourager et nous soutenir tout au long du long parcours que furent nos études.

*Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur Madame **DIB.S**, pour avoir bien voulu nous encadrer et pour ses précieux conseils et orientations.*

On remercie également les enseignants de qualité qui nous ont montré la voie du savoir et du sérieux .

Aux enseignants qui sont aussi monsieur le président du jury et les membres examinateurs de ce modeste travail .

On ne saurait énumérer tous ceux qui ont aidés de près ou de loin nous à la réalisation de ce travail.

Sachez tous retrouver dans ces lignes l'expression de nos remerciements les plus sincères.

Dédicace

*Je dédie ce mémoire à mes chers parents que j'aime le plus au monde à toutes
personne ayant contribué pour que je sois ou j'en suis aujourd'hui Que
DIEU m'encourage à prouver l'aide qu'ils m'ont apportée durant toute ma
vie, et que ce travail soit pour eux la concrétisation de leur soutien. Sans
oublié aussi ma chère sœur , et mes frères ISSAM et BILAL ainsi que toute la
famille KHELOUF.*

KHELOUF Abderaouf



Dédicace

*À ma mère, que Dieu prolonge sa vie, À mon père, que Dieu ait son âme,
pour l'éducation qu'ils m'ont donnée, pour les sacrifices qu'ils ont faits pour
moi, et pour les principes qu'ils m'ont enseignés depuis mon enfance.*

*À mes frères,
Heythem, Mohammed, Imam*

*À ma sœur,
Zeyneb*

*À tous mes amis et collègues,
en particulier, Djamal, Mostache*

À tous ceux qui ont guidé mon parcours,

À tous ceux qui m'aiment,

À tous ceux que j'aime,

Je vous dédie ce modeste travail.

SABAA Anes Abderrahmane



Nomenclature

<i>F A S</i>	Filtre actif série.
<i>F A P</i>	Filtre actif parallèle.
<i>PLL</i>	(En anglais : Phase Locked Loop)
<i>UPQC</i>	(En anglais : Unified Power Quality Conditioner)
<i>MLI</i>	Modulation en largeur d'impulsions.
<i>THD</i>	(En anglais : Total Harmonic distorsion).
<i>GTO</i>	(En anglais: Gate turn off thyristor).
<i>IGBT</i>	(En anglais: Insolated gate bipolar transistor).
<i>MOSFET</i>	(En anglais: Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor)
<i>P</i>	La puissance active.
<i>Q</i>	La puissance réactive.
<i>S</i>	La puissance apparente.
<i>Fp</i>	Le facteur de puissance.
<i>h</i>	Rang de l'harmonique.
<i>Vdc</i>	Tension aux bornes du condensateur de l'onduleur.
<i>Cdc</i>	Condensateur du bus continue.
<i>is</i>	Courant de la source.
<i>if</i>	Courant de filtre.
<i>ich</i>	Courant de charge.

<i>R_{fp}</i>	Résistance de filtre passif.
<i>L_{fp}</i>	Inductance de filtre passif.
<i>L</i>	Inductance.
<i>C</i>	Capacité.
<i>R</i>	Résistance.
<i>V_s</i>	La tension simple du réseau.
<i>I_h</i>	Le courant harmonique.
<i>MATLAB</i>	(En anglais: Matrix laboratory)
<i>U</i>	La tension de phase.
<i>f_s</i>	La fréquence de source.
<i>V_c</i>	Tension continue du condensateur de stockage d'énergie.
<i>U_p</i>	Amplitude de la porteuse.
<i>V_h</i>	Valeur efficace des harmoniques de la tension injectée par le FAS.
<i>I_{ch}</i>	Courant efficace de la charge.
<i>BT</i>	Basse tension.
<i>MT</i>	Moyenne tension.
<i>HT</i>	Haute tension.
<i>Ch</i>	La valeur efficace de la composante harmonique de rang <i>h</i> .
<i>C₁</i>	La valeur efficace de la composante fondamentale.
<i>D</i>	Distorsion

Liste des figures

Figure 1.1 : Fluctuation de la fréquence.

Figure 1.2 : Creux de tension.

Figure 1.3 : Coupure de tension.

Figure 1.4 : Papillotement de tension.

Figure 1.5 : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.

Figure 1.6 : Tension distordue. (a) : Tension, (b) : Composantes harmonique.

Figure 1.7 : Spectre des harmoniques.

Figure 2.1 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage.

Figure 2.2 : Filtre passive.

Figure 2.3 : Filtre passive amorti.

Figure 2.4 : Schéma simplifié d'un montage dodécaphasé série.

Figure 2.5 : Filtre passif série.

Figure 2.6 : Filtre passif parallèle.

Figure 2.7 : Filtre actif parallèle.

Figure 2.8 : Filtre actif série.

Figure 2.9 : Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC).

Figure 2.10 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

Figure 2.11 : Filtre actif série avec filtre passif parallèle.

Figure 2.12 : Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

Figure 3.1 : Filtre actif série avec une charge non-linéaire.

Figure 3.2 : FAS raccordé à l'entrée d'une charge non-linéaire. (a) Représentation unifilaire du système. (b) Circuit équivalent, (c) Circuit équivalent pour la fondamentale, (d) Circuit équivalent pour les harmoniques.

Figure 3.3 : Structure générale du filtre actif série.

Figure 3.4 : Onduleur de tension triphasé.

Figure 3.5 : Schéma de modélisation du filtre de sortie.

Figure 3.6 : Diagramme représentant le gain du filtre de sortie.

Figure 3.7 : Méthode d'identification basée sur l'emploi d'un système à base de PLL.

Figure 3.8 : Contrôle par hystérésis. (a) : Principe de contrôle, (b) : Commande des interrupteurs.

Figure 3.9 : Principe de commande des courants par MLI.

Figure 3.10 : Schéma de la régulation de la tension du F.A.S.

Figure 3.11 : Schéma simplifié de régulation de la tension du F.A.S.

Figure 3.12 : Rapport de puissances de F.A.S par rapport à la charge à protéger pour des creux de tensions monophasés.

Figure 3.13 : Rapport de puissances de F.A.S par rapport à la charge à protéger pour des creux de tensions biphasés.

Figure 3.14 : Rapport de puissances de F.A.S par rapport à la charge à protéger pour des creux de tensions triphasés.

Figure 4.1 : Structure générale du filtre actif série étudié.

Figure 4.2 : Compensation des tensions harmoniques par le FAS.

Figure 4.3 : Valeurs de THD des tensions de la source et de la charge.

Figure 4.4 : Compensation de creux de tension monophasé.

Figure 4.5 : Compensation des creux de tensions biphasés.

Figure 4.6 : Compensation des creux de tensions triphasés.

Figure 4.7 : Compensation de surtension monophasée.

Figure 4.8 : Compensation de surtensions biphasées.

Figure 4.9 : Compensation de surtensions triphasées.

Figure 4.10 : Compensation du déséquilibre en tension.

Figure 4.11 : Compensation de toutes les perturbations en tension.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensible.

Tableau 1.2 : Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques.

Tableau 1.3: Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension (CEI 61000-2-2).

Tableau 1.4 : Limites des composantes harmoniques du courant (CEI 61000 3-2).

Tableau 1.5 : Limites d'émission des courants harmoniques Pour l'étape I (CEI 61000-3-4).

Tableau 4.1 : Valeurs des éléments construisant la structure du FAS étudiée.

Sommaire

Remerciements	I
Dédicace	II
Nomenclature	IV
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	IX
Sommaire	X
Introduction générale	01

Chapitre I: Perturbations des réseaux électriques

I.1	Introduction	03
I.2	Qualité de l'énergie électrique	03
I.2.1	Identification des problèmes affectant la qualité de l'énergie	04
I.3	Perturbations électriques et leurs origines	04
I.3.1	Fluctuations de la fréquence à 50 Hz	05
I.3.2	Variations de l'amplitude de la tension	06
I.3.2.1	Creux et coupures de tension.....	06
I.3.2.1.1	Origines des creux et coupures de tension	07
I.3.2.1.2	Effets et conséquences des creux de tension	07
I.3.2.2	Surtensions temporaires ou transitoires	08
I.3.2.2.1	Conséquences des Surtensions	10
I.3.2.3	Fluctuations de tension ou Papillotement.....	10
I.3.3	Déséquilibre du courant et de tension.....	11
I.3.3.1	Origines du déséquilibre et Conséquences.....	12
I.3.4	Perturbations Harmoniques et inter harmoniques.....	13
I.3.4.1	Origine des perturbations harmoniques.....	14

I.3.4.2	Inter et infra harmoniques	14
I.3.4.3	Conséquences des harmoniques.....	15
I.3.4.4	Caractérisation des perturbations harmoniques.....	17
I.3.4.5	Normes concernant les perturbations harmoniques.....	20
I.3.5	Inter harmoniques	24
I.4	Conclusion.....	24

Chapitre II: Solutions de dépollution harmonique

II.1	Introduction.....	25
II.2	Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique.....	25
II.2.1	Solutions possibles pour réduire les harmoniques.....	26
II.2.2	Solutions de dépollution des réseaux électriques	26
II.2.2.	Solutions traditionnelles de dépollution	27
II.2.2.	Rééquilibrage des courants et des tensions.....	27
II.2.2.	Compensation des creux et des interruptions.....	28
II.2.2.	Compensation de la puissance réactive	28
II.2.2.	Compensation des courants harmonique.....	28
II.2.2.	Solutions modernes de dépollution.....	32
II.2.2.	Redresseur à MLI.....	32
II.2.2.	Filtres actifs.....	33
II.3	Conclusion.....	37

Chapitre III: Filtre actif série

III.1	Introduction.....	38
III.2	Filtre actif série (FAS).....	38
III.3	Principe de fonctionnement du FAS.....	39
III.4	Modèle équivalent du filtre actif série.....	40
III.5	Structure générale du filtre actif série.....	41

III.5.1	Etude de la partie puissance.....	42
III.5.1	Onduleur de tension.....	42
III.5.1	Elément de stockage d'énergie.....	43
III.5.1	Filtre de sortie.....	45
III.5.1	Transformateurs d'injection	48
III.5.2	Etude de la partie contrôle-commande.....	48
III.5.2	Méthodes d'identification des tensions perturbatrices.....	48
III.5.2	Méthode d'identification basée sur l'emploi d'un système à base de PLL.....	49
III.5.2	Commande de l'onduleur.....	50
III.5.2	Régulation de la tension du filtre actif série.....	52
III.6	Etude de la puissance apparente du FAS.....	54
III.6.1	Compensation des courants harmoniques.....	56
III.6.2	Compensation des creux de tensions monophasés	57
III.6.3	Compensation des creux de tensions biphasés.....	59
III.6.4	Compensation des creux de tensions triphasés	60
III.7	Conclusion.....	62

Chapitre IV : Simulation et résultats

IV.1	Introduction.....	63
IV.2	Présentation du logiciel.....	63
IV.3	Paramètres de système.....	63
IV.4	Structure générale du filtre actif série étudié.....	64

IV.5	Compensation des tensions harmoniques	65
IV.6	Compensation des creux de tensions.....	67
IV.7	Compensation de surtensions.....	69
IV.8	Compensation du déséquilibre en tension.....	71
IV.9	Compensation de toutes les perturbations en tension.....	72
IV.11	Conclusion.....	72
	Conclusion générale	73
	Références bibliographiques	74
	Résumé	77

Introduction générale

La demande quantitative d'électricité a connu ces dernières années un accroissement considérable. L'augmentation des usagers de l'électricité dans la vie quotidienne et l'exigence d'un plus grand confort sont les causes principales. Parallèlement, dans les domaines tertiaires et industriels, l'apparition des matériels de plus en plus sophistiquée utilisant l'électronique de puissance et l'informatique, a provoqué l'émergence d'une exigence plus qualitative : le kwh électrique ne doit plus seulement être immédiatement disponible et en quantité suffisante, mais doit aussi être de qualité, c'est à dire propre et fiable. C'est un besoin nouveau dont la satisfaction constitue pour les distributeurs d'énergie électrique un réel défi technique [1]. Les récents développements dans l'industrie de l'électronique de puissance ont conduit à une considérable croissance de la puissance pouvant être manipulée par les dispositifs semi-conducteurs. Cependant, la tension maximale supportée par ces dispositifs demeure le major obstacle dans les applications hautes et moyennes tensions [2].

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes [3]. Il est évident que la qualité de cette énergie est devenue un sujet stratégique pour les raisons suivantes :

- Généralisation d'équipements sensibles aux perturbations de la tension et/ou eux même générateurs de perturbations.
- Nécessité économique d'accroître la compétitivité pour les entreprises.
- Réduction des coûts liés à la perte de continuité et à la non-qualité.
- Coût des perturbations (coupure, harmonique,...) est élevé [2].

Donc, le but est de fournir aux clients une forme de tension idéale (onde sinusoïdale) qui a par définition les caractéristiques suivantes :

- Amplitude constante au niveau exigé.
- Fréquence constante et tensions équilibrées en cas du triphasé.

Naturellement, ce n'est pas toujours possible, à cause des variations du système en raison des incidents inévitables qui peuvent temporairement affecter l'opération, ex : court-

circuit [4] et aussi des charges non linéaires provoquant des harmoniques de courant qui de leur tour induisent des tensions harmoniques par l'intermédiaire de l'impédance du réseau électrique.

Pour diminuer ou supprimer ces perturbations et ainsi améliorer la qualité de l'énergie distribuée, plusieurs solutions existent parmi ces solutions les dispositifs de filtrage actif série.

Le filtre actif série est une solution efficace pour atténuer les perturbations harmoniques dans le réseau électrique. Il fonctionne en injectant des courants de compensation de phase opposée aux harmoniques présentes dans le système, ce qui permet de les annuler et de maintenir le niveau de tension dans les limites acceptables.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en l'étude et simulation d'un filtre actif série comme technique adaptative de compensation des harmoniques de tension afin de protéger les charges sensibles à ces harmoniques.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à la description des perturbations en courant et en tension pouvant intervenir dans un réseau électrique. Les origines et les conséquences de ces perturbations seront analysées. Deux normes internationales concernant les limites des harmoniques de courant injecté dans un réseau électrique sont présentées.

Dans le second chapitre, nous présenterons les différentes solutions pour éliminer les perturbations harmoniques du réseau électrique, et nous l'avons divisé en deux parties : solutions traditionnelles et modernes.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du filtre actif série comme solution adaptatif de compensation des harmoniques de tension provenant du réseau.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté une analyse des résultats de simulation du filtre actif en cascade dans le réseau électrique pollué, et nous discuterons les résultats de simulation réalisés par MATLAB Simulink .

A la fin de ce mémoire le lecteur trouvera une conclusion générale lui permettant de retenir ce qui est essentiel.

Chapitre I:

Perturbations des réseaux électriques

I.1 Introduction :

Les réseaux électriques sont essentiels pour la distribution de l'énergie nécessaire au fonctionnement de nos équipements et appareils quotidiens. Cependant, ces réseaux peuvent être sujets à divers types de perturbations qui affectent la qualité de l'énergie transmise. Ces perturbations peuvent prendre plusieurs formes, telles que des variations de tension, des déséquilibres du système triphasé, des fluctuations de fréquence, ou encore la présence d'harmoniques.

Ces formes de perturbations ont des effets très néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements importants jusqu'à la destruction totale des machines tournantes.

Ces perturbations peuvent être classées sur deux catégories, qui sont :

- Des perturbations causées par les courants perturbateurs, tel que les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et les courants réactifs.
- Des perturbations causées par les tensions perturbatrices, telle que les tensions harmoniques et les tensions déséquilibrées.

Ce premier chapitre comporte deux parties : Dans la première partie, nous parlons de la qualité de l'énergie électrique et Identification des problèmes affectant sa qualité. La seconde partie on cite les différentes origines, les effets et conséquences des perturbations dans le réseau électrique et la présentation des normes internationale.

I.2 Qualité de l'énergie électrique :

Dans un premier temps, on introduit les bases théoriques pour étudier les perturbations liées à l'onde électrique, la théorie généralisée de l'énergie électrique, l'origine et les effets des perturbations électriques qui font l'objet de cette thèse (les perturbations harmoniques et les perturbations sur la valeur efficace de la tension réseau) et finalement un résumé des principales normes concernant la qualité de l'énergie [5].

La qualité de l'énergie électrique, au niveau de la distribution, se réfère largement à maintenir une tension sinusoïdale, d'une amplitude et fréquence nominales. De ce fait la notion « qualité de l'énergie » est devenue très importante, en raison de l'utilisation à

grande échelle de systèmes à base d'électronique de puissance à la fois par les utilisateurs et les fournisseurs [6]. C'est le concept de maintenir les formes d'onde de la tension et du courant sinusoïdale avec une fréquence constante, par les systèmes de transmission, distribution et de production de l'énergie électrique, et habituellement pris pour signifier des formes d'onde des tensions équilibrées et non distordues [7]. L'équation correspondant à l'interprétation la plus correcte est donc :

$$\text{Qualité de l'énergie électrique} = \text{Continuité de la tension} + \text{Qualité de la Tension}$$

I.2.1 Identification des problèmes affectant la qualité de l'énergie :

Les perturbations de tension sont la cause la plus fréquente d'un large éventail de perturbations dans les systèmes d'alimentation industriels et commerciaux [6]. Les perturbations peuvent être transitoires, de courte durée, de longue durée ou périodiques, est classée comme un problème de la qualité d'énergie. Toutefois, les problèmes les plus souvent rencontrés sont [7]:

- Déséquilibre du système triphasé
- Creux de tension de courte durée
- Fluctuations de tension (ou flicker)
- Distorsion harmonique
- Coupures de courte durée
- Surtensions de courte durée
- Perturbations transitoires

I.3 Perturbations électriques et leurs origines :

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont la fréquence est de 50 Hz ou de 60 Hz. . les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres [8] :

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde : Qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- Le déséquilibre : La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tension constituant un système alternatif triphasé qui possède quatre caractéristiques principales distinctes de perturbations : fréquence, forme d'onde et dissymétrie, amplitude [9].

- **Fluctuations de la fréquence à 50 Hz :** elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles. par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport [10];
- **Modification de la forme d'onde :** cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.
- **Dissymétrie du système triphasé :** que l'on appelle déséquilibre ; C'est la situation où les trois tensions du système triphasé ne sont pas égales en amplitude ou ne sont pas déphasées de 120° les unes par rapport aux autres [10].
- **Variations de l'amplitude de la tension:** il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de

Variations rapides de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques [8].

On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

I.3.1 Fluctuations de la fréquence à 50 Hz :

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques [9]. Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension [11]. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes. Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène [12].

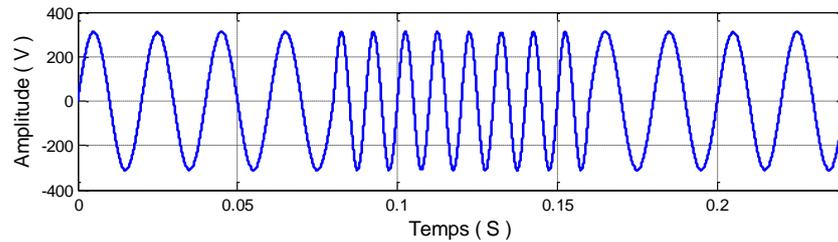


Figure 1.1 : Fluctuation de la fréquence

I.3.2 Variations de l'amplitude de la tension :

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie.

I.3.2.1 Creux et coupures 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 pendant une durée allant de 10ms jusqu'à quelques secondes [13] [9]. Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Une coupure de tension quand elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10ms [11].

Ils peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges [12]). Il s'agit d'événements aléatoires imprévisibles pour la plupart des cas (Fig. 1.2). Les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur supérieur à 90% (Fig. 1.3).

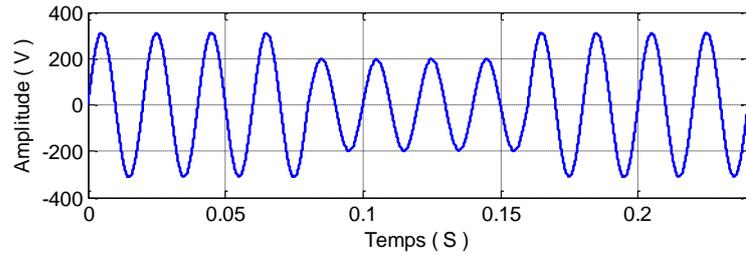


Figure 1.2 : Creux de tension

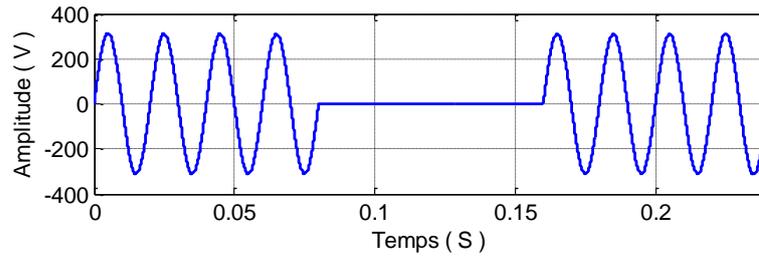


Figure 1.3 : Coupure de tension

I.3.2.1.1 Origines des creux et coupures de tension :

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps. Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles [13]. Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension, qu'il soit sur le réseau de transport (HT), sur le réseau de distribution (BT et MT) ou sur l'installation elle-même [14][15].

