

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البلدية
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيات
Département d'Électrotechnique



Mémoire de Projet de Fin d'Études.

Présenté par:

Mr MORSLI M'BAREK Miloud

Pour l'obtention du diplôme de Master "2" en Électrotechnique.

Spécialité: Machines Electriques.

Thème:

Commande Linéaire d'un Filtre Actif Parallèle

Proposé par : Mr GHADBANE Ismail

Année Universitaire : 2015-2016

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ الْمَوَدَّعَةَ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ الْمَوَدَّعَةَ
الْحَمْدُ لِلَّهِ الَّذِي
خَلَقَ الْمَوَدَّعَةَ

Remerciements

Je remercie tout d'abord mon Dieu le tout-puissant, qui m'a facilité le chemin pour l'accomplissement de ce modeste travail.

Je remerciais cordialement mon Encadreur Mr GHADBANE Ismail, pour sa précieuse collaboration et son suivi continuél tout au long d'élaboration de ce travail et qui n'a pas cessé de nous donner ses conseils et les connaissances dont il a su me faire profiter.

Ainsi, je tiens également à exprimer toute ma gratitude et ma reconnaissance à tous les membres du jury qui acceptent de juger notre travail et pour l'intérêt qu'ils l'ont porté.

Je remerciais du fond du cœur les enseignants du Département d'Electrotechnique et ses membres de proche ou de loin , qui m'ont aidé, afin d'arriver , sans jamais oublier mes collègues de travail de l'Entreprise NAFTAL; (Mr AMROUCHE Boudjema ,Mr MANA Djamel, Mr AINOUCHE Samir , Mr TOUARI Hacem ,Mr ALLICHE Nor-Eddine ,.....etc.), pour leurs encouragements et le soutien moral.

Je remerciais les étudiants de la faculté d'Electrotechnique, surtout les étudiants de la promotion (2014-2015) ; qui m'ont assuré l'environnement adéquat, afin d'accomplir mon objectif.

Enfin , je remerciais tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin même avec un simple mot d'encouragement et de gentillesse pour l'élaboration du présent travail.



ملخص

في الشبكة الكهربائية، التوافقات، الاستطاعة المتفاعلة، التيارات الغير متوازنة و التوتر لهم أثار سلبية علي الأجهزة الكهربائية.

المصفي المتوازي الفعال يمثل حلا حديثا للتخفيض من اضطرابات التيار الكهربائي ، وهو متصل على التوازي مع الشحنات الإنتاجية للتوافقات.

الهدف من عملنا هو دراسة المصفي المتوازي ثلاثي الأطوار و مختلف الطرق المستعملة في التحكم .

يستند التحكم المصفي المتوازي الفعال على مجالين:

يتعلق الأول بتحديد التيارات التوافقية ويتركز الآخر على فحص التيارات المحقونة في الشبكة عن طريق المصفي الفعال. وهناك عدة طرق لتحديد التيارات التوافقية مثل أسلوب الاستطاعة اللحظية و طريقة تعديل الاستطاعة اللحظية و أسلوب يعتمد على المصفي المتعدد المتغيرات ، و في ما يتعلق ببنية المصفي المتوازي الفعال، في عملنا يستند على العاكس لمستويين، المتحكم من طرف الإستراتيجية الحالية للتيار و بتحويل نبض النوبة (M.L.I) .

يتم تقديم رسم تخطيطي للوظيفتين و المؤازرة لطريقتين مدروستين لتبيين فعالية كل تحكم، لتخفيض نسبة التشوه التوافقي.

كلمات المفاتيح

المصفي المتوازي الفعال ، الاستطاعة اللحظية ، والتيارات التوافقية، التشوه التوافقي، المصفي المتعدد المتغيرات.

Résumé

Dans un réseau électrique, les harmoniques, la puissance réactive, les déséquilibres de courant et de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Le filtre actif parallèle représente une solution moderne et efficace pour la mitigation des perturbations du courant électrique. Il est connecté en parallèle avec les charges productrices des harmoniques.

L'objectif de notre travail est l'étude du filtre actif parallèle triphasé et les différentes méthodes utilisées dans sa commande.

La commande du filtre actif parallèle s'appuie sur deux axes distincts : l'un concerne l'identification des courants harmoniques et l'autre s'intéresse au contrôle des courants injectés dans le réseau par le filtre actif, il existe plusieurs méthodes d'identification des courants harmoniques tels que la méthode des puissances instantanées, la méthode modifiée des puissances instantanées et la méthode basée sur un filtre multi-variables.

En ce qui concerne la structure du filtre actif parallèle de notre travail, basée sur un onduleur à deux niveaux commandé par la stratégie Hystérésis en courant et par M.L.I; (modulation de largeurs d'impulsions), un schéma synoptique des deux méthodes est présenté ainsi qu'un asservissement des deux méthodes étudiées pour montrer les performances de chaque commande et qui ont prouvé leur efficacité en matière de diminution du taux de distorsion harmonique.

Mots clés :

Filtre actif parallèle , puissances instantanées, courants harmoniques, taux de distorsion harmonique, filtre multi-variables.

Abstract

In an electrical network, harmonics, reactive power, current and voltage imbalances have negative effects on electrical equipment. The parallel active filter represents a modern and efficient solution for mitigation of the disruptions of the electrical current. It is connected in parallel with the loads producing harmonics.

The aim of our work is the study of three-phase parallel active filter and the different methods used in the command.

The command of parallel active filter is based on two distinct areas :The first one relates to the identification of harmonic currents and the second one focuses on the control of currents injected into the network by the active filter. There are several methods to Identify harmonic currents such us: The instantaneous power method, the modified method of instantaneous power and the method based on a multivariate filter.

As regards, the active filter structure parallel to our work, based on two-level inverter controlled by the hysteresis current strategy and by P.W.M ; (Pulse Width Modulation), a block diagram of the two methods is presented and a servo of the two methods discussed for showing the performance of each order and have proven effective in terms of reducing the harmonic distortion.