I.3.2.1.2 Effets et conséquences des creux de tension :

Les creux et les coupures de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de nombreuses installations industrielles, tertiaires et domestiques raccordées au réseau. En effet, ce type de perturbation est la cause la plus fréquente de problèmes de qualité d'énergie qui peut se traduire par des conséquences néfastes. Le Tableau 1.1 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [14][16].

Tableau 1.1 : Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensible

Type d'équipements	Conséquences néfastes
Systèmes d'éclairage	Moins de luminosité, extinction et réallumage.
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt ou mauvais fonctionnement des équipements.
Dispositifs de protection	Déclenchement et ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension.
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur.
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> ➤ En mode onduleur : destruction des protections ➤ En mode redresseur : ralentissement de la machine.
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur.

I.3.2.2 Surtensions temporaires ou transitoires :

En électrocinétique, un réseau électrique possède en général une tension normale : on parle aussi de tension nominale. En basse tension, cette tension nominale peut être par exemple de 230 V entre phase et neutre. En moyenne tension, celle-ci est normalisée à 20 kV (entre phases) et 11,5 kV (entre phase et terre). Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension [14]. Les surtensions sont une des causes possibles de défaillances d'équipements électriques ou électroniques, bien que ceux-ci soient de mieux en mieux protégés contre ce type d'incident. Les surtensions sont de trois natures [13] :

- Temporaires à fréquence industrielle;
- De manœuvre ;
- D'origine atmosphérique (foudre).

Elles peuvent apparaître :

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre) ;
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre).

Tableau 1.2 : Les quatre types de surtensions présentes sur les réseaux électriques

Surtension	Durée	Raideur du front de montée, ou fréquence	Amortissement en fonction de la distance
Atmosphérique	Très courte (μ S)	Très élevée (1000kV/ μ S)	Fort
Décharge électrostatique	Très courte (nS)	Elevée (\approx 10 Mhz)	Très fort
Manœuvre	Courte (mS)	Moyenne (1 à 200 kHz)	Moyen
Temporaire	Long (S), voir très longues (h)	Fréquence du réseau	Nul

Des moyens de protection contre les surtensions existent et sont efficaces. Pour protéger il convient d'installer :

- Un parasurtenseur, qui protégera l'installation des surtensions émanant du réseau (fluctuations, etc.) et qui s'installe en aval du parafoudre.
- Une prise ou un bloc multiprise parafoudre, qui protégera directement l'appareil qu'il relie au secteur.
- Un parafoudre, qui protégera l'installation de la surtension créée par la foudre et évitera par conséquent l'endommagement des appareils électriques de l'habitat. Le parafoudre s'installe dans le tableau électrique.

I.3.2.2.1 Conséquences des Surtensions :

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence:

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...);
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées);
- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels);
- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible;
- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par:
 - La foudre essentiellement;
 - Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue [14] [13].

I.3.2.3 Fluctuations de tension ou Papillotement :

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires, sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc... [12]. 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 situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes [9].

Elles sont en particulier dues à la propagation sur les lignes du réseau de courants d'appel importants. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure (1.4).

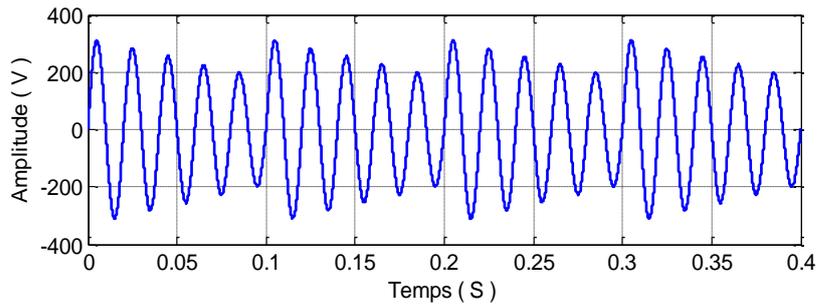


Figure 1.4 : Papillotement de tension

I.3.3 Déséquilibre du courant et de tension :

L'outil principal pour étudier les déséquilibres sont les *composantes symétriques*. Cette théorie a été développée par Charles L. Fortescue à la fin de 1913 [5].

Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions [9].

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de des équilibres du système triphasé (figure 1.5) [11]. Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus a la circulation de courants non équilibré dans les impédances du réseau.

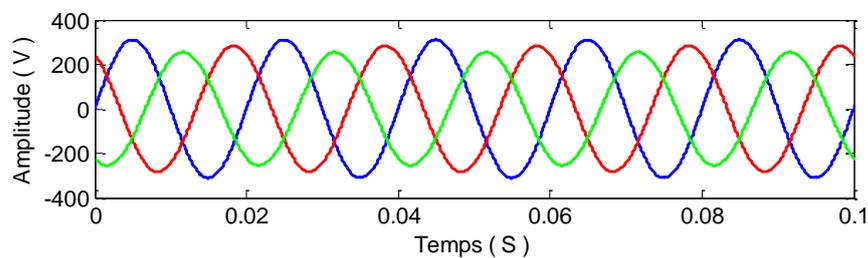


Figure 1.5 : Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension

I.3.3.1 Origines du déséquilibre et Conséquences :

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de 120° . Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont.

Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre [13]. Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [12].

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase [13]. Dans le domaine des protections contre les risques électriques, ce type de perturbation est également gênant, car les déséquilibres de courant limitent l'utilisation du montage de Nicholson (mise en commun de quatre transformateurs de courant) pour détecter des courants résiduels dus à un défaut d'isolement [17]. On caractérise les asymétries d'amplitude et de déphasage des tensions triphasées en régime permanent par deux indices, soient : le taux de déséquilibre inverse et le taux de déséquilibre homopolaire [18] :

- **Le taux de déséquilibre de tension inverse** : est défini, suivant la méthode des composantes symétriques, comme étant le rapport existant entre le module de la composante inverse du fondamental de la tension et celui de la composante directe :

$$\delta^- = \frac{V_1^-}{V_1^+} \quad (1.1)$$

- **Le taux de déséquilibre de tension homopolaire** : est défini comme étant le rapport du module de la composante homopolaire fondamentale de la tension et celui de la composante directe :

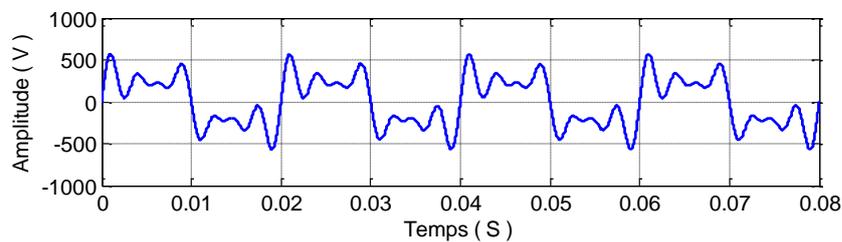
$$\delta^0 = \frac{V_1^0}{V_1^+} \quad (1.2)$$

I.3.4 Perturbations Harmoniques et inter harmoniques :

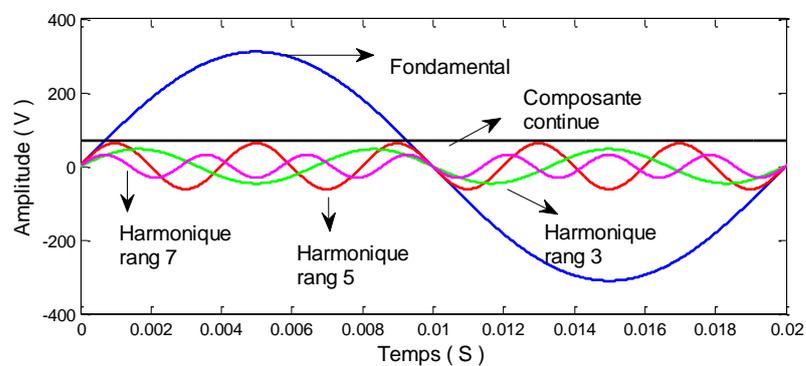
Du point de vue de la qualité de l'énergie on entend par perturbation électrique tout écart de la tension réseau par rapport à sa valeur et à sa forme nominale [5].

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entier de celle du fondamental. Montre la superposition de l'harmonique d'ordre 3 sur un courant fondamental de fréquence (50H). La principale source de la présence des harmoniques dans le réseau électrique est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors. Les inters harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau.

L'apparition des inters harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande [19] [11].



(a)



(b)

Figure 1.6 : Tension distordue. (a) : Tension, (b) : Composantes harmonique

I.3.4.1 Origine des perturbations harmoniques :

En principe, les harmoniques proviennent de charges dont la caractéristique tension/courant n'est pas linéaire, ainsi que les convertisseurs électroniques de puissance, les entraînements de moteurs, les alimentations à découpage, les fours à arc, les machines à souder, etc.

Chaque système contient des composants électroniques quelle que soit sa puissance, produit des courants riches en harmoniques dont le spectre dépend beaucoup de la nature de la charge. Ces courants harmoniques circulent à travers les impédances du réseau et par conséquence créent des tensions harmoniques qui peuvent perturber le fonctionnement des autres utilisateurs raccordés à la même source [20].

L'impédance de la source aux différentes fréquences harmoniques a donc un rôle fondamental dans la sévérité de la distorsion harmonique en tension [14]. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques.

Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc... [13].

I.3.4.2 Inter et infra harmoniques :

❖ **Inter harmoniques** : Ce sont des composantes sinusoïdales avec des fréquences qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle de la fondamentale [14].

Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du réseau. L'apparition des inter harmoniques est en augmentation et leurs origines principales sont les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande [13].

❖ **Infra harmoniques** : Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle de la fondamentale.

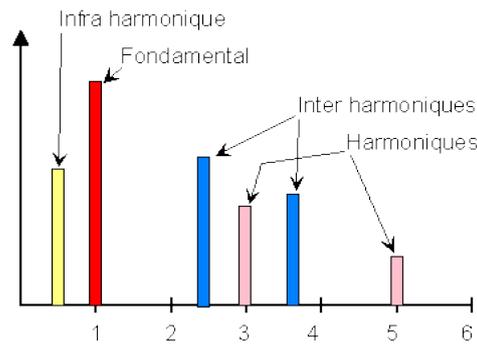


Figure 1.7 : Spectre des harmoniques

I.3.4.3 Conséquences des harmoniques :

Les courants harmoniques se propagent dans le réseau électrique, déforme l'allure du courant de la source et polluent les consommateurs alimentés par ce même réseau. Ils peuvent occasionner des incidents au niveau de l'appareillage du client et donner lieu à des surcoûts de production d'énergie importants. On peut classer les effets engendrés par les harmoniques en deux type: les effets instantanés et les effets à terme [11].

a. Effets instantanés :

Les Effets instantanés apparaissent immédiatement dans certains appareillages.

- **Défauts de fonctionnement de certains équipements électriques** : En présence d'harmoniques, la tension et le courant peuvent changer plusieurs fois de signe dans une demi-période. Les appareils dont le fonctionnement est basé sur le passage à zéro des grandeurs électriques peuvent être affectés.
- **Troubles fonctionnels des micro-ordinateurs** : Les Effets sur ces équipements peuvent se manifester par la dégradation de la qualité de l'image et par des couples pulsatoires des moteurs d'entraînement de disque.
- **Erreurs dans les appareils de mesure** : Certains appareils de mesure et les compteurs d'énergie à induction présentent des dégradations de mesure et des erreurs de lecture supplémentaires en présence d'harmoniques.

- **Vibrations et bruits** : Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machine tournantes) [11].

b. Effets à terme :

Ils se manifestent après une exposition plus ou moins longue à la perturbation harmonique. L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il conduit à une fatigue prématurée du matériel, des lignes et amènent un déclasserement des équipements.

- **Echauffement des câbles et des équipements** : Ces Effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du suréchauffement du neutre et les matériels bobines comme les transformateurs ou les moteurs.
- **Echauffement des condensateurs** : L'échauffement est cause par les pertes dues au phénomène d'hystérésis dans la di électrique. Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, qu'elles soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence d'harmoniques. Ces échauffement peuvent conduire au claquage
- **Echauffement du aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs** : Echauffement cause par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques (cages, amortisseurs, circuits magnétiques) à cause des différences importantes de vitesse entre les champs tournants inducteurs harmoniques et le rotor. Les harmoniques génèrent aussi des pertes supplémentaires dans les transformateurs, par Effet Joule dans les enroulements, accentuées par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.3.4.4 Caractérisation des perturbations harmoniques :

Afin de caractériser les perturbations harmoniques, diverses grandeurs et paramètres ont été définies, dans ce qui suit nous allons indiquer les plus employés. Le taux global de distorsion harmonique (THD) et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance réactive [11].

a. Le taux de distorsion harmoniques (THD) :

Notre étude se limite au cas où la source de tension est sinusoïdale et où le courant absorbe par la charge est entaché de composantes harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de courant déformée. Il est donné par l'expression suivante [14]:

❖ Taux harmonique de rang h :

$$G_h = \frac{C_h}{C_1} * 100 \% \quad (1.3)$$

Où C_h représente la valeur efficace de la composante harmonique de rang h , C_1 représente la valeur efficace de la composante fondamentale.

❖ Taux global de distorsion harmonique :

Ce taux est estimé selon la relation suivante [14]:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^N \frac{C_h^2}{C_1^2}} * 100 \% \quad (1.4)$$

Habituellement on prend N égal 50.

Deux taux globaux de distorsion harmonique sont distingués :

- le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD_I
- le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD_V

Le THD_I ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. S'exprime pratiquement sous la forme :

$$THD_I (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} \quad (1.5)$$

Et le THD_V s'exprime pratiquement sous la forme [17] :

$$THD_V (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} \quad (1.6)$$

Avec I_{c1} la valeur efficace du courant fondamental et I_h les valeurs efficace des différentes harmoniques du courant. Le domaine des fréquences qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 et 2000Hz. Soit de l'harmonique de rang 2 jusqu'à l'harmonique de rang 40. Il est à signaler aussi que l'amplitude des harmoniques décroît généralement avec la fréquence [11].

b. Le facteur de puissance :

Pour la transmission efficace de l'énergie d'une source à une charge, on doit maximiser la puissance moyenne [23]. En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties: active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante [11]:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.7)$$

La puissance réactive Q est associée au courant fondamental. La puissance déformante D est due aux harmoniques de courant (avec $\sqrt{I_c^2 = 3Vp^2 + I_{c1}^2}$, où I_c est la valeur efficace du courant de la charge).

Tous les dispositifs électriques sont dimensionnés selon la tension et le courant nominal. Le facteur de puissance caractérise le rendement de ces dispositifs, où une faible valeur du ce facteur s'exprime par un mauvais fonctionnement de ces équipements.

En ce qui concerne le signal sinusoïdal ce facteur est présenté par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance FP est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S [21].

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{(puissance active)}}{\text{(tension efficace)} \text{ (courant efficace)}}$$

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eff} I_{eff}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D^2 + Q^2}} \quad (1.8)$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1. En posant :

$$p = 3V \cdot Ic1 \cdot \cos \varphi, \quad (1.9)$$

On aura :

$$F_p = \frac{I_c}{I_{c1}} \cdot \cos \varphi = F_{dis} \cdot \cos \varphi \quad (1.10)$$

Où F_{dis} représenté le facteur de distorsion. Il vaut 1 lorsque le courant est parfaitement sinusoïdal et il décroît lorsque la déformation de l'onde s'accroît. Φ représenté le déphasage entre le courant fondamental et la tension. Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs [11].

En présence des courants harmoniques avec une tension sinusoïdale ; on distingue [21] :

- **Facteur de déphasage (facteur de Puissance de Déplacement):** C'est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente de l'onde fondamentale.

$$F_{p_{dép}} = \frac{P_1}{V_{1eff} I_{1eff}} \quad (1.11)$$

- **Facteur de Puissance de Distorsion** : C'est le rapport entre le courant fondamental et le courant total.

$$Fp_{dis} = I_1/I_T = \frac{1}{\sqrt{1 + (THD_I)^2}} \quad (1.12)$$

- **Facteur de puissance (total)**: est le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S .

$$Fp_{tot} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eff} I_{eff}} \quad (1.13)$$

- **Le Facteur de puissance (total) peut aussi être exprimé :**

En régime déformé, le facteur de puissance devient le produit du facteur de déplacement et du facteur de distorsion. Les définitions précédentes s'appliquent tout aussi bien en régime monophasé qu'en régime triphasé équilibré.

$$Fp_{tot} = Fp_{dis} * Fp_{dép} \quad (1.14)$$

I.3.4.5 Normes concernant les perturbations harmoniques :

L'objectif des normes et des réglementations est de limiter les dysfonctionnements occasionnés par les harmoniques. La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définit le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser par une série de normes de compatibilité électromagnétique (CEI 61000) qui détermine le taux de distorsion harmonique de la tension de référence sur le réseau. Nous pouvons citer à titre d'exemple [11] [5]:

- **La norme CEI 61000-2-2:** elle définit les niveaux de compatibilité de tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension. Cette norme vise à protéger les équipements raccordés sur un réseau basse tension déformé [18].
- **La norme CEI 61000-3-2:** cette norme fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A.

Il s'agit la des appareils du domaine domestique.

Cette norme fait une classification des dispositifs (équipements) en quatre groupes ou classes, ces équipements doivent avoir une puissance de 75 W jusqu'à 600 W [15] [16].

- Classe A : tous les équipements triphasés équilibrés non inclus dans les classes (B, C et D).
- Classe B : Outils portatifs.
- Classe C : Équipements d'éclairage, y compris les dispositifs de régulation.
- Classe D : micro-ordinateurs et télévisions.

Tableau 1.3 : Niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques individuelles sur les réseaux basse tension (CEI 61000-2-2).

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %	Rang harmonique h	Tension harmonique %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	> 21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			> 12	0.2
25	1.5				
> 25	$0.2+0.5*25/h$				

Les limites des courants harmoniques de la norme CEI 61000 3-2 sont données par le Tableau 1.4, Il est intéressant de noter que ces limites sont exprimées en valeurs absolues et non relatives à la fondamentale. Ceci implique que l'équipement avec une petite

puissance peut accomplir la norme avec un indice de distorsion harmonique (THD_I) très élevé.

Tableau 1.4 : Limites des composantes harmoniques du courant (CEI 61000 3-2).

Harmoniques (h)	Classe A (A)	Classe B (A)	Classe C I _h /I ₁ %	Classe D (mA/W)
Harmoniques impairs				
3	2.30	3.45	30 x F _p	3.4
5	1.14	1.71	10	1.9
7	0.77	1.155	7	1.0
9	0.40	0.60	5	0.5
11	0.33	0.495	3	0.35
13	0.21	0.315	3	0.296
15 ≤ h ≤ 39	0.15 x 15/h	0.225 x 15/h	3	3.85/h
Harmoniques pairs				
2	1.08	1.62	2	-
4	0.43	0.645	-	-
6	0.30	0.45	-	-
8 ≤ h ≤ 40	0.23 x 8/h	0.345 x 8/h	-	-
F _p : est le facteur de puissance				

- **La norme Le CEI 61000 3-4 :** définit des limites d'émission de courant harmonique pour tout équipement raccordé au réseau qui absorbe plus de 16 A et moins de 75 A par phase. Trois étapes sont définies, selon le rapport entre la puissance nominale de la charge et la puissance du court-circuit de la source de puissance au point de raccordement (PCC). L'étape I comprend tous ces dispositifs qui peuvent être reliés à n'importe quel point du réseau et qui ont un rapport entre la puissance nominale de la charge et la puissance du court-circuit supérieure ou égale à 33 ($S_{CC}/S_N \geq 33$). Le Tableau 1.5 définit des limites d'émission des courants harmoniques pour cette étape. Tout

équipement qui n'accomplit pas cette restriction, devra être classifié dans l'étape II ou l'étape III.

Tableau 1.5 : Limites d'émission des courants harmoniques Pour l'étape I
(CEI 61000-3-4)

H Impairs	I_h/I_1 %	h Pairs	I_h/I_1 %
3	21.6	2	4
5	10.7	4	2
7	7.2	6	1.33
9	3.8	8	1
11	3.1	10	0.8
13	2	12	0.66
15	0.7	≥ 14	0.6
17	1.2	/	/
19	1.1	/	/
21	0.6	/	/
23	0.9	/	/
25	0.8	/	/
27	0.6	/	/
29	0.7	/	/
31	0.7	/	/
≥ 33	≤ 0.6	/	/

- **La norme EN 50160** étant une description des caractéristiques de la tension réseau, elle ne détermine que les valeurs limitent des harmoniques de tension. Ces limites sont pratiquement identiques à celles fixées par la CEI.

En ce qui concerne l'IEEE, la norme IEEE 519: 1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems, détermine les procédures pour

contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de pollution admissible de la part des clients et de distorsion harmonique globale dans le réseau[5].

I.3.5 Inters harmoniques :

L'analyse harmonique des courants et des tensions nous indique qu'en plus des harmoniques de rang entier, il existe des inters harmoniques. Ceux-ci ont d'ordinaire une amplitude relativement réduite, mais peuvent être gênants s'ils provoquent des résonances. Ils peuvent également avoir des effets très néfastes lorsque leur fréquence se situe dans les plages de fréquence réservées pour les signaux de commande. Les inters harmoniques ont principalement pour origine [9]:

- Les imperfections du convertisseur et de sa commande (chutes de tension dans les thyristors, variation ou inégalité des angles de commutation, variation de l'impédance vue du côté continu du redresseur [Car-99]),
- L'association de plusieurs convertisseurs fonctionnant à des fréquences différentes (variateurs de vitesse des moteurs à courant alternatif [Bon-00, Ros-02]),
- Les convertisseurs statiques de commande non périodique,
- Les fours à arc et les cyclo convertisseurs.

I.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de perturbations qui affectent l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous l'avons vu, les harmoniques, les déséquilibres de courant et de tension, la puissance réactive et les creux de tension peuvent avoir un impact négatif sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller de la surchauffe et de la détérioration opérationnelle jusqu'à l'endommagement complet de l'équipement.

Dans le chapitre suivant, nous présenterons les solutions possibles pour éliminer les distorsions dans les réseaux électriques.

Chapitre II:

Solutions de dépollution harmonique

II.1 Introduction :

La conception d'un système qui restreint la dissipation des composantes harmoniques si une charge non linéaire est connectée au réseau électrique est imposée par le respect des normes de la qualité de l'énergie électrique.

Deux types de solutions sont possibles. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques qui polluent moins ou moins, tandis que le second consiste en la mise en place d'un filtrage des composantes harmoniques. La première classe de solutions concerne avec la conception tandis que le second est de compenser les courants ou tensions harmoniques. On distingue deux groupes de solutions de dépollution pour compenser toutes les perturbations : les solutions traditionnelles et les solutions modernes [22].

II.2 Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique :

Le choix de la solution la plus appropriée dépend des caractéristiques de l'offre au niveau du point de connexion, les exigences de la charge et de l'économie. Il existe deux possibilités pour l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, l'une est appelée conditionnement de la charge qui consiste à rendre les équipements du processus industriel moins sensibles aux problèmes de la qualité de l'énergie, en leur permettant ainsi de les surmonter, l'autre possibilité réside dans l'installation d'un dispositif de conditionnement capable de minimiser ou empêcher les perturbations provenant du réseau [6]. Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques. Ceci suppose trois éléments:

- un ou plusieurs générateurs de perturbations,
- un ou plusieurs récepteurs sensibles à ces perturbations,
- entre les deux un chemin de propagation de ces perturbations [13]. Les solutions consistent à agir sur tout ou sur une partie de ces trois éléments soit de façon globale (installation) soit de façon locale (un ou plusieurs récepteurs). Ces solutions peuvent être mises en œuvre pour corriger un dysfonctionnement dans une installation, d'agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes, de mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du

distributeur d'énergie et de réduire la facture énergétique (réduction de l'abonnement en KVA, réduction de la consommation). L'utilité même de choisir une solution et de la mettre en œuvre dépend:

- Du niveau de performance souhaité : Un dysfonctionnement peut être inadmissible s'il met en jeu la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, éclairages et systèmes de sécurité des locaux recevant du public, auxiliaires de centrale...).
- Des conséquences financières du dysfonctionnement : Tout arrêt non programmé, même très court, de certains procédés (fabrication de semi-conducteurs, sidérurgie, pétrochimie...) conduit à une perte ou à une production de mauvaise qualité.
- Du temps de retour sur investissement souhaité : C'est le rapport entre les pertes financières (matières premières, pertes de production...) provoquées par la non-qualité de l'énergie électrique et le coût (étude, mise en œuvre, fonctionnement, maintenance) de la solution.

II.2.1 Solutions possibles pour réduire les harmoniques :

Afin de diminuer les perturbations en tension ou en courant, il est possible d'agir à deux niveaux :

- du côté de la source en filtrant la tension du réseau ou en améliorant le réseau de Transport et celui de distribution.
- du côté du client en rendant le courant de ligne le plus sinusoïdal possible.

Plusieurs solutions ont été envisagées pour limiter la propagation des harmoniques et améliorer la qualité et la gestion de l'énergie électrique.

Elles peuvent être classées en deux catégories, traditionnelles et modernes (à base de L'électronique de puissance) [23].

II.2.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques :

Afin de compenser toutes les perturbations, séparées en deux types : courant et tension, Deux groupes de solution de dépollution, Deux types de solutions sont envisageables, Traditionnelle et moderne 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, vont être étudiées [24].

L'approche de la dépollution la mieux adaptée à notre objectif pour réduction de ses perturbation.

Suivant les types de perturbation, courant et tension, deux solutions traditionnelles de dépollution sont analysées [23].

II.2.2.1 Solutions traditionnelles de dépollution :

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation [27] [29] Les moyens de dépollution traditionnels sont nombreux et se résument dans les points suivants :

- Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs.
- Inductance de lissage des courants.
- Confinement des harmoniques.
- L'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la Circulation des courants harmoniques.
- Augmentation de l'indice de modulation.
- Filtres passifs utilisant des éléments réactifs en l'occurrence des inductances et des Condensateurs.

II.2.2.1.1 Rééquilibrage des courants et des tensions :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées mal réparties, la première solution est la répartition égale des charges sur les trois phases.

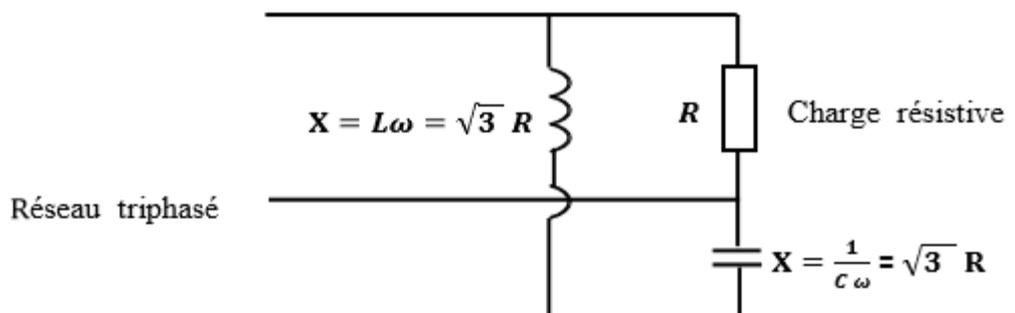


Figure 2.1 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

II.2.2.1.2 Compensation des creux et des interruptions :

Les creux de tension deviennent un souci majeur en matière de la qualité de l'onde. En conséquence, les investigations des techniques de mitigation des creux reçoivent de plus en plus d'importance. Des dispositifs conventionnels tels que les sources d'alimentation sans interruption, les transformateurs à Ferro-résonance et les groupes moteur-générateur, sont susceptibles de mitiger le problème à un certain point [25]. Cependant, ces moyens ont leurs inconvénients et limites, particulièrement en matière de coût, performance et puissance maximale. Un moyen plus intéressant pour la mitigation des creux est l'utilisation des transformateurs à rapport variable électroniquement.

II.2.2.1.3 La Compensation de la puissance réactive :

La compensation d'énergie réactive-consommée en générale par les charges non linéaire-provoque des pertes, réduire la capacité de transport des lignes électrique et cause des chute de tension par suit du caractère inductif du réseau d'où la nécessité de prévoie des moyens de compensation [26]. La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. On peut les placer directement à proximité des charges qui ont un mauvais facteur de puissance (compensation locale) ou près du transformateur d'alimentation (compensation globale) [6]. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante non réglable et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin.

II.2.2.1.4 Compensation des courants harmoniques :

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires.

Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de Valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence

fondamentale du réseau [23]. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, On distingue le filtre passif résonnant Figure (2-2) et le filtre passif amorti ou passe-haut Figure (2-3).



Figure 2.2 : Filtre passive

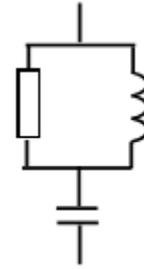


Figure 2.3 : Filtre passive amorti

Le filtre résonnant est un filtre très sélectif. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants. Le filtre passe-haut compense les harmoniques supérieurs ou égaux à sa fréquence propre. Il peut se connecter en parallèle avec d'autres filtres résonnants [23]. Ces dispositifs sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [25].les plus importants sont :

- a. **Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau :** elle permet de réduire la tension crée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués.
- b. **Utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique, par exemple, le montage dodécaphasé (figure.2.4) :** Le courant absorbé par ce type de montage ne contient que les harmoniques de rangs $12h \pm 1$ avec h entier. Figure. 2.4. Schéma simplifié d'un montage dodécaphasé série.

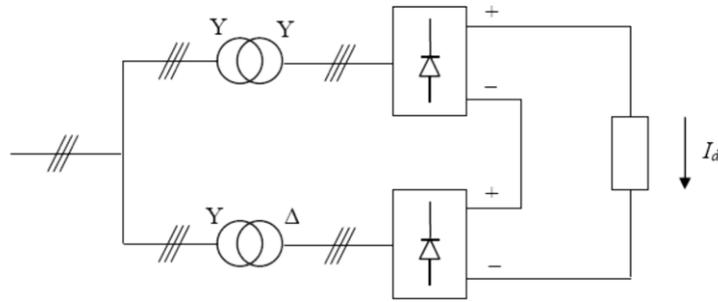


Figure 2.4 : Schéma simplifié d'un montage dodécaphasé série.

c. Ajout d'une self : Afin de limiter le contenu des courants harmoniques générés sur le réseau, une première solution consiste à insérer une self de lissage avant le pont de diodes. Avec une valeur de self définie pour 3% de chute de tension pour le courant nominal du pont de diode.

d. Utilisation de filtre passif : Le filtrage consiste à placer en parallèle sur le réseau d'alimentation une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau. Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif parallèle, filtre passif série et le passif amorti ou passe-haut. Le filtre passif a pour objet, dans le cas des harmoniques, de diminuer l'impédance du réseau à une fréquence donnée. Les courants harmoniques à cette fréquence sont alors dérivés dans le filtre et créent peu de distorsion sur le réseau. Le rang d'accord h_a correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau pour lequel l'impédance du filtre LC est minimale.

d.1 Classification des filtres passifs :

Les solutions conventionnelles aux problèmes de distorsion harmonique existent depuis longtemps. Le filtrage passif est la plus simple solution conventionnelle pour atténuer la distorsion harmonique [6]. Les filtres passifs sont des éléments à base d'inductance, capacité et résistance configurés et réglés pour contrôler les harmoniques. On peut classer les filtres passifs suivant leur fréquence de résonance, leur mode de connexion et leur emplacement sur le réseau. Sa conception nécessite une étude approfondie du réseau électrique et un travail de conception de bureau d'étude. Le dimensionnement dépend du spectre harmonique

de la charge et de l'impédance de la source d'énergie [27]. Cette solution est la plus simple et la moins chère mais sans doute, elle n'est pas la plus efficace.

d.2 Filtre passif série :

Une façon d'atténuer les harmoniques générées par les charges non linéaires est d'introduire un filtre passif série (Figure 2.5), dans l'alimentation d'entrée ligne de sorte que le filtre offre une impédance élevée à la circulation des harmoniques à partir de la source à la charge non-linéaire [6].

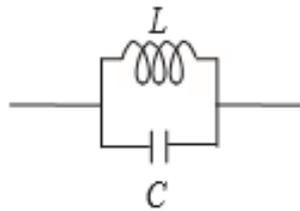


Figure 2.5 : Filtre passif série

d.3 Filtre passif parallèle :

Le filtre passif parallèle est montré sur la Figure (2.6) Il est constitué d'une inductance en parallèle avec un condensateur. Il présente une impédance faible pour tous les harmoniques et une impédance suffisamment importante par rapport au fondamental, ce qui empêche les courants harmoniques de se propager vers le réseau [6].

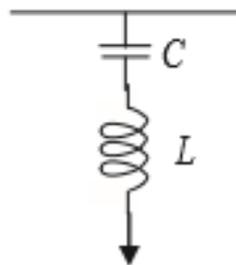


Figure 2.6 : Filtre passif parallèle

II.2.2.2 Solutions de dépollutions modernes :

La première solution consiste à fabriquer la charge la moins polluante comme le pont redresseur dodécaphasé de manière à réduire le taux de démission d'harmonique [26]. Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance) [24]. Les solutions de dépollution traditionnelle ne répondant plus à l'évolution des réseaux électriques et des charges à protéger, comme nous venons de le décrire précédemment, d'autres solutions modernes ont été proposées [23]. Le but principal des chercheurs dans le domaine de l'électronique de puissance est de satisfaire les industriels par l'utilisation des solutions plus efficaces et économiques.

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les IGBT, IGCT, GTO et MOSFET, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques. Pour fournir aux consommateurs une bonne qualité de l'énergie électrique, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs et les redresseurs MLI sont proposés comme des solutions avancées de dépollution des réseaux électriques [27]. C'est pourquoi d'autres solutions dites modernes ont été proposées. Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

- Le filtre actif (série, parallèle ou bien encore associant les deux)
- Le filtre actif hybride (série, parallèle) [24].

II.2.2.2.1 Redresseur à MLI :

C'est un redresseur commandé par une MLI optimisée, qui consiste à déterminer les angles de commutation selon certains critères d'optimisation. Ce sont des convertisseurs à modulation de largeurs d'impulsions, utilisant des composants à commutation forcée tels que les IGBT ou les thyristors GTO [27]. Suivant les caractéristiques harmoniques exigées, on peut, par exemple, soit minimiser les harmoniques d'une bande, soit éliminer certains d'entre eux, soit faire que le facteur de puissance égale à 1. Il y a plusieurs

techniques d'optimisations parmi elles, on distingue l'utilisation de l'algorithme génétique qui donne de très bons résultats [28] [29].

II.2.2.2.2 Filtrés actifs :

Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Ils peuvent être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques.

Les principales structures, proposées dans la littérature, sont les filtres actifs parallèle, série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actif-passif [28]. Actuellement, les filtres actifs parallèles sont essentiellement installés par les consommateurs industriels. L'évolution future de ces dispositifs de puissance pourrait autoriser le fournisseur d'énergie à prendre un rôle plus important, en lui permettant de les installer lui-même.

Cette approche permettrait d'amortir la propagation des harmoniques causées par la résonance, laquelle peut être observée entre les inductances du réseau et les batteries de condensateur installées pour améliorer le facteur de puissance. De même, des filtres actifs parallèles installés par le fournisseur auraient aussi pour objectif de réduire la distorsion harmonique de tension en amont, côté réseau électrique [23].

a) Filtre actif parallèle (FAP) :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, est considéré comme générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal [23].

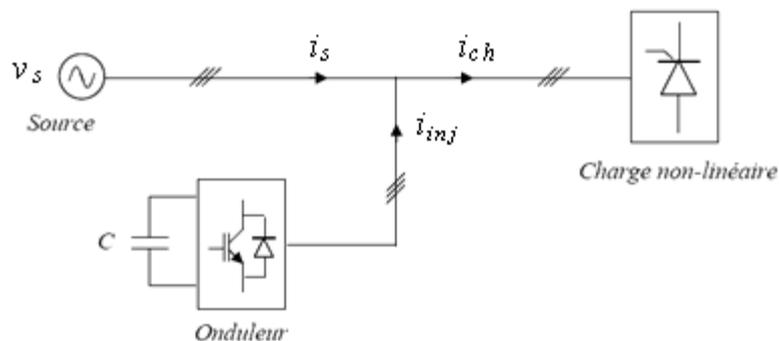


Figure 2.7 : Filtre actif parallèle.

b) Filtre actif série (FAS) :

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale. [29] L'utilisation industrielle des filtres actifs série uniquement est très limitée, son usage est principalement fait pour les compensateurs globaux de puissance connus sous l'appellation Unified Power Quality Conditioner (UPQC) [27].

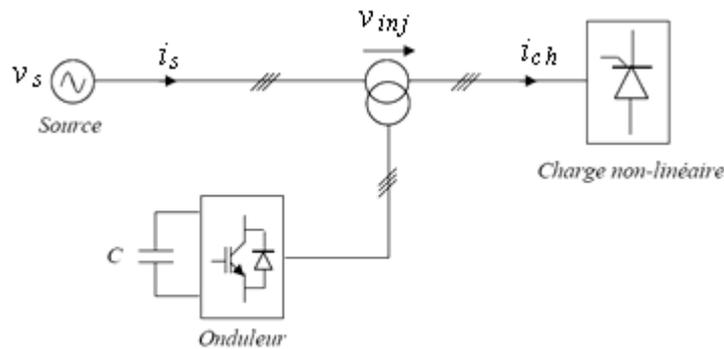


Figure 2.8 : Filtre actif série.

c) Filtres actifs parallèle-série combinés (UPQC) :

La combinaison parallèle-série actifs, appelée aussi '*Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*', résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série. Profitant des avantages des deux filtres, l'*UPQC* assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci [23]. L'objet du filtre actif série est l'isolation harmonique entre la charge et la source d'une part, la régulation de la tension de réseau (compensation de flicker ou de déséquilibre) d'autre part. Le filtre actif parallèle compense les courants harmoniques et la puissance réactive de la charge et le courant inverse [6]. en même temps qu'il contrôle la tension continue du condensateur commun des deux filtres actifs.

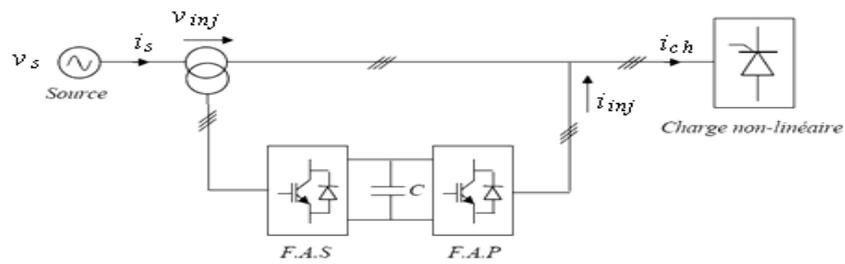


Figure 2.9 : Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC)

d) Filtres hybrides actifs et passifs :

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution [24]. Pour réduire le dimensionnement du filtre actif et son coût, on lui associe un filtre passif. Le filtre passif a pour rôle d'éliminer les fréquences spécifiques permettant la réduction du dimensionnement du filtre actif qui compensera le reste des perturbations [28][29][23]. En conséquence, le filtre hybride est plus petit que pour un filtre actif et la réponse est bien meilleure qu'avec des filtres passifs seuls. Cette structure permet d'améliorer les caractéristiques de compensation des filtres passifs et de réaliser ainsi une réduction de la valeur nominale du filtre actif [6]. Les configurations les plus étudiées dans la littérature sont :

- **Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :**

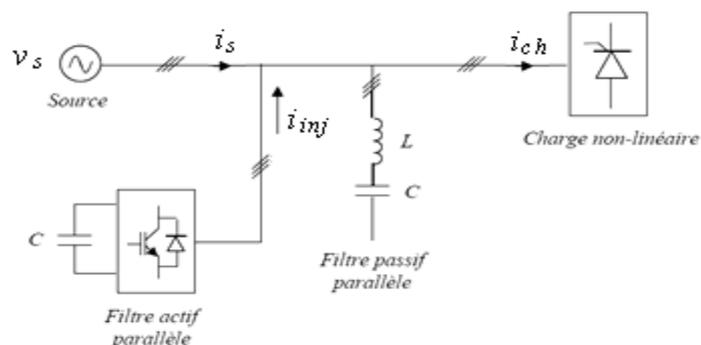


Figure 2.10 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

- **Filtre actif série avec un filtre passif parallèle :**

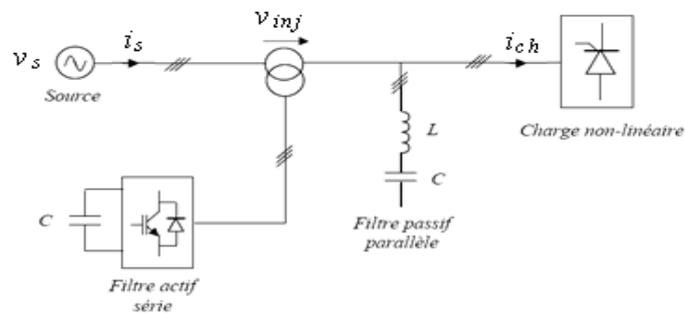


Figure 2.11 : Filtre actif série avec filtre passif parallèle

- **Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle :**

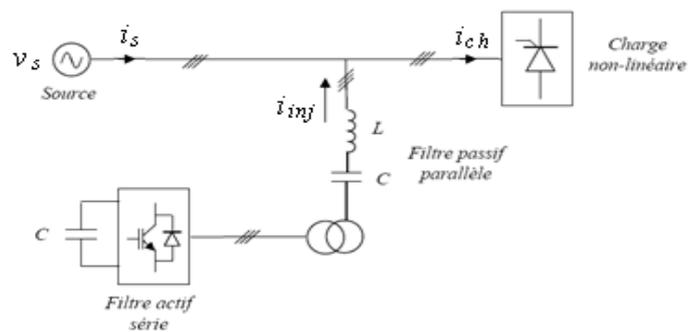


Figure 2.12 : Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

II.3 Conclusion :

Nous avons proposé plusieurs solutions pour améliorer la qualité de l'énergie et compenser tous les types de perturbations possibles dans le réseau électrique. Parmi ces solutions, on trouve les approches traditionnelles et modernes.