Keywords:

Parallel active filter, instantaneous power, harmonic currents, distortion harmonic, multi-variable filter.

Liste des acronymes

- C_{ch} : Le condensateur de la charge.
- C_F : Le condensateur du filtre actif.
- C_{dc} : La capacité du condensateur.
- D_l : La puissance déformante de la charge.
- e_a : La tension du réseau de la phase "a".
- e_b : La tension du réseau de la phase "b".
- e_c : La tension du réseau de la phase "c".
- E_{min} : L'énergie minimale emmagasinée dans le condensateur.
- E_{max} : L'énergie maximale emmagasinée dans le condensateur.
- f : La fréquence.
- f_c : La fréquence de coupure du filtre d'extraction des harmoniques.
- f_s : La Fréquence fondamentale du réseau électrique.
- G_{BF} : La fonction de transfert.
- h : Le rang harmonique.
- I_h : Le courant harmonique de rang (A).
- I_r : Le courant du réseau.
- I_{ch} : Le courant de la charge.
- I_{fp} : Le courant du filtre actif.
- I_{AF} : La source du courant.
- i_d : Le courant de charge coté continu.
- i_{la} : Le courant de la charge coté alternatif dans la phase "a".
- i_{laeff} : La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans la phase "a".
- i_{sabc} : Les courants du réseau électrique.
- $i_{s\alpha\beta}$: Les courants du réseau électrique dans le repère stationnaire.
- i_{sdq} : Les courants du réseau électrique dans le repère synchrone.
- i_{fabc} : Les courants du filtre actif.
- $i_{f\alpha\beta}$: Les courants du filtre actif dans le repère stationnaire.
- i_{fdq} : Les courants du filtre actif dans le repère synchrone .
- i_{labc} : Les courants de la charge.

Liste des acronymes

- $i_{l\alpha\beta}$: Les courants de la charge dans le repère stationnaire.
- $i_{l\alpha\beta}$: Les courants de la charge dans le repère synchrone.
- i^*_{sabc} : Les courants de référence du réseau électrique.
- $i^*_{s\alpha\beta}$: Les courants de référence du réseau électrique dans le repère stationnaire.
- i^*_{sdq} : Les courants de référence du réseau électrique dans le repère synchrone.
- i^*_{fabc} : Les courants de référence du filtre actif.
- $i^*_{f\alpha\beta}$: Les courants de référence du filtre actif dans le repère stationnaire.
- i^*_{fdq} : Les courants de référence du filtre actif dans le repère synchrone.
- $I_{l, \text{fon. eff}}$: Le courant de la charge fondamentale.
- $I_{l \text{ har}}$: Les courants harmoniques produits par la charge.
- $\tilde{I}_{l\alpha\beta}$: Les courants perturbateurs.
- K : Le constant à fixer.
- k_{pdc}, k_{idc} : Les constants du régulateur PI de la tension continue.
- L_{ch} : L'inductance de la charge.
- L_f : L'inductance du filtre actif.
- L_s : L'inductance du réseau électrique.
- L_l : L'inductance de la charge.
- L_d : L'inductance de la charge cotée continue.
- P : Les pertes totales par effet Joule.
- $P(t)$: La puissance instantanée.
- \bar{p} : La puissance continue liée à la composante fondamentale active.
- \tilde{p} : Les puissances actives alternatives.
- P_l : La puissance active de la charge.
- P_{dc} : La puissance absorbée par le condensateur.
- $q(t)$: La puissance imaginaire instantanée.
- q : La puissance réactive.
- \bar{q} : La puissance continue liée à la composante fondamentale réactive.
- \tilde{q} : Les puissances réactives alternatives.

Liste des acronymes

Q : La puissance réactive de la charge.

R : La résistance du conducteur.

R_f : La résistance du filtre actif.

R_s : La résistance du réseau électrique.

R_l : La résistance de la charge.

R_d : La résistance de la charge cotée continue.

S : La puissance apparente.

S_f : La puissance apparente du filtre.

S_l : La puissance apparente de la charge.

$S_{l.har}$: La puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge.

S_{abc} : Les états des interrupteurs de l'onduleur.

t : Le temps.

ΔT : La période d'ondulation de la tension continue.

$\Delta T = 1/f_{ond}$: La période de variation du courant du filtre.

\bar{U}_d : La valeur moyenne de la tension redressée.

U_d : La tension redressée.

$v_{s\alpha\beta}$: Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire.

v_{sabc} : Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif.

v_{sdq} : Les tensions du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère synchrone.

v_{sabc}^{\wedge} : Les coordonnées orthogonales (en retard de 90°) des tensions simples.

V_{AF} : La source de tension.

V_{dc} : La tension aux bornes du condensateur.

ΔV_{dc} : L'ondulation de la tension continue.

V_{fmax} : La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.

V_{smax} : La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

V_{dc}^* : La tension de référence du condensateur.

ω_c : La pulsation fondamentale du réseau.

Liste des acronymes

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

$x_{\alpha\beta}$: Le signal électrique d'entrée selon les axes α , β .

$\hat{x}_{\alpha\beta}$: Les composantes fondamentales de $x_{\alpha\beta}$.

$y(t)$: La fonction périodique par rapport au (t) .

Y_1 : La valeur efficace fondamentale.

Y_n : La valeur efficace harmonique.

ξ : Le coefficient d'amortissement du système.

Liste des abréviations

C.E.M: Compatibilité Electromagnétique.

C.E.I: Compatibilité Electromagnétique International.

CENELEC : Compatibilité Electromagnétique Européen.

C.E: Communauté Européenne.

D: Symbole d'une Diode.

F.A.S: Filtre Actif Sérié.

F.A.P: Filtre Actif Parallèle.

F.P.H: Filtre Passe Haut.