Il existe de nombreux types de filtres, tels que le filtre actif parallèle, qui compense diverses perturbations du courant telles que les harmoniques et les déséquilibres. De plus, le filtre actif série est spécialisé dans la compensation des perturbations de tension, telles que les harmoniques et les chutes de tension. Pour une compensation complète des perturbations du courant et de la tension, nous combinons les filtres actifs parallèles et série, ce qui constitue une solution globale.

Dans le prochain chapitre, nous parlerons en détail du filtre actif série.

Chapitre III:

Filtre Actif Série

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons discuter du système utilisé pour compenser les harmoniques de tension dans le but de protéger les charges sensibles aux harmoniques de tension. Ce système est appelé le filtre actif série.

Le filtre actif série est une solution efficace pour atténuer les perturbations harmoniques dans le réseau électrique. Il fonctionne en injectant des courants de compensation de phase opposée aux harmoniques présentes dans le système, ce qui permet de les annuler et de maintenir le niveau de tension dans les limites acceptables.

Ce système est particulièrement important pour protéger les charges sensibles, telles que les équipements électroniques, contre les effets néfastes des harmoniques de tension. En atténuant ces harmoniques, le filtre actif série contribue à maintenir la qualité de l'énergie électrique fournie aux charges sensibles, ce qui peut prolonger leur durée de vie et éviter les dysfonctionnements liés aux perturbations du réseau électrique.

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail le fonctionnement du filtre actif série, ses composants, ses avantages et ses limitations, ainsi que les différentes stratégies de commande utilisées pour optimiser ses performances en fonction des besoins spécifiques de protection des charges sensibles aux harmoniques de tension.

III.2 Filtre actif série (FAS) :

Le filtre actif série, est une source de tension contrôlée placée en série entre le réseau et la charge sensible à protéger. Cette source de tension correspond à un onduleur triphasé avec un filtre LC de sortie Figure3.1 (qui sert à filtrer les harmoniques de commutation de l'onduleur) connectés au réseau au travers de trois transformateurs de courant de raccordement. Du côté continu de l'onduleur on dispose d'un système de stockage d'énergie sous forme de source de tension continue, qui fournit l'énergie nécessaire pour compenser les perturbations de la tension du réseau. Le système de stockage souvent utilisé est basé sur un condensateur dont la tension peut être réglée par une source de courant extérieure.

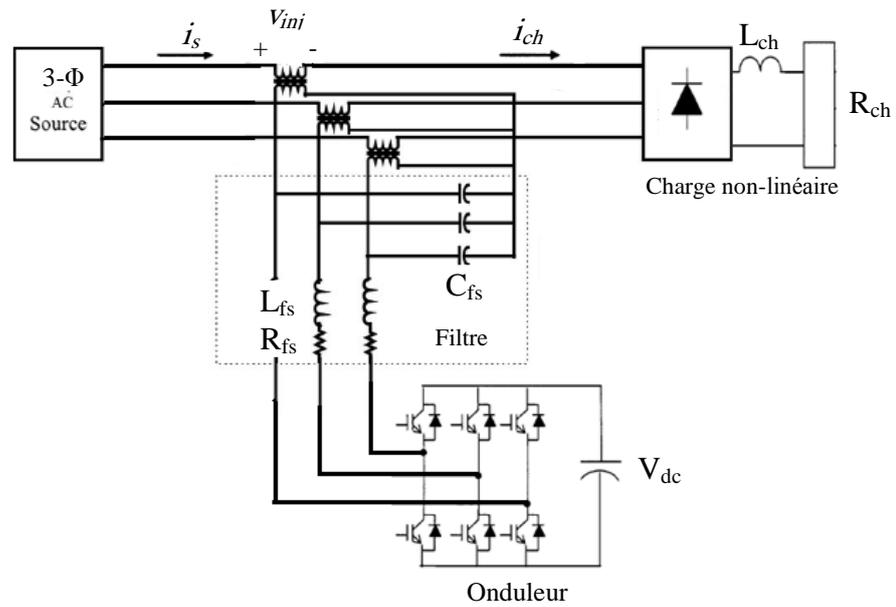


Figure 3.1 : Filtre actif série avec une charge non-linéaire.

III.3 Principe de fonctionnement du FAS :

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau (Fig. 3.1). Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale. En outre, Il constitue un excellent dépollueur, car il est souple, auto-adaptatif, performant, ne présentant aucun risque d'interaction avec l'impédance réseau et ne nécessite pratiquement pas d'études préalables à la mise en service. Il injecte dans le réseau, des tensions perturbatrices égales à celles trouvées dans le réseau, mais en opposition de phase avec celles-ci, de telle sorte que la tension fournie à la charge soit sinusoïdale. En effet, l'objectif primordial du filtre actif série (FAS) consiste à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, surtensions, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau [29]. Il faut noter aussi que ce filtre actif ne s'oppose pas nécessairement aux filtres passifs auxquels il peut s'associer avec intérêt. Toutefois, le FAS présente quelques difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre : il ne permet pas, par exemple, de compenser les courants

harmoniques consommés par la charge et sa protection contre un court-circuit accidentelle dans le réseau et difficile.

III.4 Modèle équivalent du filtre actif série :

La charge non-linéaire considérée dans notre étude est un pont de diodes triphasé qui alimente une charge inductive. Cette charge est modélisée par une charge linéaire équivalente en parallèle avec une source de courant harmonique. La figure 3.2 montre le système simplifié que nous allons étudier et le circuit équivalent. Les harmoniques, produits par le pont à diode triphasé, ont les rangs $6k \pm 1$ ($k = 1, 2, 3, ..$ etc.). Les rangs pris en compte dans ce cas, sont : $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47$ et 49 .

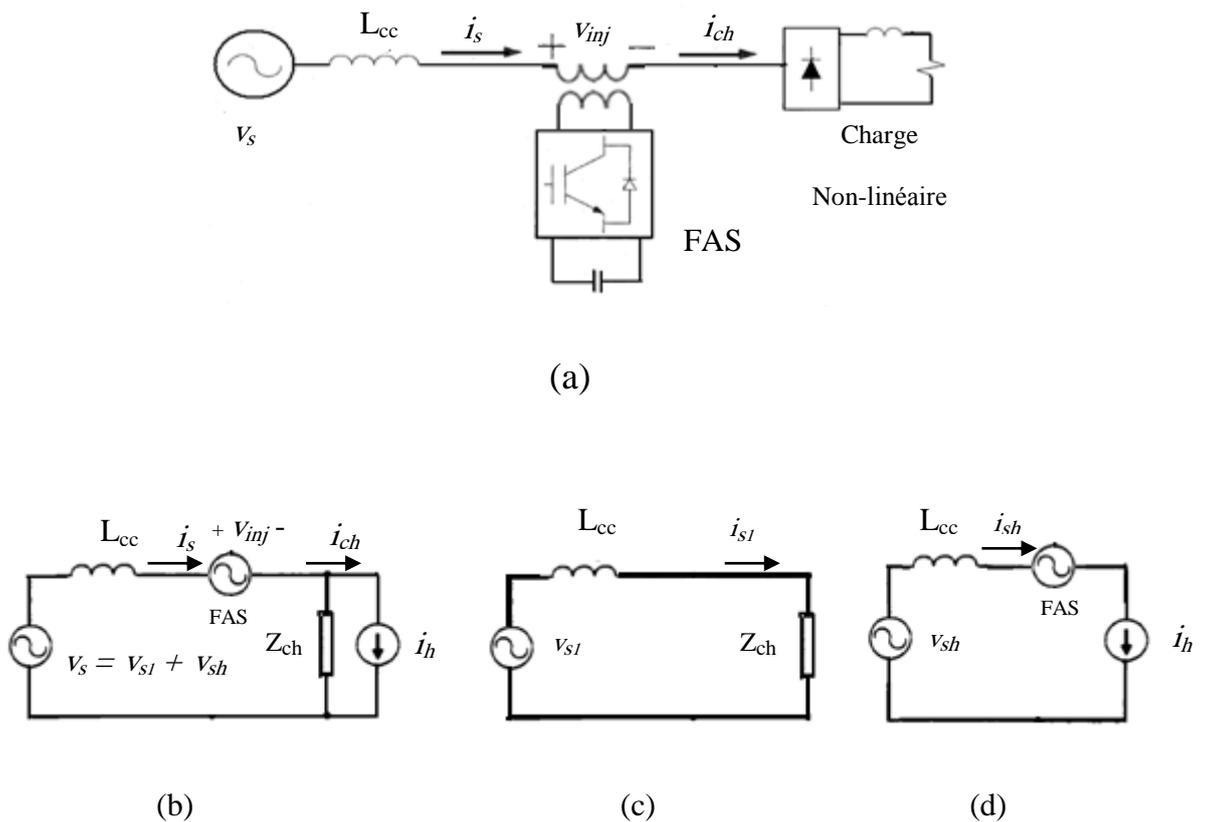


Figure 3.2 : FAS raccordé à l'entrée d'une charge non-linéaire. (a) Représentation unifilaire du système. (b) Circuit équivalent, (c) Circuit équivalent pour la fondamentale, (d) Circuit équivalent pour les harmoniques.

III.5 Structure générale du filtre actif série :

La Figure 3.3 donne la structure générale du filtre actif série, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

a. La partie puissance est constituée :

- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- d'un élément de stockage d'énergie avec un système d'alimentation DC,
- d'un filtre de sortie,
- et de trois transformateurs monophasés d'injection de tension.

b. La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- de l'identification des tensions perturbées,
- de la commande de l'onduleur de tension,
- et de la régulation de la tension injectée dans le réseau à partir de l'onduleur de tension.

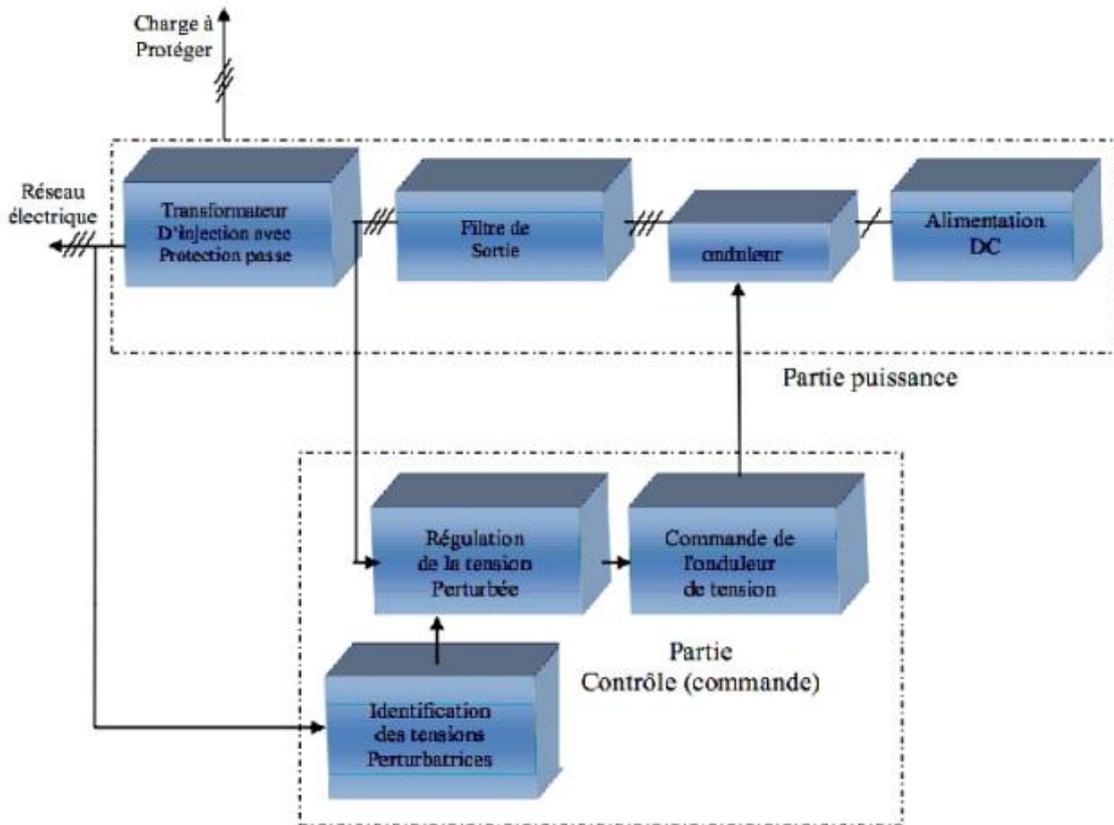


Figure 3.3 : Structure générale du filtre actif série

III.5.1 Etude de la partie puissance :

Dans ce paragraphe, on va détailler les éléments constitutifs de cette partie du filtre actif série. Nous commencerons par une étude de l'onduleur en passant par le système de stockage d'énergie, ensuite par le filtre de sortie et en terminant par les transformateurs d'injection de tension.

III.5.1.1 Onduleur de tension :

La Figure 3.4 présente un onduleur triphasé à structure tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un système de stockage à deux condensateurs avec un point milieu (C_{dc1} , C_{dc2}), de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est

un filtre passif habituellement du deuxième ordre (L_{fs} , R_{fs} , C_{fs}) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

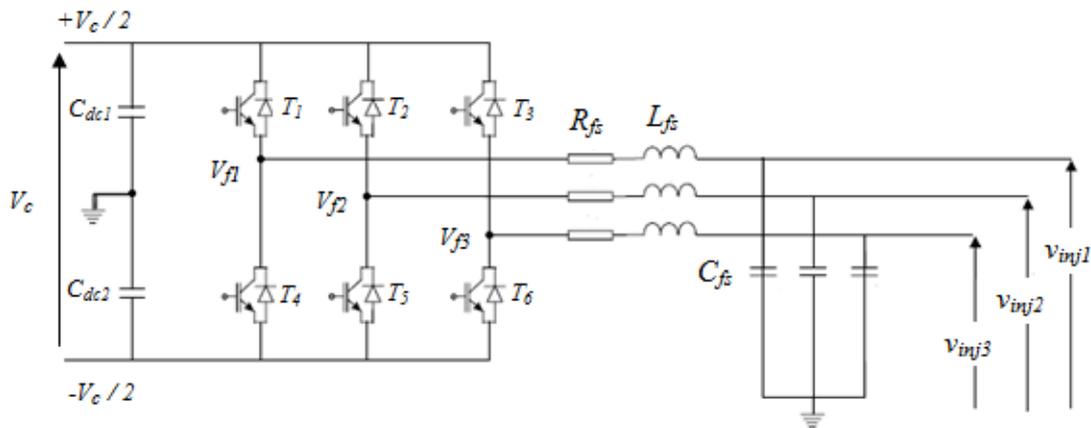


Figure 3.4 : Onduleur de tension triphasé

Cette structure de l'onduleur ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre.

III.5.1.2 Élément de stockage d'énergie :

Le choix d'un système de stockage à deux condensateurs avec un point milieu (C_{dc1} , C_{dc2}), comme le montre la Fig. 3.4, donne la possibilité de mesurer, aux bornes des condensateurs, une tension continue V_{dc} sans fluctuations. Cela permet aussi d'avoir trois phases indépendantes du *filtre actif série* fonctionnant comme un demi-point. En effet, un système de stockage sans point milieu permet à l'onduleur d'avoir une tension de sortie dont la valeur maximale est de $V_f=2/3.V_{dc}$, au lieu d'une valeur maximale de $V_{dc}/2$ dans le cas d'une structure avec un point milieu. Afin d'assurer que l'onduleur dispose d'une

tension maximale à sa sortie, il faut que les deux tensions continues ($\pm V_{dc}/2$) soient maintenues dans une plage bien spécifiée. En effet, la valeur minimale des tensions continues détermine directement l'amplitude de la tension de sortie que le *filtre actif série* est capable de générer. Pour cela plusieurs solutions sont envisageables :

- une alimentation *DC* à base d'un pont redresseur à diodes, triphasé ou monophasé, inclus dans la structure, comme l'a montré la Figure 3.3 : le pont redresseur étant alimenté par le réseau électrique, chaque condensateur aura la valeur crête de la tension simple du réseau. Ce montage prévoit des valeurs élevées des capacités de stockage pour assurer, dans le cas d'un réseau perturbé, un faible taux d'ondulation aux bornes des condensateurs. Il faut également s'assurer, dans ce cas, du dimensionnement en courant des diodes du pont redresseur,
- un système *DC* indépendant à base des batteries alimentant les condensateurs de stockage d'énergie. Cette solution assure au *filtre actif série* une durée d'autonomie assez large avec une tension de sortie relativement stable pendant la décharge,
- pour les cas des filtres actifs de puissance élevée et de tension continue relativement basse, l'utilisation des super-condensateurs ou des supraconducteurs peut être envisagée.

Afin de compenser les creux de tension polyphasés de profondeur $x\%$ et de durée Δt , le *filtre actif série* doit fournir, à travers ces condensateurs de stockage, l'énergie donnée par l'expression suivante :

$$\Delta w = \frac{nP}{3} \frac{x}{100} \Delta t \quad (3.1)$$

Avec P , la puissance active de la charge à protéger et n le nombre des phases perturbées.

III.5.1.3 Filtre de sortie :

Le filtre de sortie d'un *filtre actif série* est généralement un filtre passif du deuxième ordre (L_{fs} , R_{fs} , C_{fs} , R_a), comme le montre la Fig. 3.5. L'ensemble onduleur et filtre de sortie se comportant comme une source de tension, le filtre de sortie sert d'une part à atténuer les composantes dues aux commutations de l'onduleur, d'autre part à connecter le filtre actif au réseau électrique à travers les transformateurs d'injection.

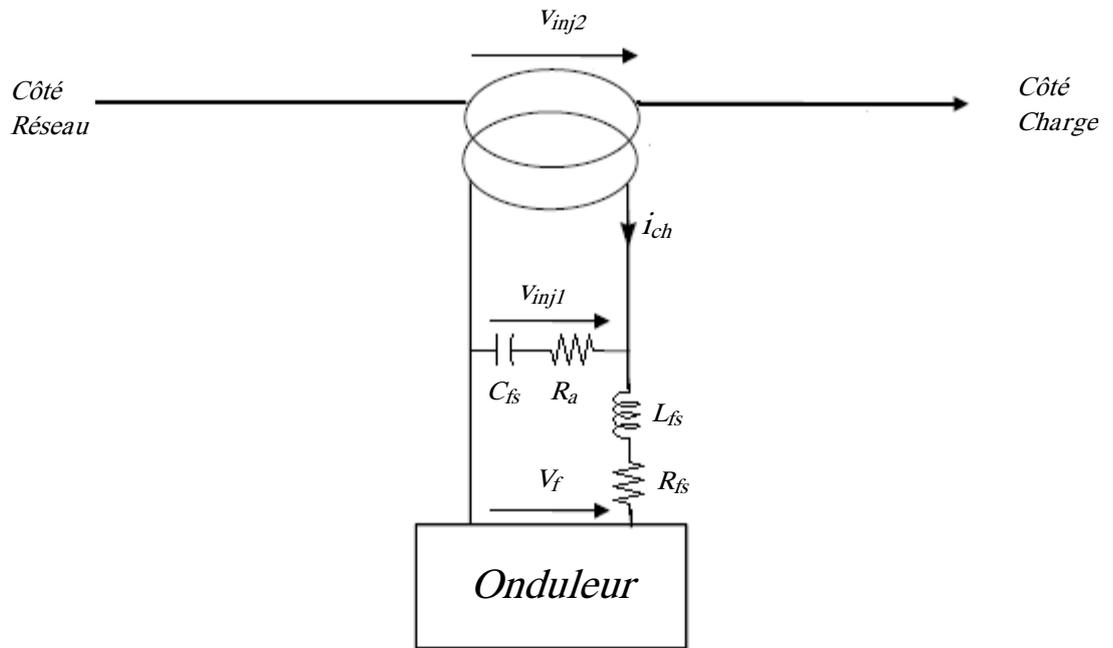


Figure 3.5 : Schéma de modélisation du filtre de sortie.

R_{fs} représente la résistance interne de l'inductance L_{fs} et R_a est une résistance d'amortissement (sa valeur varie entre 0.1 et 2 Ω) additionnée pour diminuer le pic de résonance que le filtre L_{fs} C_{fs} peut causer [27].

A partir de la Fig. 3.5, avec V_f la tension de sortie de l'onduleur, v_{inj1} la tension aux bornes du primaire du transformateur d'injection, et i_{ch} le courant de la charge à protéger, pour trouver v_{inj1} en fonction de V_f et i_{ch} on va utiliser le théorème de superposition:

- a.** $i_{ch} = 0$ (la boucle de i_{ch} ouvert) dans ce cas nous aurons un diviseur de tension (S est

L'opérateur de Laplace) :

$$v_{inja} = \frac{R_a + \frac{1}{C_{fs}S}}{R_a + \frac{1}{C_{fs}S} + R_{fs} + L_{fs}S} V_f \quad (3.2)$$

$$v_{inja} = \frac{R_a C_f S + 1}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} V_f \quad (3.3)$$

b. $V_f = 0$ (V_f court-circuité) dans ce cas nous aurons un diviseur de courant, supposant que I_{Cf}

le courant qui traverse le condensateur C_{fs} :

$$I_{Cf} = \frac{R_{fs} + L_{fs}S}{R_a + \frac{1}{C_{fs}S} + R_{fs} + L_{fs}S} i_{ch} \quad (3.4)$$

$$\frac{v_{injb}}{R_a + \frac{1}{C_{fs}S}} = \frac{R_{fs} + L_{fs}S}{R_a + \frac{1}{C_{fs}S} + R_{fs} + L_{fs}S} i_{ch} \quad (3.5)$$

$$v_{injb} = \frac{R_a L_{fs} C_{fs}^2 S^3 + (L_{fs} + R_{fs} R_a) C_{fs} S^2 + R_{fs} C_{fs} S}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} i_{ch} \quad (3.6)$$

Selon le théorème de superposition $v_{inj1} = v_{inja} + v_{injb}$ et si on suppose un taux de transformation unitaire ($v_{inj1} = v_{inj2} = v_{inj}$), donc :

$$v_{inj} = \frac{R_a C_{fs} S + 1}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} V_f + \frac{R_a L_{fs} C_{fs}^2 S^3 + (L_{fs} + R_{fs} R_a) C_{fs} S^2 + R_{fs} C_{fs} S}{L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1} i_{ch} \quad (3.7)$$

L'équation 3.3 représente la fonction de transfert du filtre de sortie correspondant au système d'origine, et l'équation 3.6 la fonction de transfert correspondant au modèle de perturbation. Ces perturbations sont causées par le passage du courant de la charge à protéger i_{ch} .

Le filtre de sortie du deuxième ordre est dimensionné pour rejeter les composantes dues à la fréquence de commutation de l'onduleur (qui dans ce travail vaut 12 kHz pour la commande MLI). Pour cela on a choisi les valeurs suivantes : $R_a = 0.1 \ \Omega$, $R_{fs} = 0.030 \ \Omega$, $C_{fs} = 220 \ \mu\text{F}$, $L_{fs} = 1 \ \text{mH}$, ces valeurs ne sont pas optimisées mais nous donnent des résultats très satisfaisants avec un rejet de $-56.2 \ \text{dB}$ (à $12 \ \text{kHz}$ une atténuation de $99.85 \ \%$), permettant de négliger les composantes hautes fréquences passant du côté réseau électrique ($0.15 \ \%$), comme le montre la Figure 3.6.

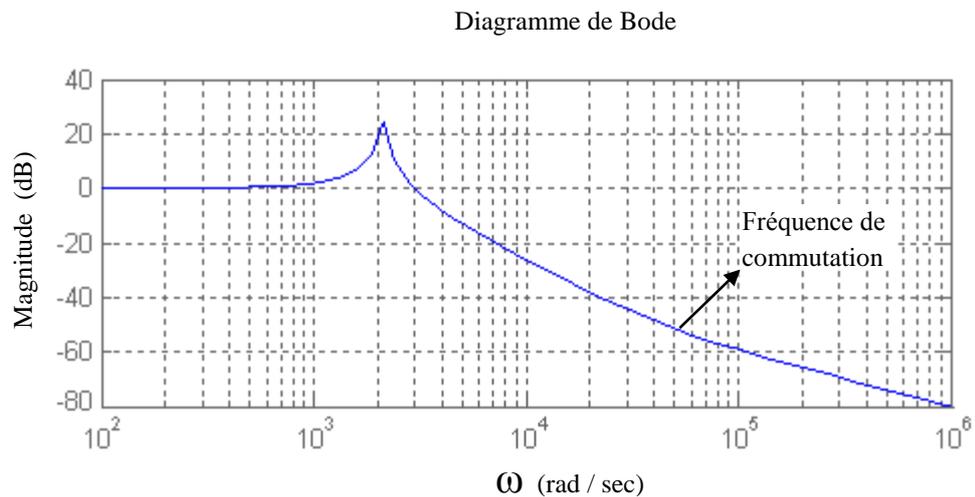


Figure 3.6 : Diagramme représentant le gain du filtre de sortie.

III.5.1.4 Transformateurs d'injection :

Les transformateurs d'injection de tension permettent d'injecter en série avec le réseau électrique et avec le taux de transformation souhaité la tension produite par l'onduleur, comme le montre la Figure 3.5. Par conséquent, ces transformateurs, considérés comme des transformateurs de courant, permettent de réduire, par leurs taux de transformation, le courant de la charge traversant l'onduleur de tension. A cela s'ajoute que ces transformateurs, grâce à leurs caractéristiques magnétiques de saturation, contribuent à la protection du *filtre actif série* contre les défauts côté charge. Les désavantages de l'emploi de ces transformateurs sont leurs coûts élevés et la chute de tension occasionnée par leurs inductances de fuite.

Le filtre série est protégé contre un court-circuit en aval côté charge par un système by-pass, constitué par une impédance variante, par deux thyristors en antiparallèle en série avec une petite résistance, et par des transformateurs à circuit magnétique saturable.

Dans ce travail, trois transformateurs d'injection de tension seront employés avec un taux de transformation unitaire.

III.5.2 Etude de la partie contrôle-commande :

La stratégie de commande se base principalement sur la méthode de détection des tensions perturbatrices. Dans ce qui suit nous présenterons les trois principaux éléments de la partie contrôle-commande du filtre actif série : l'identification des tensions perturbatrices, la commande de l'onduleur de tension et la régulation des tensions injectées au réseau électrique.

III.5.2.1 Méthodes d'identification des tensions perturbatrices :

La méthode d'identification sert à calculer les tensions perturbatrices qui sont injectées par l'onduleur, en opposition de phase, pour dépolluer la tension aux bornes de la charge à protéger. Ces tensions perturbatrices représentent les tensions déséquilibrées et harmoniques, les sursensions, et les creux de tension. Plusieurs méthodes d'identification ont déjà été proposées dans la littérature. La méthode d'identification des tensions perturbatrices pour le FAS la plus répandue dans la littérature est la méthode du système de référence synchrone d-q (synchronous d-q référence frame méthode), une autre méthode

moins connue mais efficace est la méthode d'identification des tensions perturbatrices basée sur l'utilisation du système à base de PLL [19]. Cette dernière méthode est utilisée dans ce travail.

III.5.2.1.1 Méthode d'identification basée sur l'emploi d'un système à base de PLL :

Les perturbations les plus fréquentes sur un système triphasé de tensions sont les déséquilibres, la distorsion de la forme d'onde et l'écart de l'amplitude de la séquence directe par rapport à sa valeur nominale. Ainsi, pour compenser ces perturbations, il est nécessaire d'identifier la phase et/ou l'amplitude de la séquence directe fondamentale. Cependant, la boucle à verrouillage de phase, PLL (Phase Locked Loop), est la technique la plus répandue pour extraire la phase et la composante directe de la tension du réseau. C'est une technique asservie comprenant un régulateur pour la détection de la pulsation directe de la tension et utilisant une transformation pour passer dans le repère de Park (repère dq0). En effet, cette technique est née en 1932 afin d'améliorer la réception des signaux radio électriques en modulation d'amplitude. Aujourd'hui, les applications de la PLL sont nombreuses et variées (transmission en modulation de fréquence, radars, asservissement de la vitesse de moteurs à courant continu, etc.).

Pour le filtre actif série, le système à base de PLL (Fig.3.7) est employé pour extraire l'amplitude et la phase (V_d, δ_d) de la composante directe de la tension à la fréquence fondamentale ($V_{d1,2,3}$). Cette composante est soustraite de la tension perturbée du réseau ($V_{S1,2,3}$) pour déterminer les composantes perturbatrices inverse et homopolaire de la tension ($V_{dif1,2,3}$). Afin de réguler la tension de la charge, la différence entre la composante continue de la tension désirée ($V_{d-des} = 220\sqrt{2}$) et la composante continue fournie par la PLL (V_d) est introduite dans un bloc de transformation inverse de Park ayant un angle de rotation δ_d . Les tensions de sortie de ce bloc ($V_{r1,2,3}$) sont ajoutées aux composantes perturbatrices ($V_{dif1,2,3}$) pour former les références de la tension ($V_{ref1,2,3}$) [78], [79].

Cette méthode diminue considérablement le nombre de calculs par rapport aux méthodes classiques et ne nécessite pas une connaissance très précise du réseau perturbé. A cela s'ajoute une optimisation de la puissance apparente du filtre actif série grâce à la conservation de l'angle de la composante directe de tension [19]. La Figure 3.7 illustre le schéma global du système à base de PLL que nous avons utilisé pour notre circuit de commande.

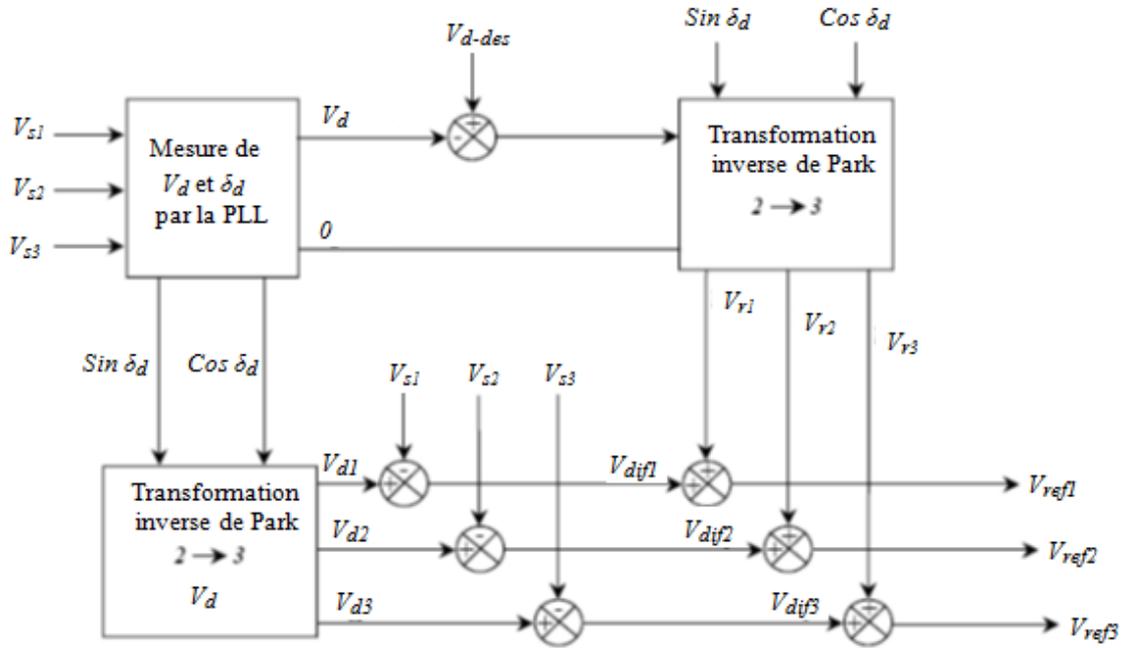


Figure 3.7 : Méthode d'identification basée sur l'emploi d'un système à base de PLL

III.5.2.2 Commande de l'onduleur :

L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui le composent de façon à obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne ou tension de référence en minimisant ses harmoniques non désirées (harmoniques de commutation) et ce, en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée. Le choix du type de commande dépend essentiellement de deux paramètres : d'une part des caractéristiques souhaitées de la tension de sortie (distorsion admissible, spectre basse fréquence souhaité, etc.) et d'autre part de la fréquence de découpage des semi-conducteurs utilisables à la puissance de l'application. Toutefois, deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

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

a. Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre la tension de référence et la

tension produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Fig. 3.8, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations. Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la commande par hystérésis à bande adaptative. Mais dans cette stratégie de commande, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

Finalement, la rapidité du contrôle par hystérésis donne des performances dynamiques et statiques meilleures. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi ce type de commande pour la simulation du filtre actif série.

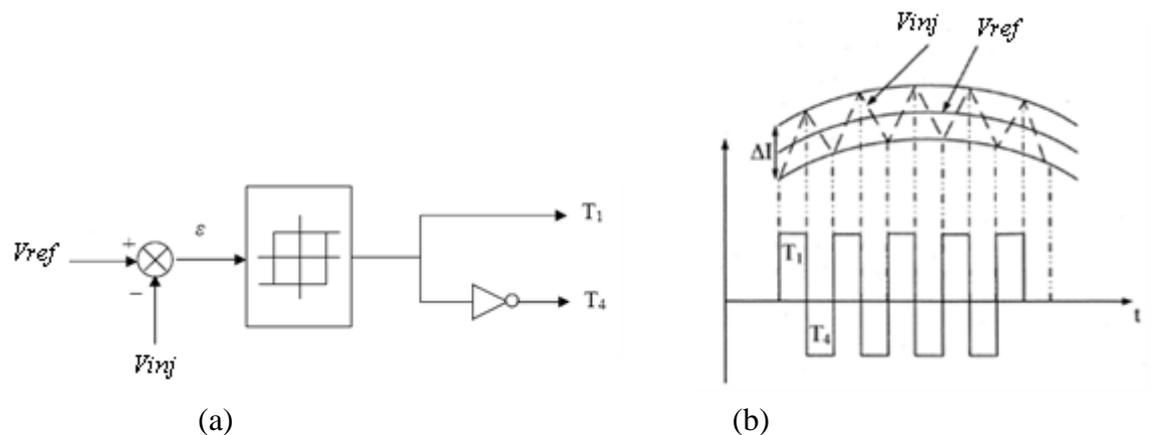


Figure 3.8 : contrôle par hystérésis. (a) : Principe de contrôle, (b) : Commande des interrupteurs

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

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des

modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre la tension mesurée et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Figure 3.9.

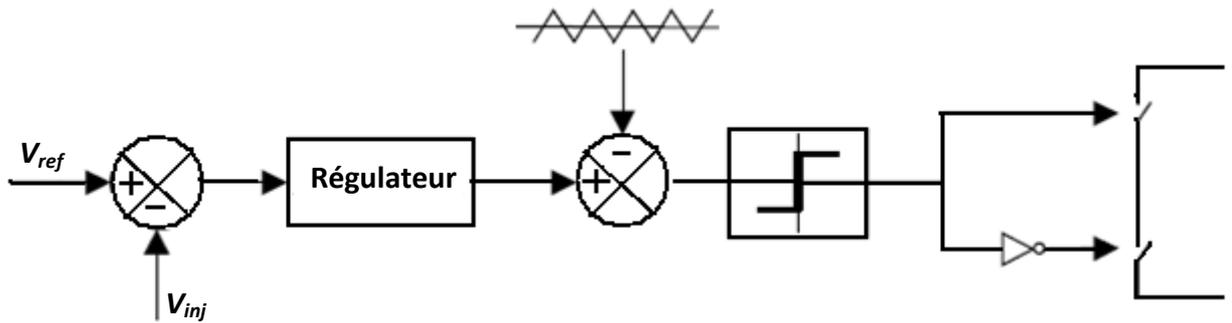


Figure 3.9 : Principe de commande des courants par MLI

D'autres techniques de MLI existent également dans la littérature comme la MLI à échantillonnage régulier où on peut distinguer deux méthodes :

- la MLI à échantillonnage régulier symétrique où la référence est échantillonnée à chaque période de la porteuse,
- la MLI à échantillonnage régulier asymétrique où la référence est échantillonnée à la demi-période de la porteuse.

Il y a d'autres techniques de commande, comme la commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs.

III.5.2.3 Régulation de la tension du filtre actif série :

La fonction de transfert du filtre actif série donnée par l'équation 3.7 peut être écrite de la forme suivante :

$$v_{inj} = \frac{B_1(s)}{A(s)} V_f + \frac{B_2(s)}{A(s)} i_{ch} \quad (3.8)$$

Avec $B_1(s)$, $B_2(s)$ et $A(s)$ données par les équations suivantes :

$$B_1(s) = R_a C_{fs} S + 1 \quad (3.9)$$

$$B_2(s) = R_a L_{fs} C_{fs}^2 S^3 + (L_{fs} + R_{fs} R_a) C_{fs} S^2 + R_{fs} C_{fs} S \quad (3.10)$$

$$A(s) = L_{fs} C_{fs} S^2 + (R_{fs} + R_a) C_{fs} S + 1 \quad (3.11)$$

Le schéma global de la boucle de régulation de tension du *filtre actif série* est donné par la Fig. 3.10.

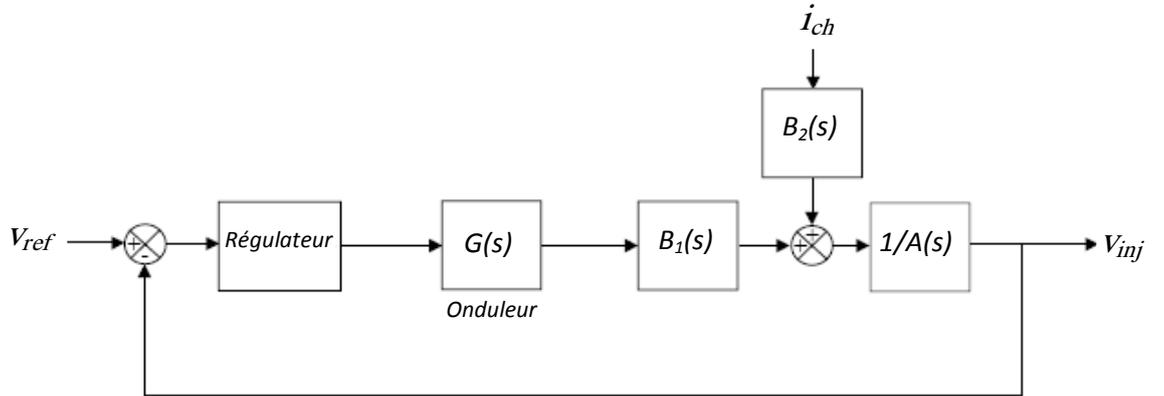


Figure 3.10 : Schéma de la régulation de la tension du F.A.S

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

$$G(s) = \frac{V_c}{2U_p} \quad (3.12)$$

Avec :

V_c : tension continue du condensateur de stockage d'énergie.

U_p : amplitude de la porteuse.

Si $V_c = 2U_p$, $G(s) = 1$ donc, le schéma de la régulation simplifié est représenté par la figure 3.11.

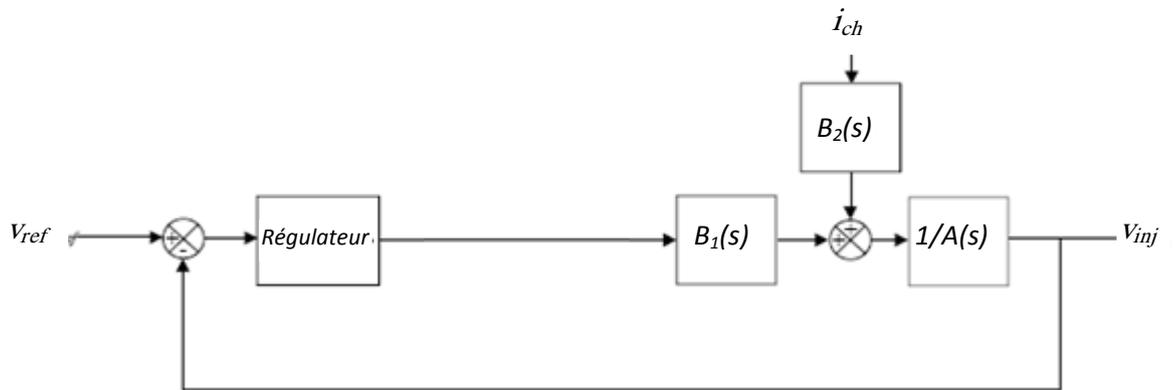


Figure 3.11 : Schéma simplifié de régulation de la tension du F.A.S

III.6 Etude de la puissance apparente du FAS :

Dans cette partie, nous aborderons l'étude de la puissance apparente du filtre actif série, de manière à évaluer, du point de vue économique, les possibilités de compensation pour tout type de perturbations de tension.