F.P.B: Filtre Passe Bas.

F.M.V: Filtre Multi-Variables.

G.T.O: En anglais ;(Gate Turn Off thyristor).

I.G.B.T: En anglais ; (Insolated Gate Bipolar Transistor).

M.L.I: Modulation de Largeurs d'Impulsions.

P.L.L: En anglais ; (Phase Locked Loop).

P.I: Régulateur Proportionnel Intégral.

T.H.D: En anglais ; (Total Harmonic Distorsion) et en français ;(Taux de Distorsion Harmonique).

T.C.D : Transformation de Concordia Directe.

U.T.E ou C.E.F: Compatibilité Electromagnétique Français.

U.E: Union Européenne.

U.P.Q.C: Unfied Power Quality Conditioner.

Y/Y: Câblage du transformateur en (étoile /étoile).

Y/ Δ : Câblage du transformateur en (étoile /triangle).

Liste des tableaux

Tableaux	Titres	Pages
Tableau (1.1)	<ul style="list-style-type: none">• Effets des harmoniques.	07
Tableau (1.2)	<ul style="list-style-type: none">• Limites des composantes harmoniques en courant.	12
Tableau (1.3)	<ul style="list-style-type: none">• Limites des émissions de courants harmoniques.	13
Tableau (1.4)	<ul style="list-style-type: none">• Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2).	14
Tableau (1.5)	<ul style="list-style-type: none">• Taux des harmoniques en tension à imposer pour vérifier l'immunité des appareils (CEI-61000-4-13).	15
Tableau (1.6)	<ul style="list-style-type: none">• Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série.	23
Tableau (3.1)	<ul style="list-style-type: none">• Tensions possibles à la sortie de l'onduleur.	51

Liste des figures

Figures	Titres	Pages
Figure (1.1)	<ul style="list-style-type: none"> • Représentation spectral d'un signal périodique. 	06
Figure (1.2)	<ul style="list-style-type: none"> • Pont dodécaphasé. 	16
Figure (1.3)	<ul style="list-style-type: none"> • Schéma bloc monophasé de plusieurs filtres passifs connectés en parallèle sur un réseau pollué. 	18
Figure (1.4)	<ul style="list-style-type: none"> • Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques. 	19
Figure (1.5)	<ul style="list-style-type: none"> • Structure du filtre amorti. 	19
Figure (1.6)	<ul style="list-style-type: none"> • Filtre actif série. 	21
Figure (1.7)	<ul style="list-style-type: none"> • Schéma unifilaire d'un Filtre actif parallèle. 	22
Figure (1.8)	<ul style="list-style-type: none"> • Combinaison parallèle-série actifs (UPQC). 	23
Figure (1.9)	<ul style="list-style-type: none"> • Les filtres combinés. 	24
Figure (1.10)	<ul style="list-style-type: none"> • Classification des filtres hybrides. 	25
Figure (1.11)	<ul style="list-style-type: none"> • Configuration du filtre passif avec filtre passe haut. 	25
Figure (1.12)	<ul style="list-style-type: none"> • Configuration du filtre passif sans filtre passe haut. 	26
Figure (1.13)	<ul style="list-style-type: none"> • Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif. 	26
Figure (1.14)	<ul style="list-style-type: none"> • Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif. 	27
Figure (1.15)	<ul style="list-style-type: none"> • Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif. 	28
Figure (2.1)	<ul style="list-style-type: none"> • Structure générale d'un filtre actif parallèle. 	29

Figure (2.2)	<ul style="list-style-type: none"> • Réseau électrique triphasé. 	30
Figure (2.3)	<ul style="list-style-type: none"> • Tensions de réseau triphasé. 	30
Figure (2.4)	<ul style="list-style-type: none"> • Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge RL. 	31
Figure (2.5)	<ul style="list-style-type: none"> • Tensions de réseau triphasé aux points de connexion de la charge . 	31
Figure (2.6)	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution du courant de la charge de trois phases. 	32
Figure (2.7)	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution du courant de la phase (a), au point de raccordement du circuit (Rd et Ld). 	32
Figure (2.8)	<ul style="list-style-type: none"> • Evolution de la tension de la phase (a), au point de raccordement du circuit (Rd et Ld). 	32
Figure (2.9)	<ul style="list-style-type: none"> • Filtre actif parallèle. 	34
Figure (2.10)	<ul style="list-style-type: none"> • Courant pollué, courant harmonique et courant filtré. 	34
Figure (2.11)	<ul style="list-style-type: none"> • Structure générale du filtre actif parallèle. 	35
Figure (2.12)	<ul style="list-style-type: none"> • Schéma représentant le principe de séparation des puissances. 	38
Figure (2.13)	<ul style="list-style-type: none"> • Détermination des courants de référence par la méthode des puissances instantanées. 	39
Figure (2.14.a)	<ul style="list-style-type: none"> • Filtre passe haut. 	39
Figure (2.14.b)	<ul style="list-style-type: none"> • Filtre passe bas. 	40
Figure (2.15)	<ul style="list-style-type: none"> • Principe du FMV. 	40
Figure (2.16)	<ul style="list-style-type: none"> • Détermination des courants de référence à l'aide de (F.M.V). 	41
Figure (2.17)	<ul style="list-style-type: none"> • Allure du courant de la référence de la phase (a) par le (F.M.V). 	42
Figure (2.18)	<ul style="list-style-type: none"> • Allure du courant de la référence de la phase (b) par le (F.M.V). 	42