Avant de débiter cette étude, nous devons connaître les valeurs de tension et de courant que doit supporter chaque interrupteur de l'onduleur. Généralement, ces interrupteurs sont choisis pour supporter individuellement la tension continue V_c et la valeur crête du courant de la charge à protéger I_{ch} tout en tenant compte des composantes dues aux commutations.

Dans cette partie, la compensation des harmoniques, des creux de tension monophasée, biphasée et triphasée a été étudiée et les courbes de la puissance du filtre actif série ont été tracées et comparées entre elles. La puissance apparente du filtre actif série va donner une idée du rapport de la puissance du filtre actif série sur celle de la charge à protéger pour

chaque cas de compensation. Afin d'estimer la puissance apparente du filtre actif série, la tension du réseau a été modélisée en introduisant trois coefficients d'amplitude

(k_1, k_2, k_3) appartenant à l'intervalle $[0, 1]$ et trois angles de déphasage $(\beta_1, \beta_2, \beta_3)$ appartenant à l'intervalle $[-180^\circ, 180^\circ]$. Nous pouvons donc écrire pour les trois phases:

$$\begin{cases} v_{s1} = k_1 V \cos(\omega t + \beta_1) \\ v_{s2} = k_2 V \cos(\omega t + \beta_2 - 2\pi/3) \\ v_{s3} = k_3 V \cos(\omega t + \beta_3 + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3.13)$$

Cette même tension du réseau a été décomposée en trois séquences directe (V_d), inverse (V_i) et homopolaire (V_o). La puissance apparente de la charge à protéger après compensation (S_{ch}), pour un courant (I_{ch}) et une tension (V_{ch}) dont l'angle est (δ_{ch}), est donnée par l'équation (3.14).

$$S_{ch} = 3V_{ch}I_{ch} \quad (3.14)$$

La puissance apparente du *filtre actif série* (S_{FAS}) est composée de trois puissances apparentes: directe (S_{d-inj}), inverse (S_i) et homopolaire (S_o). La puissance directe (injectée) (S_{d-inj}) est due à la tension directe injectée par le filtre actif (V_{d-inj}). Cette tension est la différence entre la tension directe désirée ($V_{d-des}, \delta_{d-des}$) et la tension directe du réseau électrique (V_d, δ_d). La puissance inverse (S_i) est due à la tension inverse injectée par le filtre actif (V_i) tandis que la puissance homopolaire (S_o) est due à la tension homopolaire injectée par le filtre actif (V_o), comme le décrivent les équations suivantes [19]:

$$\begin{cases} S_{d-inj} = 3(\vec{V}_{d-des} - \vec{V}_d)I_{ch} \\ S_i = 3V_i I_{ch} \\ S_o = 3V_o I_{ch} \end{cases} \quad (3.15)$$

En se basant sur l'équation (3.15), la puissance totale apparente du *filtre actif série* peut être donnée par l'équation (3.16) [19].

$$S_{FAS} = \sqrt{S_{d-inj}^2 + S_i^2 + S_o^2} \quad (3.16)$$

Il est à noter que l'objectif de la compensation des creux de tension est d'établir, aux bornes de la charge à protéger, une tension \vec{V}_{ch} dont l'amplitude est égale à la tension désirée ($V_{max-ch} = V_{d-des}$) et dont l'angle est égal à un angle désiré ($\delta_{ch} = \delta_{d-des}$).

III.6.1 Compensation des courants harmoniques :

Si le filtre actif série est commandé seulement comme source de tension harmonique équilibrée, alors le filtre actif série fournit seulement les tensions harmoniques de la charge (c-à-d. $V_{inj} = V_h$). Et Si la compensation harmonique est complètement réalisée, la tension de la charge devient sinusoïdale, donc La puissance apparente du FAS et de la charge est donnée par les expressions suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{FAS} = 3 V_{inj} I_{ch} = 3 V_h I_{ch} \\ S_{ch} = 3 V_{ch} I_{ch} = 3 V_1 I_{ch} \\ \frac{S_{FAS}}{S_{ch}} = \frac{V_h}{V_1} = THD_v \end{array} \right. \quad (3.17)$$

V_h : valeur efficace des harmoniques de la tension injectée par le FAS.

I_{ch} : courant efficace de la charge

V_1 : tension efficace de la fondamentale

THD_v : taux de distorsion globale de la tension du réseau.

Pratiquement, les puissances dues aux tensions harmoniques sont négligeables par rapport à la puissance de la composante fondamentale si le FAS compense aussi les creux et le déséquilibre.

III.6.2 Compensation des creux de tensions monophasés :

Premièrement on va aborder la compensation des creux de tensions monophasées. Dans ce cas, le filtre actif série injecte au réseau électrique trois composantes de tension directe, inverse et homopolaire. Sachant que les angles de déphasage de tension du réseau sont dans ce cas ($\beta_1=\beta$ et $\beta_2=\beta_3=0$) et que les coefficients d'amplitude sont ($k_1=k$ et $k_2=k_3=1$), les tensions injectées au réseau (après l'utilisation des composants symétriques) sont :

$$\begin{cases} V_d = \frac{V}{3\sqrt{2}} |2 + k \cos \beta + j k \sin \beta| \\ V_i = V_0 = \frac{V}{3\sqrt{2}} |k \cos \beta - 1 + j k \sin \beta| \end{cases} \quad (3.18)$$

Des équations (3.14) et (3.16), le rapport τ_{mo-ph} , entre la puissance du *filtre actif série* et la puissance de la charge à protéger est donnée par l'équation suivante :

$$\tau_{mo-ph} = \frac{S_{FAS}}{S_{ch}} = \sqrt{\left(\left| \frac{\vec{V}_{d-des} - \vec{V}_d}{V_{ch}} \right| \right)^2 + \left(\frac{V_i}{V_{ch}} \right)^2 + \left(\frac{V_0}{V_{ch}} \right)^2} \quad (3.19)$$

$$\text{Avec } \vec{V}_{d-des} = \sqrt{2} V_{d-des} \angle \delta_{d-des} \text{ et } \vec{V}_d = \sqrt{2} V_d \angle \delta_d$$

La plupart des systèmes de commande comme le système à base de PLL donne la possibilité de synchroniser sur la composante directe de la tension ($\delta_d = \delta_{d-des}$). L'équation 3.19 devient :

$$\tau_{mo-ph} = \frac{S_{FAS}}{S_{ch}} = \sqrt{\left(\frac{V_{d-des} - V_d}{V_{ch}} \right)^2 + \left(\frac{V_i}{V_{ch}} \right)^2 + \left(\frac{V_0}{V_{ch}} \right)^2} \quad (3.20)$$

Puisque $V_{d-des} = V_{ch}$, L'équation 3.20 devient :

$$\tau_{mo-ph} = \frac{S_{FAS}}{S_{ch}} = \sqrt{\left(1 - \frac{V_d}{V_{ch}} \right)^2 + \left(\frac{V_i}{V_{ch}} \right)^2 + \left(\frac{V_0}{V_{ch}} \right)^2} \quad (3.21)$$

A partir des équations (3.18) et (3.21), on obtient l'équation suivante :

$$\tau_{mo-ph} = \frac{S_{FAS}}{S_{ch}}$$

$$= \sqrt{\left(1 - \frac{|2 + k \cos \beta + j k \sin \beta|}{3}\right)^2 + 2 \left(\frac{|k \cos \beta - 1 + j k \sin \beta|}{3}\right)^2} \quad (3.22)$$

A partir de l'équation (3.22), les courbes du rapport des puissances, du *filtre actif série* et de la charge à protéger en fonction de k et β sont données sur la Fig. 3.12. Dans cette figure, $(1-k)$ est la profondeur du creux de tension. A partir de cette figure, on observe que la puissance maximale injectée par le *filtre actif série* est ($S_{FAS}=1,18 S_{ch}$) pour le cas extrême ($1-k=0$) et ($\beta=180^\circ$).

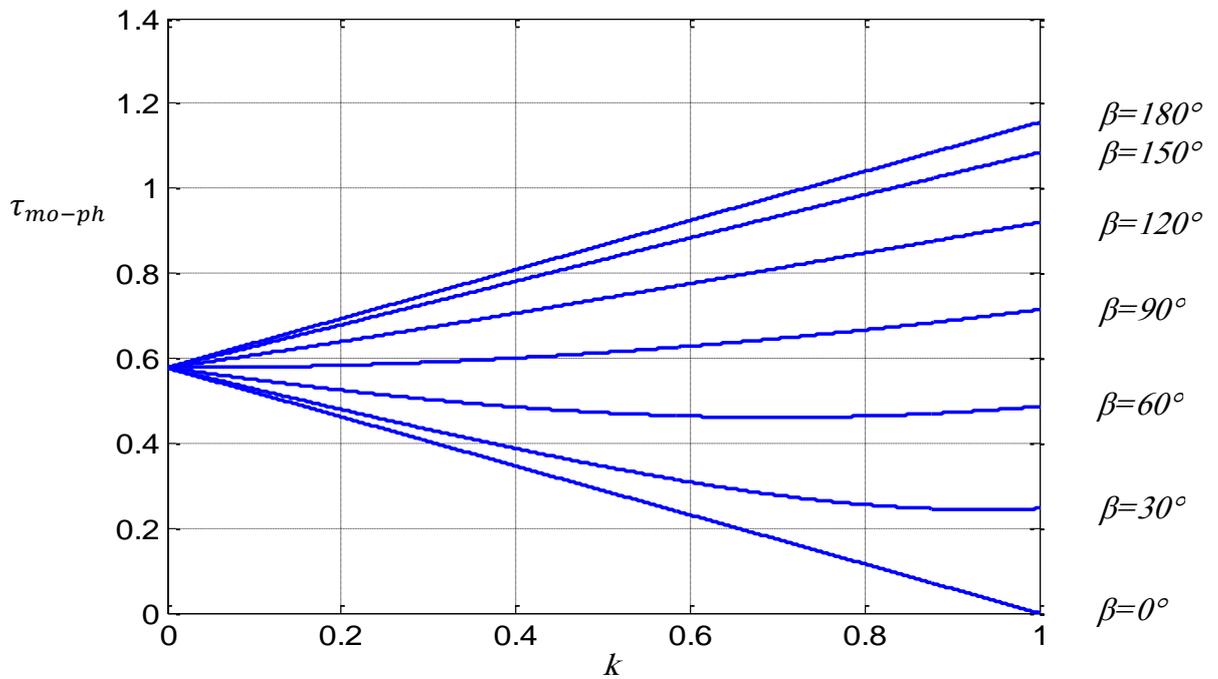


Figure 3.12 : Rapport de puissances de F.A.S par rapport à la charge à protéger pour des creux de tensions monophasés.

III.6.3 Compensation des creux de tensions biphasés :

Cette partie concerne l'étude de la puissance apparente pour la compensation des creux de tension biphasés. Dans ce cas, le *filtre actif série* injecte au réseau électrique trois composantes de tension directe, inverse et homopolaire. Sachant que les angles de

déphasage de tension sont dans ce cas $\beta_1=\beta_2=\beta$ et $\beta_3=0$ et que les coefficients d'amplitude ont les valeurs $k_1=k_2=k$ et $k_3=1$, les tensions injectées au réseau sont :

$$\begin{cases} V_d = \frac{V}{3\sqrt{2}} |A_d + jB_d| \\ V_i = \frac{V}{6\sqrt{2}} |A_i + jB_i| \\ V_o = \frac{V}{6\sqrt{2}} |A_o + jB_o| \end{cases} \quad (3.23)$$

Avec,

$$\begin{cases} A_d = 1 + 2k \cos \beta \\ B_d = 2k \sin \beta \\ A_i = k (\cos \beta - \sqrt{3} \sin \beta) - 1 \\ B_i = k (\sin \beta + \sqrt{3} \cos \beta) - \sqrt{3} \\ A_o = k (\cos \beta + \sqrt{3} \sin \beta) - 1 \\ B_o = k (\sin \beta - \sqrt{3} \cos \beta) + \sqrt{3} \end{cases} \quad (3.24)$$

Le rapport, τ_{bi-ph} , entre la puissance du *filtre actif série* et la puissance de la charge à protéger est donnée par l'équation suivante :

$$\tau_{bi-ph} = \frac{S_{FAS}}{S_{ch}} = \sqrt{\left(1 - \frac{V_d}{V_{ch}}\right)^2 + \left(\frac{V_i}{V_{ch}}\right)^2 + \left(\frac{V_o}{V_{ch}}\right)^2} \quad (3.25)$$

A partir des équations (3.23) et (3.25), on obtient l'équation suivante :

$$\begin{aligned} \tau_{bi-ph} &= \frac{S_{FAS}}{S_{ch}} \\ &= \sqrt{\left(1 - \frac{|A_d + jB_d|}{3}\right)^2 + \left(\frac{|A_i + jB_i|}{6}\right)^2 + \left(\frac{|A_o + jB_o|}{6}\right)^2} \end{aligned} \quad (3.26)$$

A partir de l'équation (3.26), les courbes du rapport des puissances, du *filtre actif série* et de la charge à protéger en fonction de k et β sont données sur la Fig. 3.13. Dans ce cas, la puissance maximale du filtre actif série est ($S_{FAS} = 1,22 S_{ch}$) pour le cas extrême ($k=0,5$) et ($\beta=180^\circ$).

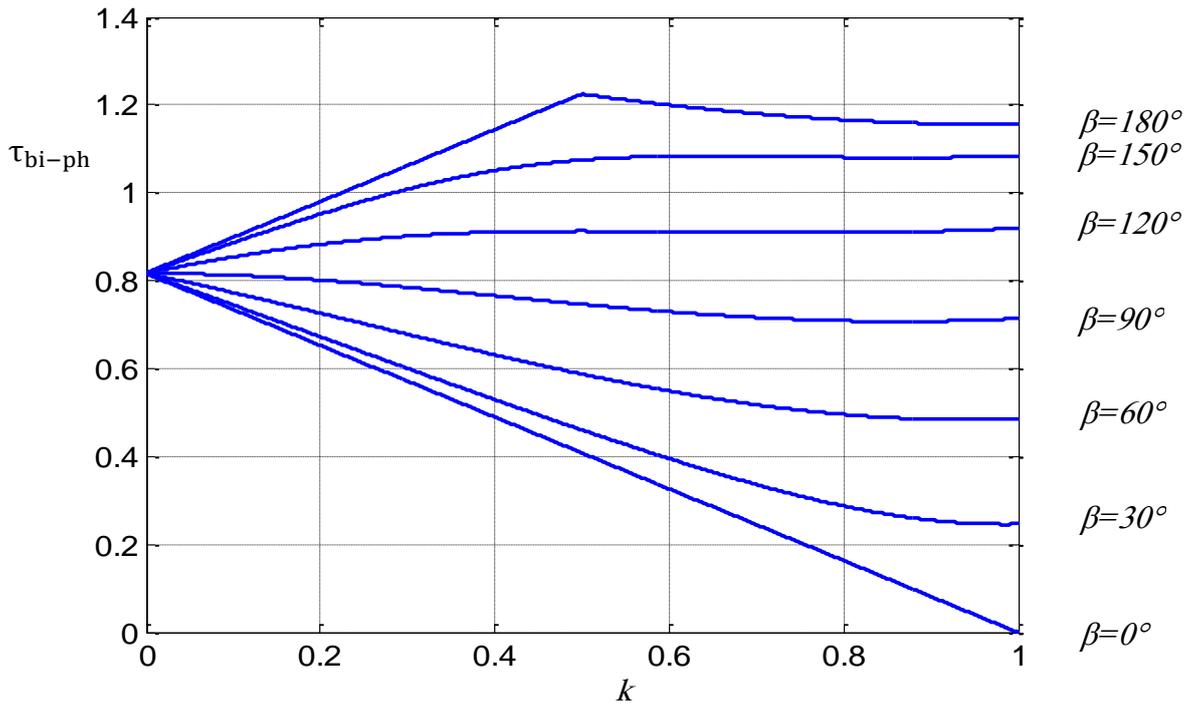


Figure 3.13 : Rapport de puissances de F.A.S par rapport à la charge à protéger pour des creux de tensions biphasées.

III.6.4 Compensation des creux de tensions triphasés :

Enfin, la puissance apparente du filtre actif série, compensant les creux de tensions triphasés, a été calculée. Dans ce cas, le filtre actif série injecte au réseau électrique trois composantes de tension directe, inverse et homopolaire. Sachant que les angles de déphasage de tension sont dans ce cas $\beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \beta$ et que les coefficients d'amplitude ont les valeurs $k_1 = k_2 = k_3 = k$, les tensions injectées au réseau sont :

$$\begin{cases} V_d = \frac{kV}{\sqrt{2}} |\cos \beta + j \sin \beta| \\ V_i = \frac{kV}{3\sqrt{2}} \sin \beta \\ V_o = 0 \end{cases} \quad (3.27)$$

Le rapport, τ_{tri-ph} , entre la puissance du *filtre actif série* et la puissance de la charge à protéger est donnée par l'équation suivante :

$$\tau_{tri-ph} = \frac{S_{FAS}}{S_{ch}} = \sqrt{\left(1 - \frac{V_d}{V_{ch}}\right)^2 + \left(\frac{V_i}{V_{ch}}\right)^2 + \left(\frac{V_0}{V_{ch}}\right)^2} \quad (3.28)$$

A partir des équations (3.27) et (3.28), on obtient l'équation suivante :

$$\tau_{tri-ph} = \frac{S_{FAS}}{S_{ch}} = \sqrt{(1 - k|\cos \beta + j \sin \beta|)^2 + \left(\frac{k \sin \beta}{3}\right)^2} \quad (3.29)$$

A partir de l'équation (3.29), les courbes du rapport des puissances, du *filtre actif série* et de la charge à protéger en fonction de k et β sont données sur la Fig. 3.14. Dans ce cas, la puissance maximale injectée par *le filtre actif série* est $S_{FAS} = S_{ch}$, pour le cas extrême $1-k=1$.

A partir des trois cas de creux de tension analysés, on peut remarquer que la puissance apparente injectée par le filtre actif série peut être très élevée pour les cas extrêmes de creux de tension. Cela, du point de vue économique, peut conduire à limiter la compensation des creux de tension (par exemple, seulement jusqu'à 30%).

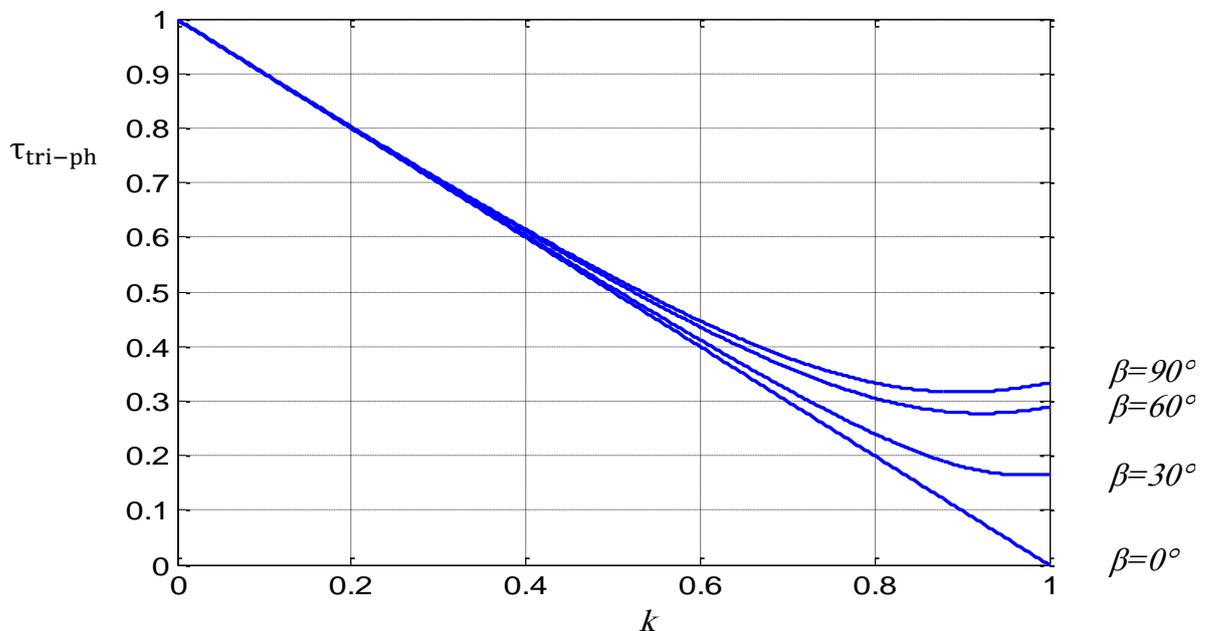


Figure 3.14 : Rapport de puissances de F.A.S par rapport à la charge à protéger pour des creux de tensions triphasées.