Figure (2.19)	<ul style="list-style-type: none"> Allure du courant de la référence de la phase (c) par le (F.M.V). 	42
Figure (2.20)	<ul style="list-style-type: none"> Extraction des harmoniques par méthode de référentiel synchrone. 	45
Figure (2.21)	<ul style="list-style-type: none"> Allure du courant de la référence de la phase (a) par le (F.M.V). 	45
Figure (2.22)	<ul style="list-style-type: none"> Allure du courant de la référence de la phase (b) par le (F.M.V). 	46
Figure (2.23)	<ul style="list-style-type: none"> Allure du courant de la référence de la phase (c) par le (F.M.V). 	46
Figure (3.1)	<ul style="list-style-type: none"> Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux. 	49
Figure (3.2)	<ul style="list-style-type: none"> Schéma de liaison entre l'onduleur de tension et le réseau. 	49
Figure (3.3)	<ul style="list-style-type: none"> Structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux. 	50
Figure (3.4)	<ul style="list-style-type: none"> Schéma de commande par hystérésis. 	58
Figure (3.5)	<ul style="list-style-type: none"> Commande des interrupteurs par hystérésis à bande fixe. 	58
Figure (3.6)	<ul style="list-style-type: none"> Allure de la tension de l'onduleur à deux niveaux par la commande hystérésis. 	59
Figure (3.7)	<ul style="list-style-type: none"> Allure du courant de l'onduleur et le courant de référence par la commande hystérésis. 	59
Figure (3.8)	<ul style="list-style-type: none"> Principe de commande du courant par M.L.I . 	60
Figure (3.9)	<ul style="list-style-type: none"> Allure de la tension de l'onduleur à deux niveaux par la commande M.L.I. 	61
Figure (3.10)	<ul style="list-style-type: none"> Allure du courant de l'onduleur et le courant de référence par la commande hystérésis. 	61
Figure (3.11)	<ul style="list-style-type: none"> Schéma de la commande directe. 	62
Figure (3.12)	<ul style="list-style-type: none"> Boucle de régulation de la tension continue. 	63

Figure (3.13)	<ul style="list-style-type: none"> • Commande directe par hystérésis dans le repère triphasé. 	64
Figure (3.14.a,b,c,d)	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats de simulation du (F.A.P) avec une charge fixe. 	65/66
Figure (3.15.a,b,c,d)	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats de simulation du (F.A.P) avant filtrage. 	66/67
Figure (3.16.a,b,c,d)	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats de simulation du (F.A.P) après filtrage . 	68/69
Figure (3.17.a,b,c,d,e)	<ul style="list-style-type: none"> • Réponse du (F.A.P) dans le cas de diminution de la charge . 	69/70
Figure (3.18)	<ul style="list-style-type: none"> • Boucle de régulation du courant. 	71
Figure (3.19)	<ul style="list-style-type: none"> • Commande directe par "P.I" dans le repère triphasé. 	72
Figure (3.20.a,b,c,d,e,f)	<ul style="list-style-type: none"> • Réponse du F.A.P cas de perturbation. 	73/74/75
Figure (3.21)	<ul style="list-style-type: none"> • Commande directe par des régulateurs "PI" dans le repère triphasé. 	76
Figure (3.22)	<ul style="list-style-type: none"> • Schéma de la régulation de V_c par le régulateur "P.I". 	77
Figure (3.23.a,b,c,d,e,f)	<ul style="list-style-type: none"> • Réponse du F.A.P cas de perturbation dans le repère triphasé. 	78/79/80
Figure (3.24)	<ul style="list-style-type: none"> • Commande directe par hystérésis dans le repère triphasé. 	81
Figure (3.25.a,b,c,d,e,f)	<ul style="list-style-type: none"> • Réponse de F.A.P cas de perturbation dans le repère triphasé. 	82/83

Sommaire

Sommaire

Introduction générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre 1 : Perturbation des réseaux électriques

1.1 Introduction	04
1.2 Les perturbations harmoniques	04
1.2.1 Définition des harmoniques.....	04
1.2.2 Les types d'harmoniques.....	05
a Décomposition d'un signal périodique	05
b Représentation spectrale	05
1.2.3 Sources des harmoniques et leurs effets	06
1.2.4 Conséquence des harmoniques	08
1.2.5 Le facteur de puissance	09
1.3 Les normes imposées sur le THD	10
1.4 Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	16
1.4.1 Transformateur à couplage spécial.....	16
1.4.2 Pont dodécaphasé	16
1.4.3 Compensation de la puissance réactive	17
1.4.4 Solution de filtrage	17
a Filtres passifs	17
a.1 Filtre résonant.....	18
a.2 Filtre amorti	19
b Inconvénients des filtres passifs.....	20
c Filtre Actif.....	20
d Filtre actif série (FAS).....	21
d.1 Principe de fonctionnement	21
d.2 Mise en œuvre	21
e Le filtre actif parallèle	22
e.1 Principe de fonctionnement	22
e.2 Mise en œuvre	22

f	La combinaison parallèle -série actifs	23
g	Les filtres hybrides; (mixte actif et passif)	24
g.1	Configuration des filtres hybrides	24
h	Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	26
i	Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	27
j	Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif	27
1.5	Conclusion	28

Chapitre 2 : Méthodes d'extraction des harmoniques

2.1	Introduction	29
2.2	Modélisation du réseau électrique	30
2.3	Modélisation de la charge polluante	31
2.4	Filtre actif parallèle	33
2.5	Identification des courants harmoniques	35
2.5.1	Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées	36
a	Calcul des courants harmoniques	38
b	Théorie modifiée des puissances instantanées	43
2.5.2	Méthode du référentiel synchrone	44
2.6	Conclusion	47

Chapitre 3 : Commande linéaire du filtre actif parallèle

3.1	Introduction	48
3.2	Onduleur de tension	48
3.2.1	Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux	49
3.3	Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé.....	52
3.4	Modèle du filtre actif dans le repère synchrone (de Park)	52
3.5	Modèle du filtre actif dans le repère stationnaire	53
3.5.1	Système de stockage d'énergie	53
3.5.2	Filtre de couplage	56
3.6	Commande de l'onduleur	57

3.6.1	Commande par hystérésis	57
a	Commande par hystérésis à bande fixe	58
3.6.2	Commande par MLI sinusoïdale	60
3.7	Commande du filtre actif parallèle	62
3.7.1	Méthode directe (dite aussi en boucle ouverte)	62
3.8	Méthode de commande directe basée sur la méthode de puissance instantanée.....	63
3.8.1	Commande directe dans le repère triphasé	63
a	Régulation de la tension continue V_{dc}	63
b	Contrôle du courant du filtre par un correcteur "P.I".....	71
3.9	Méthode de commande directe basée sur le référentiel synchrone	76
3.9.1	Commande directe dans le repère triphasé	76
a	Régulation de la tension continue V_{dc}	76
b	Détermination des paramètres du régulateur "P.I"	77
3.10	Conclusion	84
	Conclusion générale	85

Introduction générale

Ces dernières années, l'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électriques a entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. Ce phénomène touche l'ensemble des secteurs industriels ;(utilisation de gradateurs, de redresseurs, de variateurs de vitesse,...), tertiaire; (informatique ou éclairage des bureaux, commerce,...) et domestique (téléviseurs, appareils électroménagers,...). [1]

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

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

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

L'utilisation de dispositifs de filtrage tels que les filtres passifs dits résonnants et/ou amortis peut ainsi empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent également être utilisés pour compenser la puissance réactive.

Cependant, le filtrage passif pose certains problèmes : manque d'adaptabilité lors de variations de l'impédance du réseau, de la charge et résonance possible avec l'impédance du réseau et dans certains cas défavorables où cette résonance est excitée, celle-ci peut entraîner une tension harmonique élevée et un courant harmonique important dans la capacité du filtre et dans le réseau. Ainsi, cette solution présente un inconvénient majeur qui peut être intolérable dans ces circonstances particulières.

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

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

Cependant le filtrage actif présente également ses inconvénients spécifiques, notamment son coût élevé pour des applications industrielles ; le dimensionnement du convertisseur de puissance du filtre actif peut alors être relativement élevé. Pour cette raison majeure, les applications des filtres actifs de puissance dans les systèmes électriques, sont aujourd'hui encore limitées bien que des normes fixent les caractéristiques exigées, pour la qualité de l'énergie.

Les inconvénients des filtres passifs et des filtres actifs, peuvent être simultanément limités en utilisant de nouvelles topologies de filtres actifs, appelées filtres hybrides.

L'utilisation de filtres actifs hybrides est aujourd'hui considérée comme une solution, qui permet de réduire le dimensionnement et par conséquent le coût des filtres actifs. Le filtre hybride consiste en l'association de filtres passifs, destinés à absorber les harmoniques de courant provenant de la charge polluante, et d'un filtre actif de faible puissance. [1]

D'autre part, il est important de noter que les performances d'un filtre actif sont étroitement liées à l'algorithme utilisé, pour déterminer les références harmoniques de courant ainsi qu'à la méthode utilisée pour la poursuite de ces références. De plus, le mode d'implantation, analogique ou numérique, peut également avoir une influence directe sur les performances du filtre actif, selon la technique utilisée.

L'objectif visé dans ce mémoire est l'amélioration des performances du filtre actif parallèle, en introduisant des méthodes de commande linéaire, sur des techniques déjà existantes. La commande par hystérisis et la commande par M.L.I seront l'objet de ce travail.

Ce mémoire comporte trois chapitres organisés comme suit :

Dans le premier chapitre, nous définirons les perturbations du courant et la tension dans les réseaux électriques, les principales charges émettrices des courants harmoniques, les origines de cette pollution harmonique, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations, ainsi que les solutions traditionnelles et modernes pour la mitigation de ce phénomène.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude de quelques méthodes d'extraction des harmoniques du courant pollué. Il s'agit des méthodes basées sur le calcul des puissances active, réactive instantanées et la méthode de référentiel synchrone ou ;(méthode des courants instantanés), ces méthodes en question sont basées sur la transformation des courants pollués dans les différents repères ainsi que, un nouveau type du filtre appelé filtre multi-variables (F.M.V) sera aussi présenté.

En ce qui concerne le troisième chapitre ,nous étudierons les méthodes de modulation utilisées dans la commande de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux, ainsi que le détail des deux structures de commande du filtre actif parallèle à savoir; la commande par hystérésis et M.L.I .

Enfin, nous allons obtenir les résultats de la simulation par le logiciel en l'occurrence; "MATLAB/SIMULINK" et ce, lors de l'application des techniques de différentes commandes du filtre actif parallèle ,après nous déterminons la rentabilité et les performances de meilleur filtre, pour l'amélioration les perturbations du courant et la tension du réseau électrique triphasé.

Chapitre 1

Perturbation des Réseaux Electriques

1.1 Introduction:

Généralement le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme d'un système triphasé de tensions sinusoïdales. Les paramètres caractéristiques de ce système sont; la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants de l'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie. En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive.

Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la source des harmoniques, l'influence du raccordement des convertisseurs statiques sur les réseaux électriques et leurs environnements et enfin les normes imposées sur le THD, afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques. Ensuite nous présentons les solutions classiques et modernes, mises en œuvre pour dépolluer les réseaux électriques.[1]

1.2 Les perturbations harmoniques:

1.2.1 Définition des harmoniques: [2]

La distorsion harmonique est une forme de pollution du réseau électrique, susceptible de poser des problèmes si la somme des courants harmoniques est supérieure à certaines valeurs limites.

En général, les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont supérieurs à 100 HZ et inférieur à 2500 HZ, c'est-à-dire des rangs 2 à 50.

Donc Les harmoniques sont toutes les fréquences multiples de fondamentale.

Exemple: un fondamental de 50 Hz.

- Harmonique 2.....100 HZ.
- Harmonique 3150 HZ.
- Harmonique 4.....200 HZ.
- Harmonique5.....250 HZ.