III.7 Conclusion :

Dans ce troisième chapitre on a présenté la structure générale du système étudié dans ce mémoire (association réseau électrique - charge linéaire sensible aux harmoniques - filtre actif série). Le modèle mathématique de chaque partie est développé.

La structure générale du filtre actif série, était détaillée en la divisant en deux :

- la partie puissance constituée de l'onduleur de tension, la source de tension continue, le filtre de sortie (Filtre LC) et le transformateur.
- la partie contrôle (commande) incluant l'identification des tensions harmoniques par la méthode trigonométrique, et la régulation par un régulateur à hystérésis de la tension injectée par le filtre actif.

Dans le chapitre suivant on présente les différents résultats de simulation du système décrit dans ce troisième chapitre.

Chapitre IV :

Simulation et résultats

IV.1. Introduction :

L'étude théorique effectuée dans ce chapitre est étayée dans cette partie, à travers plusieurs simulations, avec le logiciel Matlab-Simulink, du filtre actif série compensant des creux, des surtensions, des déséquilibres et des harmoniques de tension. Ceci, est dans le but d'étudier le bon fonctionnement du filtre proposé et de valider son efficacité, sa rapidité ainsi que ses bonnes performances.

La présentation des résultats de cette simulation ainsi que leurs interprétations font l'objet de ce chapitre.

IV.2. Présentation du logiciel :

MATLAB et ses boîtes à outils, célèbre pour être un outil incontournable pour l'ingénierie et la recherche, permet la modélisation et simulation des systèmes dynamiques, analogique, discrets ou hybride, en utilisant une présentation graphique sous forme de schémas blocs, permettant alors d'aboutir à la création de bibliothèques personnalisées. L'une des principales options dans la boîte à outils de l'interface graphique « SIMULINK » est « POWER SYSTEM LIBRARY browser » où existent tous les outils les plus connus sous forme de blocs et dont on a besoin pour construire un modèle. Puis en deuxième position, l'option « SIMULATION PARAMETERS » Permet de choisir la méthode de résolution « Solver », le temps de simulation, ainsi que les précisions relative et absolue voulues [32].

IV.3. Paramètres de système :

Les paramètres et les valeurs des éléments caractérisant la structure générale du FAS sont donnés dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Valeurs des éléments construisant la structure du FAS étudiée

Réseau électrique	
$S_{cc} / S_{ch} = 3000$	
Charges perturbatrices	
Charge non linéaire	80 kVA
Filtre actif série	
V_c	850V
C_{dc1}, C_{dc2}	8.8mF
$R_a, R_{fs}, C_{fs}, L_{fs}$	0.1 Ω , 0.030 Ω , 220 μ F, 1 mH
Transformateurs d'injection de tension	
45 kVA, 220 V, 1:1	
R_t, L_t, R_m, L_m	0.0001pu, 0.0001pu, 5000pu, 5000pu
Technique de commande de l'onduleur	commande par hystérésis avec une bande H = 1A
Identification des tensions perturbatrices	Méthode à système PLL

IV.4. Structure générale du filtre actif série étudié :

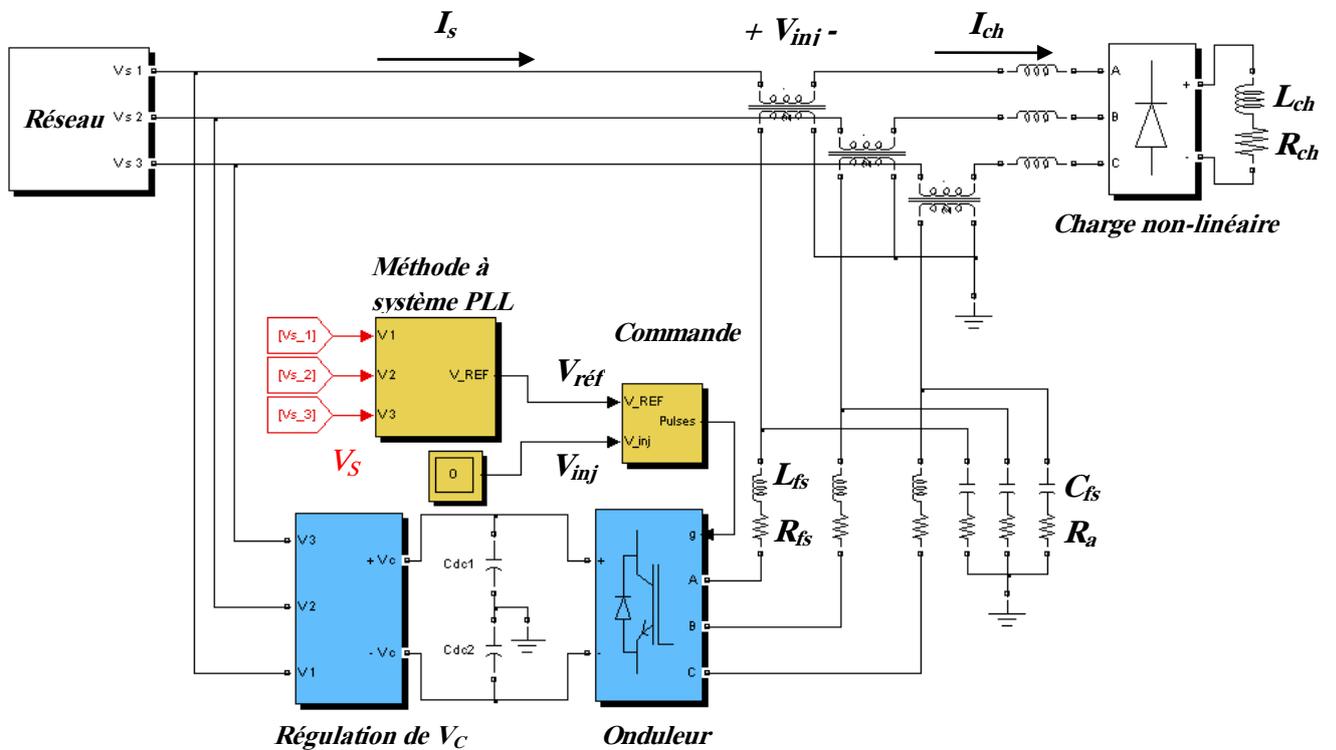


Figure 4.1 : Structure générale du filtre actif série étudié.

L'ensemble de la structure étudiée, comme le montre la Figure 4.1, est composé d'une source de tension triphasée (trois fils) développée et construite pour simuler tous les types de perturbations en tensions au point de raccordement, une charge inductive représentée par l'élément RL et connectée au système à travers un redresseur triphasé (pont de Graetz) et le filtre actif série constitué, comme étudié dans le chapitre précédent, de la partie puissance (comprenant le transformateur série, l'onduleur de tension et le filtre de sortie) et la partie commande (comprenant le générateur de référence et le contrôleur).

IV.5. Compensation des tensions harmoniques :

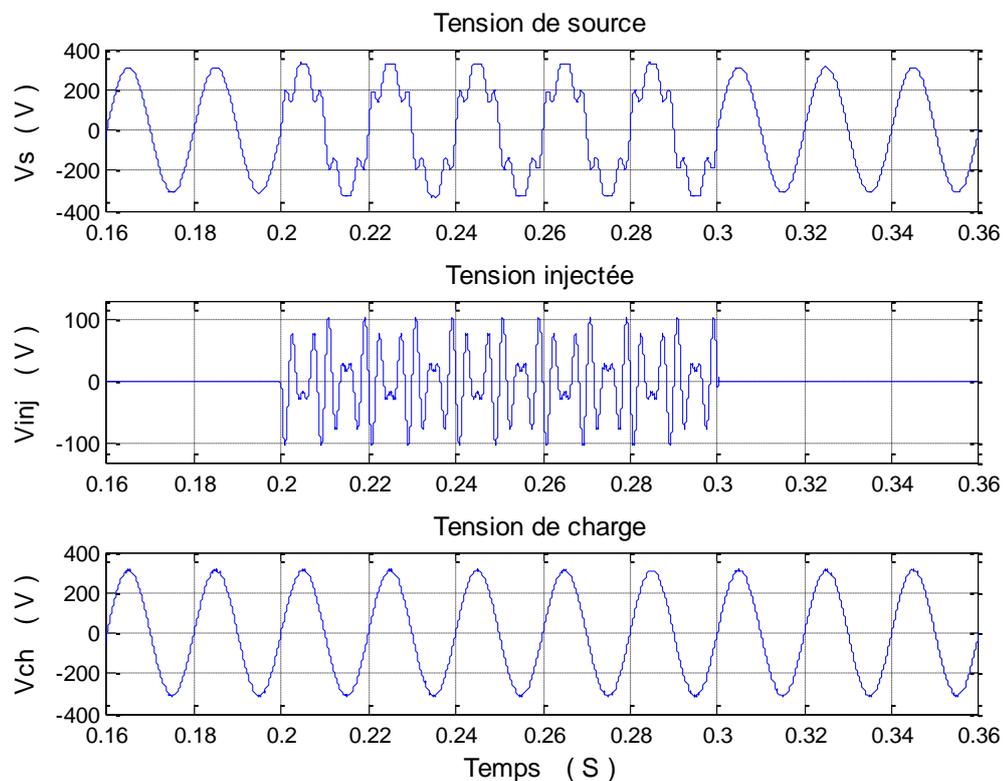


Figure 4.2 : Compensation des tensions harmoniques par le FAS.

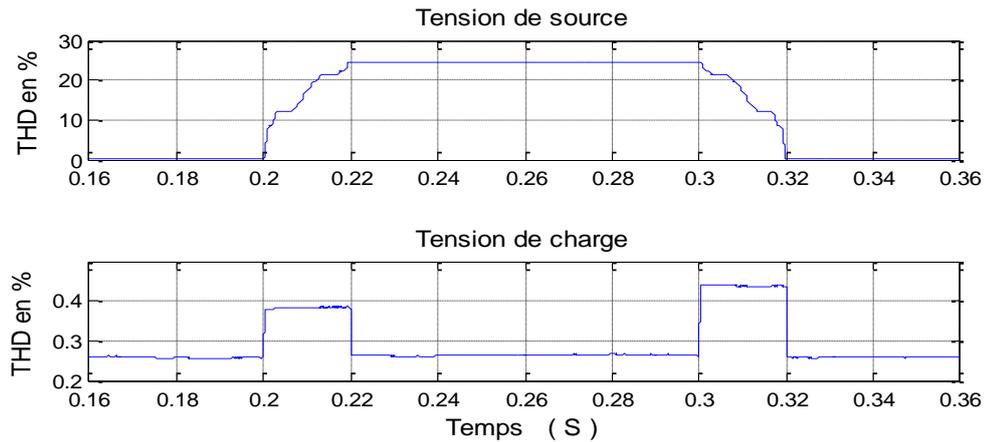


Figure 4.3 : Valeurs de THD des tensions de la source et de la charge

À partir de la Figure 4.2, on peut voir que lorsque la source de tension commence à générer des tensions harmoniques le FAS injecte, à travers le transformateur série, la tension perturbatrice opposée. Ceci est dans le but de protéger et rendre la tension de charge parfaitement sinusoïdale. Toutefois, la Figure 4.3 présente les deux graphiques des valeurs de THD des tensions de source et de charge avant et après compensation. En comparant ces valeurs, nous déduisons que la valeur du THD de la tension de charge est maintenue presque constante à la même valeur et qu'elle a baissé de 99% (24.47% à 0.27 %) par rapport à la valeur de la tension de source durant l'application des tensions harmoniques.

IV.6. Compensation des creux de tensions :

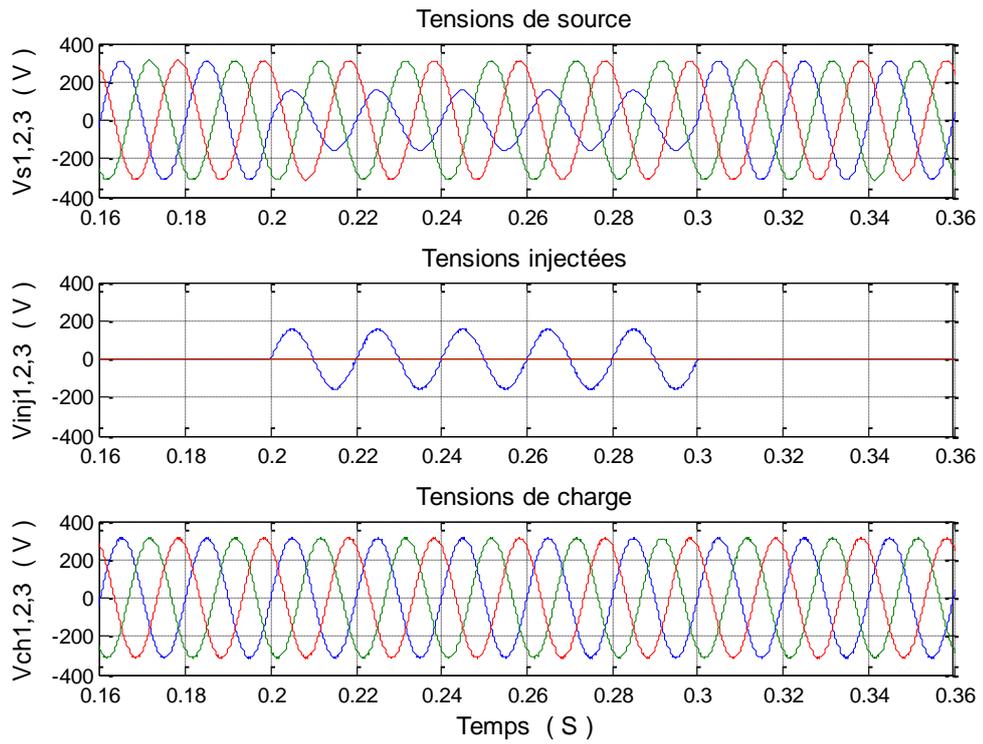


Figure 4.4 : Compensation de creux de tension monophasé

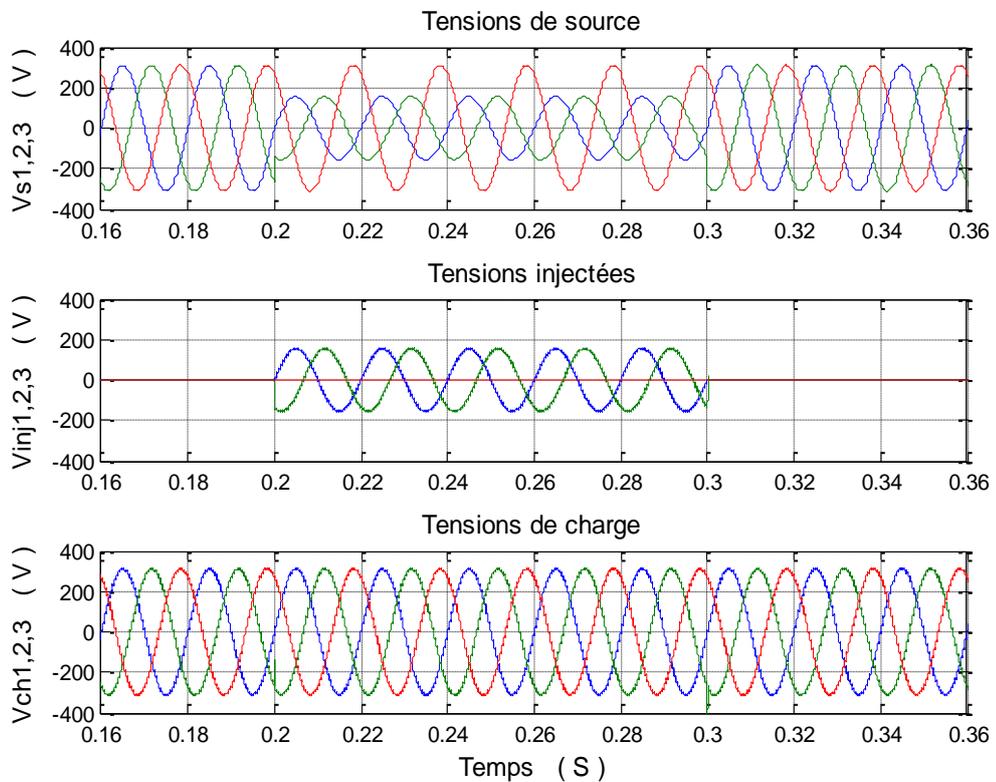


Figure 4.5 : Compensation des creux de tensions biphasés

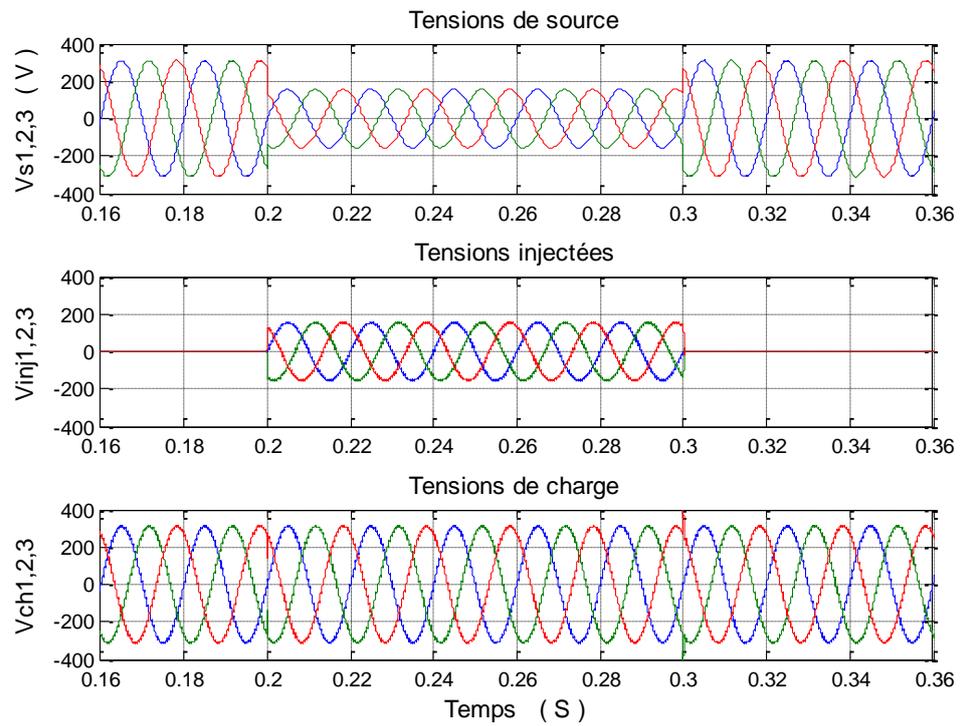


Figure 4.6 : Compensation des creux de tensions triphasés.

Comme il est illustré sur les **Figures 4.4, 4.5, 4.6**, on remarque qu'à l'instant $t = 0.2$ Sec l'amplitude de la tension de source est réduite de 50% alors que la tension de charge est gardée toujours protégée à la même valeur désirée (220V). Ceci est grâce au FAS qui injecte à travers le transformateur série la tension manquante ou compensatrice.

IV.7. Compensation de sursensions :

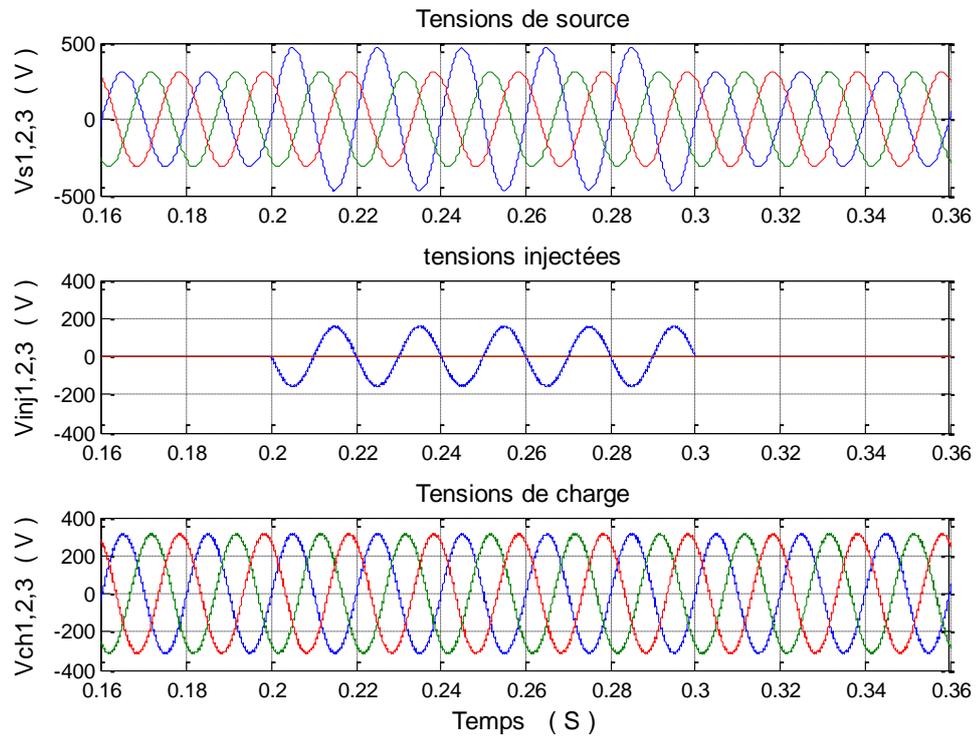


Figure 4.7 : Compensation de sursension monophasée

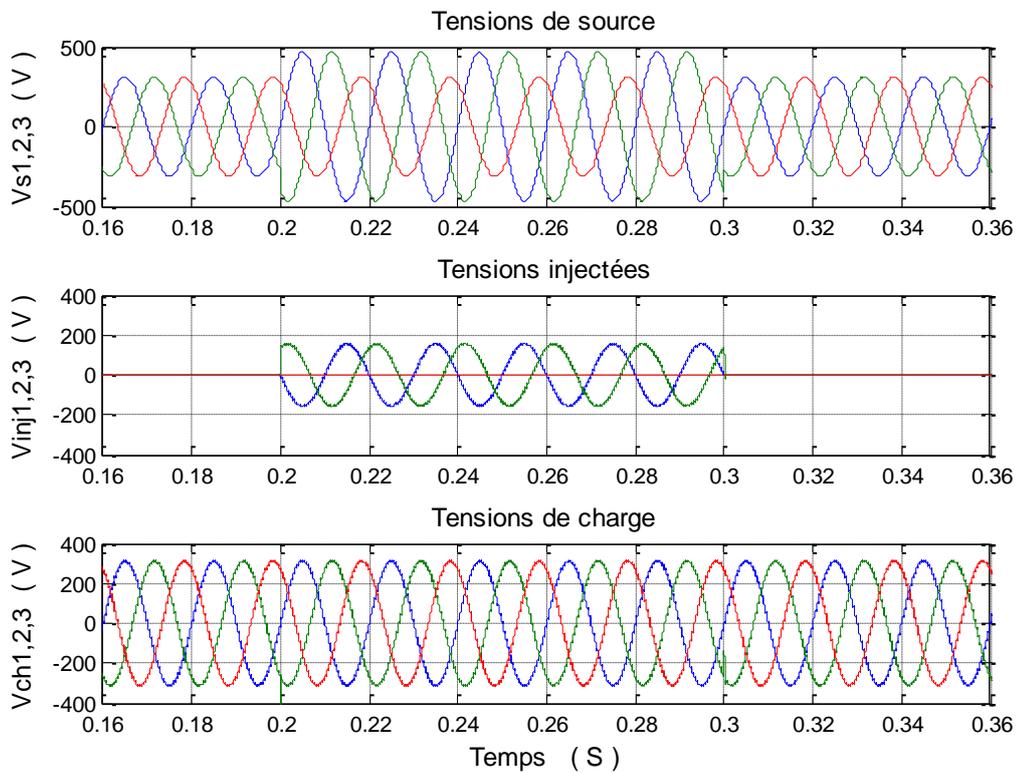


Figure 4.8 : Compensation de sursensions biphasées

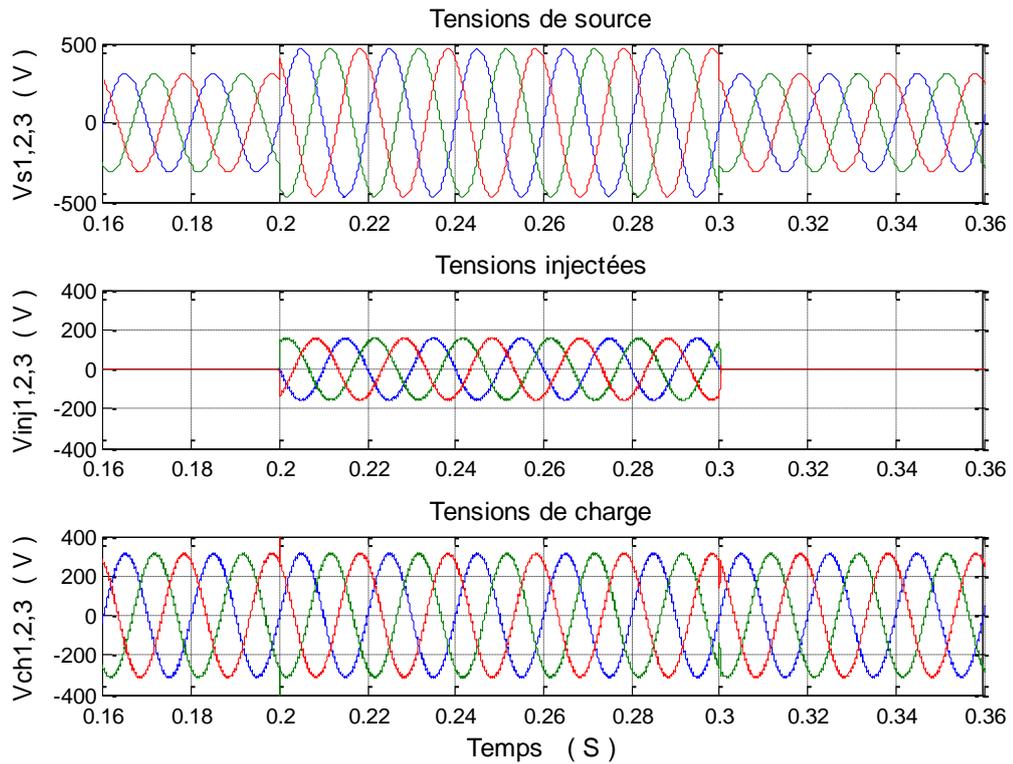
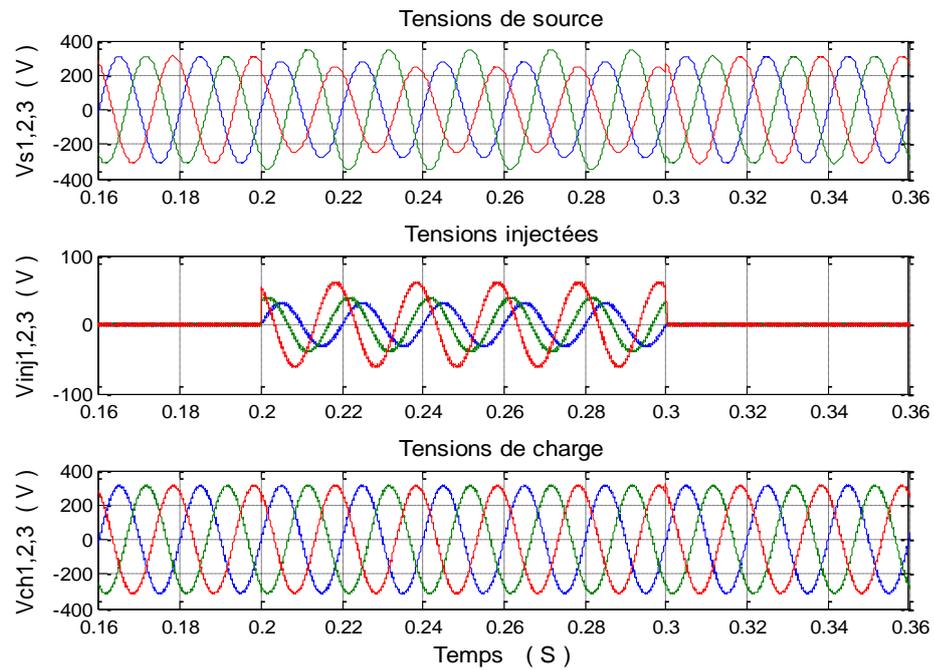


Figure 4.9 : Compensation de surtensions triphasées.

En analysant les **Figures 4.7, 4.8, 4.9**, nous déduisons que dès l'instant $t=0.2$ Sec notre FAS a compensé et corrigé parfaitement les surtensions (de 50%), en injectant à travers le transformateur série des tensions compensatrices qui sont bien synchronisées et en opposition de phase avec la tension de source.

IV.8. Compensation du déséquilibre en tension :**Figure 4.10 :** Compensation du déséquilibre en tension.

D'après le **Figure 4.10**, On peut constater que dès le début du déséquilibre en amplitude dans la source de tension triphasée, le FAS est mis en marche et que la tension de charge est devenue pratiquement équilibrée en amplitude.

IV.9. Compensation de toutes les perturbations en tension :

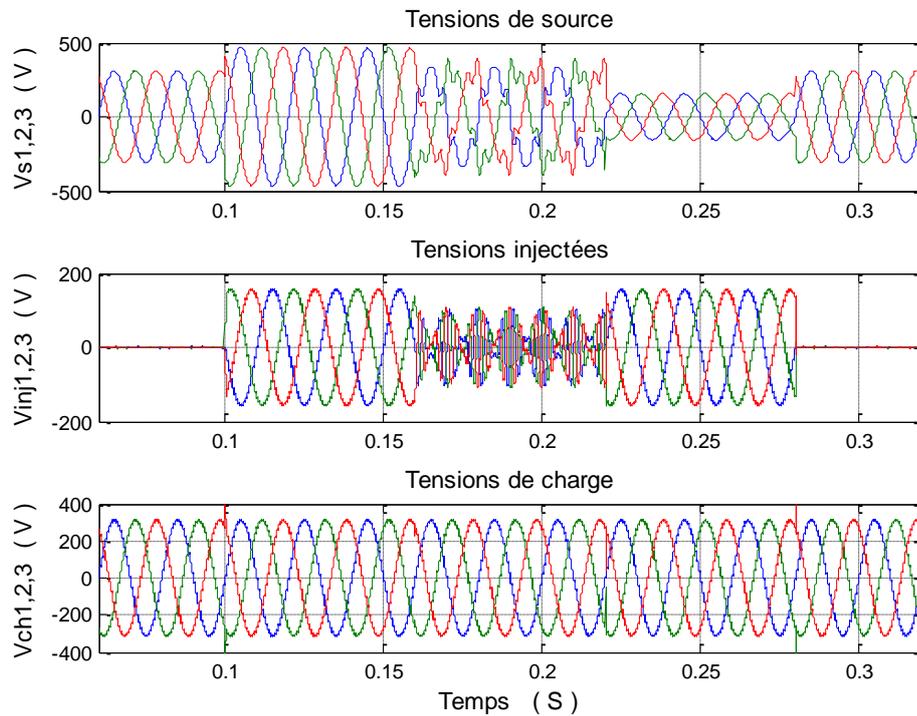


Figure 4.11 : Compensation de toutes les perturbations en tension

Enfin, et selon le **Figure 4.11**, on peut dire que le FAS corrige adéquatement et efficacement toutes les perturbations en tension créés au point de raccordement de la charge à protéger.

IV.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons illustré les performances d'un *filtre actif série* lors de perturbations de types tensions.

Les résultats de la simulation montrent que notre filtre de puissance actif en cascade compense correctement les cas d'étude. De plus, la qualité de filtration a été évaluée selon le THD ce qui nous a donné de très bons résultats.

Conclusion Générale

Dans notre mémoire, nous sommes intéressés à l'étude d'un dispositif de dépollution de type tension des réseaux électriques appelés « Filtre actif Série », celui-ci ayant pour objectif l'élimination des perturbations de type tension tel que : harmoniques, chute de tension, surtension, déséquilibre de tension.

Dans le premier chapitre, nous avons abordé la qualité de l'énergie électrique et les problèmes qui l'affectent, tels que les perturbations. Nous avons également examiné ces perturbations (en particulier les harmoniques) avec leurs différentes origines et leur impact sur le réseau électrique. Cet impact peut être clairement observé à plusieurs niveaux, par exemple, l'élévation de la température des appareils électriques.

Nous avons consacré le deuxième chapitre à présenter différentes solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique et réduire les harmoniques. Nous avons identifié deux types de solutions : les approches traditionnelles et les approches modernes. 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.

Au niveau du chapitre trois nous avons illustré et étudié le filtre qui repose sur un onduleur de tension à deux niveaux commandé par un régulateur non linéaire de type Hystérésis dont les tensions harmoniques de référence sont identifiées en utilisant la méthode des puissances instantanées.

Nous avons également étudié les différents éléments de notre système, donnant plus de détail sur chaque élément constituant la partie puissance : convertisseur de tension, transformateur d'injection de tension, système de stockage, et le filtre de sortie.

Dans le quatrième chapitre, la modélisation de l'ensemble a été effectuée, et les différents Résultats de simulation montrent l'efficacité et les performances de notre approche.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] **MURAT KALE, ENGINOZDEMIR**, « An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filters », Elsevier, Electric Power Systems Research 73 (2005) 113–119.
- [2] **BELHADJ KHEIRA et BOUZIR NESSRINE** « HARMONIQUES ET DEPOLLUTION DU RESEAU ELECTRIQUE », MÉMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des sciences et de la technologie Département de Génie électrique, Année universitaire : 2021 – 2022.
- [3] **MOHAMAD ALAA EDDIN ALALI** « Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension (Automatisation des systèmes de puissance électriques) » Thèse de Doctorat, Strasbourg 12 Septembre 2002.
- [4] **HANENE KOUARA** « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » Mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006.
- [5] **L. GYUGYI, E.C. STRYCULA**, « Active AC power filters », in Proc. IEEE US, 529- 535 (1976).
- [6] **M.A.E. ALALI**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de l'université Louis Pasteur, Strasbourg I, 12 Septembre 2002.
- [7] **J. ARRILLAGA, N.R. WATSON**, « Power system harmonics », Second Edition 2003, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-85129-5.
- [8] **H. AKAGI**, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- [9] **KOUARA.H**, « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension », Thèse d'Université de Batna, 8 février 2006.
- [10] **D.NEKKAR**, « Contribution l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés », Thèse d'Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014.
- [11] **D.ROBINSON**, « Harmonic management in MV distribution systems », A thesis submitted in fulfilment of PHD degree from university of Wollongong, School of electrical, computer and telecommunication engineering, 2003.

- [12] **H. AKAGI**, « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- [13] **A.CHANDRA, B. SINGH, B.N. SINGH, K. AL-HADDAD**, « An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, May 2000.
- [14] **M.A. GRAY**, « A Comparative Analysis of Proportional-Integral Compensated and Sliding Mode Compensated Shunt Active Power Filters », thesis of Mississippi State University, USA, December 2004.
- [15] **C. E. LIN, C. L. CHEN, AND C. L. HUANG**, « Calculating approach, implementation for active filters in unbalanced three-phase system using synchronous detection method », in Proc. IEEE IECON.92, 1992, pp. 374.380.
- [16] **S. BHATTACHARYA, A. VELTMAN, D. M. DIVAN, AND R. D. LORENZ**, « Flux based active filter controller », in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1995, pp. 2483.2491.
- [17] **H.AKAGI, A. NABAE, S. ATOH**, « Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-22, pp. 460-465, 1986.
- [18] **M. BOJRUP**, « Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger «Application», thesis of Lund Institute of Technology, Sweden, 1999.
- [19] **G. BOULAARES**, «Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension», Thèse d'Université de Batna,30 juin 2012.
- [20] **S. BALA**, « One cycle control of three-phase VAR compensators and active power filters », thesis of Indian Institute of Technology, Bombay, April 2003.
- [21] **R.A. EL SHATSHAT**, « A Novel Modular Approach to Active Power-Line Harmonic Filtering in Distribution Systems », thesis of the University of Waterloo, Ontario, Canada, 2000.
- [22] **BELHADJ KHEIRA et BOUZIR NESSRINE** « HARMONIQUES ET DEPOLLUTION DU RESEAU ELECTRIQUE », MÉMOIRE DE MASTER, Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des sciences et de la technologie Département de Génie électrique, Année universitaire : 2021 – 2022.

- [23] **MME. A. LAHMAR**, « Filtrage et qualité d'énergie », Thèse d'Université de Badji Mokhtar- Annaba, 2017.
- [24] **A. ESFANDIARI, M. PARNIANI, H. MOKHTARI**, « A New control strategy of shunt active filters for power quality improvement of highly and randomly varying loads », IEEE Ind. Electronics, Vol. 2, 4-7 May 2004.
- [25] **B. SINGH, V. VERMA**, « A new control scheme of series active filter for varying rectifier loads », IEEE Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2003, The Fifth International Conference, Vol. 1, 17-20 Nov. 2003, Page(s):554 - 559.
- [26] **H. AKAGI, Y. TSUKAMUTO, A. NABAE**, « Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 26, No. 1, pp. 93-98, 1990.
- [27] **L. GYUGYI, E.C. STRYCUDA**, « Active AC power filters », in Proc. IEEE US, 529- 535 (1976).
- [28] **G. ALARCON, C. NUNEZ, V. CARDENAS, M. OLIVER**, « Design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbances », IEEE Power Electronics Congress, CIEP 2000, 15-19 Oct. 2000, Page(s):93 - 98.
- [29] **MURAT KALE, ENGINOZDEMIR**, « An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filters », Elsevier, Electric Power Systems Research 73 (2005) 113–119.
- [30] **H. AKAGI**, « Active harmonic filters », IEEE Proc., Vol 93, No 12, December 2005
- [31] **MIAO-XIN WANG**, « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique en temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [32] **ESKANDAR GHOLIPOUR SHAHRAKI** « Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques » Thèse de doctorat , Université Henri Poincaré, Nancy-I , Octobre 2003.

Résumé

La propagation de la pollution harmonique sur un réseau électrique de distribution, comme les baisses et fluctuations de tension, les harmoniques, la puissance réactive et les déséquilibres de courant et de tension dus aux charges non linéaires, conduit à des pannes graves qui dégradent la qualité de l'énergie électrique et ont des effets catastrophiques sur les performances de tous les appareils connectés aux réseaux électriques.

Pour trouver une solution adéquate permettant d'éliminer cette pollution harmonique, ou du moins de la réduire au niveau le plus bas possible sur le réseau électrique en général et sur le courant de la source en particulier, plusieurs solutions ont été proposées pour lutter contre la pollution du réseau électrique. Parmi ces solutions pour faire face à ces perturbations de type tension, il y a le "filtre actif série".

L'objectif de notre mémoire est l'étude d'un filtre actif série, la méthode d'identification utilisée est la méthode de puissance instantanée, en plus du contrôle de l'onduleur de tension par la commande hystérésis.

ملخص

إن انتشار التلوث التوافقي على شبكة الكهرباء التوزيعية، مثل الانخفاضات والتقلبات في الجهد، والتوافقيات، والقدرة غير الفعالة وعدم التوازن في التيار والجهد الناجمة عن الأحمال غير الخطية، يؤدي إلى عطل خطير يتسبب في تدهور جودة الطاقة الكهربائية وله آثار كارثية على أداء جميع الأجهزة المتصلة بالشبكات الكهربائية.

من أجل إيجاد حل مناسب يسمح بإزالة هذا التلوث التوافقي أو على الأقل تخفيفه إلى أدنى مستوى على شبكة الكهرباء بشكل عام وعلى تيار المصدر بشكل خاص اقترحت عدة حلول لمكافحة تلوث الشبكة الكهربائية ولمواجهة هذه الاضطرابات من نوع التوتر يوجد "مرشح سلسلة نشطة".

الهدف من خلال مذكرتنا هذه هو دراسة فلتر فعال متسلسل، وتتمثل طريقة التعرف المستخدمة في طريقة القدرة الفورية، بالإضافة إلى التحكم في محول الفولتية باستخدام التحكم الهستيريزي.

Abstract

The spread of harmonic pollution on the distribution electrical network, such as voltage sags and fluctuations, harmonics, reactive power, and imbalances in current and voltage caused by non-linear loads, leads to serious faults that degrade the quality of electrical energy and have catastrophic effects on the performance of all devices connected to the electrical networks.

To find an appropriate solution that allows for the elimination of this harmonic pollution, or at least reduces it to the lowest possible level on the electrical network in general and on the source current in particular, several solutions have been proposed to combat the pollution of the electrical network. To address these voltage-type disturbances, there is the "active series filter."

The objective of our thesis is to study an active series filter, using the instantaneous power method for identification, in addition to controlling the voltage inverter using hysteresis control.