1.2.2 Les types d'harmoniques: [2]

a Décomposition d'un signal périodique :

FOURIER a démontré, que toute fonction périodique $y(t)$ non sinusoïdale de fréquence (f) peut être représentée, selon la décomposition harmonique sous la forme d'une somme de fonction composée.

- D'un terme sinusoïdal à la fréquence (f) de valeur efficace (Y_1). Ce terme est appelé **fondamental**.

- Des termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égaux à (n) fois la fréquence du fondamental et de valeurs efficaces (Y_n). Ces fréquences multiples du fondamental sont appelées **harmoniques**.

- D'une éventuelle composante continue d'amplitude (Y_0).
- **Inter harmoniques:** Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental.
- **Infra harmoniques :** Ces sont des composantes des fréquences inférieures à celle du fondamental.

L'expression de ces grandeurs est donnée par le développement de la série de Fourier suivant:

$$y = A_0 + \sum_{i=1}^n A_n \cos(n\omega t - \varphi_n)$$

- A_0 : est la composante continue.
- n : est un entier compris entre 1 et l'infini, il définit le rang de l'harmonique.
Si $n = 1$: l'harmonique est appelé fondamental.
- A_n : est l'amplitude de l'harmonique de rang n .
- φ_n est le déphasage relatif au fondamental de la composante harmonique de rang n .

b Représentation spectrale: [3]

Un signal déformé se compose généralement des plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous forme d'un spectre ; figure (1.1), c'est à dire à l'aide d'un schéma, où l'on porte abscisse la fréquence, et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pour cent).

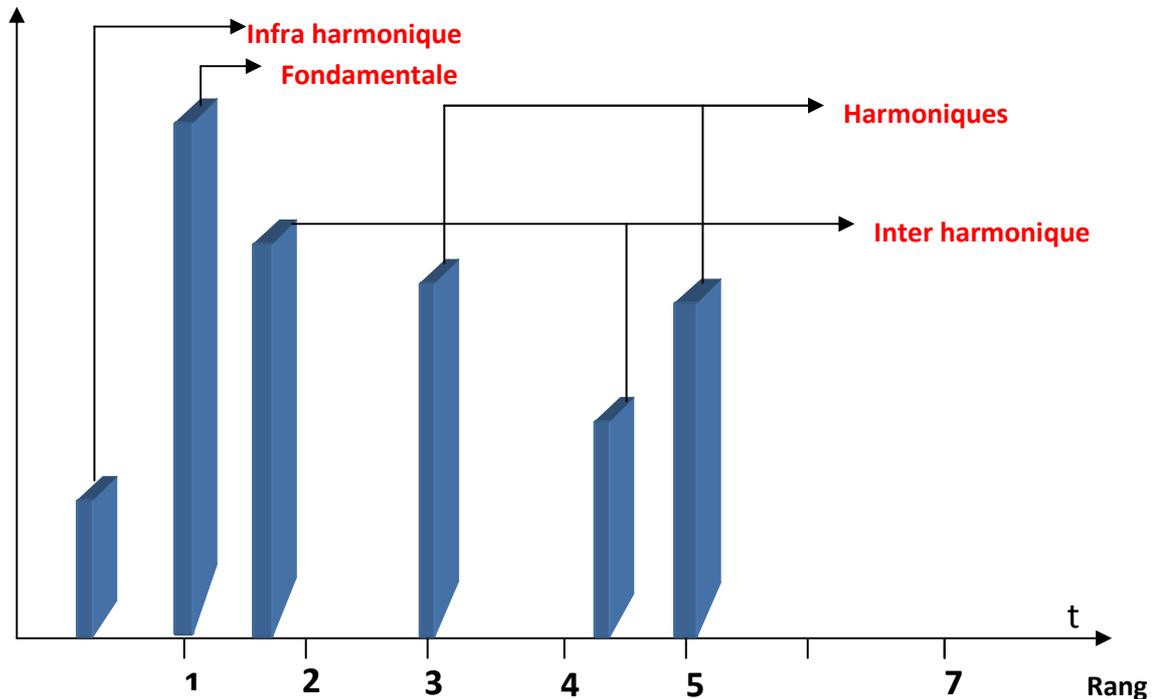


Figure (1.1): Représentation spectrale d'un signal périodique.

1.2.3 Sources des harmoniques et leurs effets:

L'utilisation des équipements électriques comportant des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique a entraîné ces dernières années une augmentation sensible du niveau de pollution harmonique. Ils ont contribué à la détérioration de la qualité du courant et de la tension des réseaux de distribution.

Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques; (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs. Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés.

En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale. Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale. [1]

➤ Le tableau suivant récapitule les principaux effets néfastes harmoniques: [2] [3]

Matériel	Effet d'harmonique
- Condensateurs de puissance.	- Échauffement, vieillissement prématuré (claquage), résonance.
- Moteurs.	- Pertes et échauffement supplémentaires, - Réduction des possibilités d'utilisation à pleine charge, - Vibration, fatigue mécanique.
- Transformateurs.	- Pertes supplémentaires dans le fer; (par courant de Foucault) et dans les enroulements (par effet joule).
- Dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs magnétothermiques).	- Fonctionnement intempestif.
- Câbles.	- Pertes diélectriques et ohmiques supplémentaires ; (particulièrement dans le neutre en cas de présence d'harmonique).
- Ordinateurs.	- Dysfonctionnement lié aux couples pulsatoires des moteurs d'entraînement des supports magnétiques fonctionnelles.
- Electronique de puissance . (ponts redresseurs à thyristor, transistors, etc.).	- Troubles liées à la forme d'onde; (commutation synchronisation).
- Compteurs d'énergie.	- Erreur de mesure.
- Téléviseurs.	- Déformation de l'image.
- Lampes à décharge.	- Risque de vacillement.

Tableau (1.1): Effets des harmoniques.

1.2.4 Conséquence des harmoniques: [4]

La présence d'harmoniques de courant ou de tension conduit à des effets néfastes sur le réseau de distribution, comme par exemple, 1,3 et 7.

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, l'interférence avec les réseaux, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance.

- L'échauffement des conducteurs, des câbles, des condensateurs et des machines dû aux pertes cuivre et fer supplémentaires, (pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques :

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \cdot R$$

Avec :

- I_h : le courant harmonique de rang qui représente le fondamental pour $h=1$,
- R : la résistance traversée par le courant.

Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer , (pertes par courants de Foucault).

Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs, transformateurs, ...). Ce sont des effets à termes qui se traduisent par une fatigue prématurée amenant à un déclassement des équipements. Ces pertes supplémentaires occasionnées par la présence des courants harmoniques réduisent remarquablement le rendement des équipements tels que les moteurs, les transformateurs,...etc. [4]

- L'interférence dans les systèmes de télécommunication : le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut provoquer des interférences. L'importance de ces interférences est en fonction de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques. Dans le cas de résonance, une partie des réseaux de télécommunication peut être rendue inutilisable. On parle ici de Compatibilité Electromagnétique (C.E.M) afin de caractériser l'aptitude d'un appareil, ou d'un dispositif, à fonctionner normalement dans un environnement électromagnétique sans produire lui-même des perturbations nuisibles aux autres appareils ou dispositifs. [1]

- Le dysfonctionnement de certains équipements électriques comme les dispositifs de commande et de régulation. En présence d'harmoniques, le courant et la tension peuvent changer plusieurs fois de signe au cours d'une demi-période. Par conséquent, les équipements sensibles au passage par zéro de ces grandeurs électriques sont perturbés.

- Des phénomènes de résonance. Les fréquences de résonance des circuits formés par les inductances du transformateur et les capacités des câbles sont normalement assez élevées, mais celles peuvent coïncider avec la fréquence d'un harmonique. Dans ce cas, il y aura une amplification importante qui peut détruire les équipements raccordés au réseau.
- La dégradation de la précision des appareils de mesure.
- Des perturbations induites sur les lignes de communication, rayonnement électromagnétique notamment, des différents critères sont définis pour caractériser ces perturbations. Le THD et le facteur de puissance sont les plus employés pour quantifier respectivement les perturbations harmoniques et la consommation de puissance non-active. Le THD représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques à la valeur efficace du fondamental. Il est défini par la relation. [4]

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{X_h^2}{X_1^2}}$$

Avec :

X : soit un courant ou une tension.

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

1.2.5 Le facteur de puissance :

Pour un signal sinusoïdal, le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominaux. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. [4]

1.3 Les normes imposées sur le THD: [1]

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies:

- Au niveau international par la CEI,
- Au niveau européen par le CENELEC,
- Au niveau français, par l'UTE et le CEF.

En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré. Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes CEI qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple CEI 61000 sur la compatibilité électromagnétique et CEI 60063 qui définit les séries de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs,...etc. Les normes internationales publiées par la CEI dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs de:

- Faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques,
- Assurer la qualité des produits,
- Garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes,
- Contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits,
- Contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

Au niveau international (CEI), les normes CEI 61000 publiées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) sont divisées en plusieurs parties, conformément à la structure suivante:

- 1- Généralités,
- 2- Environnement,
- 3- Limites,
- 4- Techniques d'essais et de mesures,
- 5- Guide d'installation et d'atténuation,
- 6- Normes génériques.

Chaque partie est divisée en plusieurs sous-parties dont certaines ont été rendues obligatoires par la directive 89/336/CEE dans l'Union Européenne et retranscrites dans les droits nationaux sous l'appellation NF EN 61000 (en France). L'application de ces directives est obligatoire pour bénéficier du marquage CE (Communauté Européenne). L'apposition de marquage indique donc la conformité du produit aux exigences essentielles de ces directives, afin d'avoir le droit de commercialiser les produits concernés dans l'Union Européenne. Pour les réseaux électriques, les recommandations d'EDF pour les tensions sont :

- Pour un harmonique pair : $V_h/V_1 \leq 0,6\%$,
- Pour un harmonique impair : $V_h/V_1 \geq 1\%$,
- Pour le taux de distorsion global de tension : $THD < 1,6\%$.

Il s'agit de limitations qui sont maintenant très anciennes (plus de 20ans). Ci-dessous, nous allons détailler les normes internationales les plus récentes concernant les courants et les tensions.

Au niveau international (CEI), les normes CEI-1000 définissent les niveaux des courants et des tensions harmoniques à respecter.

Le tableau (1.2) présente la norme CEI-1000-3-2 qui fixe la limitation des courants injectés dans un réseau public basse tension pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A.

Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi, du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme.

Harmonique impairs		Harmoniques pairs	
Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.30
9	0.40	$8 \leq h \leq 40$	$0.23 \cdot 8 / h$
11	0.33		
13	0.21		
$15 \leq h \leq 39$	$0.15 \cdot 15 / h$		

Tableau (1.2): Limites des composantes harmoniques en courant.

La norme (CEI-1000-3-4) spécifie les limites d'émissions de courants harmoniques des équipements individuels d'intensité assignée supérieure à 16A et jusqu'à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux publics de tensions nominales comprises entre 230 V (monophasé) et 600 V (triphase).

Rang	Courant harmonique en % de fondamental
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2.0
15	0.7
17	1.2
19	1.1
21	≤ 0.6
23	0.9
25	0.8
27	≤ 0.6
29	0.7
31	0.7
≥ 33	≤ 0.6
Pair	≤ 0.6 ou $0.158/h$

Tableau (1.3): Limites des émissions de courants harmoniques.

Les normes CEI-1000-2-2 et CEI-1000-2-4 précisent le niveau des harmoniques de tension à respecter au point de raccordement sur les réseaux de distribution basse tension, public et industriel respectivement.

Le tableau (1.4) présente les niveaux de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux publics basse tension.

Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmonique pairs	
Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental	Rang	Tension harmonique en % du fondamental
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	$0.2+0.5*25/k$				

Tableau (1.4): Niveaux de compatibilité des harmoniques de tension (CEI-1000-2-2).

La norme CEI 61000-4-13 précise les essais d'immunité basse fréquence aux harmoniques et inter-harmoniques incluant les signaux transmis sur le réseau électrique. Le tableau (1.5) indique les taux des harmoniques en tension à utiliser pour vérifier l'immunité des appareils pour les matériels et systèmes sensibles et les réseaux industriels.

Rang harmonique	Matériels et systèmes sensibles %	Réseaux industriels %
3	8	8
5	8	12
7	6.5	10
9	2.5	4
11	5	7
13	4.5	6
15	-	3
17	3	5
19	2	5
21	-	2
23	2	4
25	2	4
27	-	2
29	1.5	4
31	1.5	3

Tableau (1.5): Taux des harmoniques en tension à imposer pour vérifier l'immunité des appareils (CEI-61000-4-13).

Compte tenu de toutes ces normes imposées par la réglementation CEM, nous avons besoin de mettre en œuvre des moyens efficaces afin de limiter la propagation de la pollution harmonique des réseaux de distribution d'énergie. De plus, les normes actuelles ne sont pas tout à fait satisfaisantes car elles ne tiennent pas compte de l'influence du réseau et de la déformation initiale de la tension. Par ailleurs, elles paraissent un peu laxistes pour les appareils de faibles puissances. [1]

Il faudrait donc s'attendre, dans l'avenir proche, à des normes plus strictes et surtout à des restrictions financières plus contraignantes qui justifient davantage des travaux comme le notre dans le domaine de la qualité de l'énergie.

1.4 Solutions de dépollution des réseaux électriques: [2]

Il existe aujourd'hui toute une panoplie de matériels et de solutions pour l'atténuation des harmoniques, tous présentant cependant des inconvénients et des avantages.

1.4.1 Transformateur à couplage spécial:

Cette solution empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et de leurs multiples.

Il s'agit d'une solution centralisée pour un ensemble de charges monophasées. Elle n'a cependant aucun effet sur les autres rangs d'harmoniques (H5, H7, etc...).

1.4.2 Pont dodécaphasé :

Deux redresseurs hexa phases montés en série font composer ce pont, qui est le pont le plus utilisé (cas des puissances importantes). Donc, toujours dans le souci de repousser le premier harmonique présent sur un spectre pollué, l'association de deux ponts triphasés en série a été envisagée comme il est illustré sur le schéma de la figure (1.2).

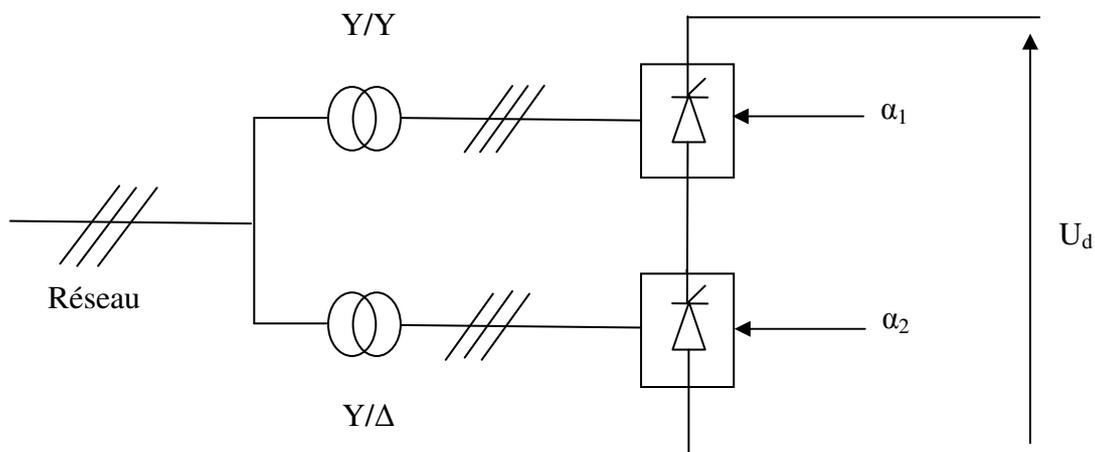


Figure (1.2): Pont dodécaphasé.

L'utilisation d'un grand nombre de semi-conducteurs et de transformateurs à deux enroulements secondaires rend cette solution onéreuse. Elle entraîne un coût supplémentaire et demande plus que le savoir faire habituel pour les mettre en œuvre. Ces solutions ne résolvent pas les problèmes causés par les charges polluantes qui existent sur le marché.

1.4.3 Compensation de la puissance réactive :

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.

L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin. [2]

1.4.4 Solution de filtrage:

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

Deux types de solution sont envisageables, la première consiste à utiliser des convertisseurs statiques peu ou moins polluants, tandis que la seconde réalise un filtrage des composantes harmoniques.

a Filtres passifs:

Il s'agit des premiers dispositifs utilisés pour l'élimination d'harmoniques. Ils sont composés par des éléments passifs comme des inductances, des condensateurs et des résistances.

En général, les filtres d'harmoniques sont connectés en parallèle avec les charges génératrices d'harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électriques, ... etc.). [4]

On différencie quatre types de filtres passifs : les filtres réglés à des fréquences déterminées, les filtres passe-haut, les filtres passe-bas et les filtres passe-bande.

Le choix le plus commun pour le redresseur à thyristors de haute puissance consiste à utiliser une combinaison de plusieurs filtres réglés à une seule fréquence (sur les harmoniques 5, 7, 11 et 13) et un filtre passe haut du deuxième ordre réglé autour de la fréquence de l'harmonique 17 comme le montre la figure (1.3). [4]

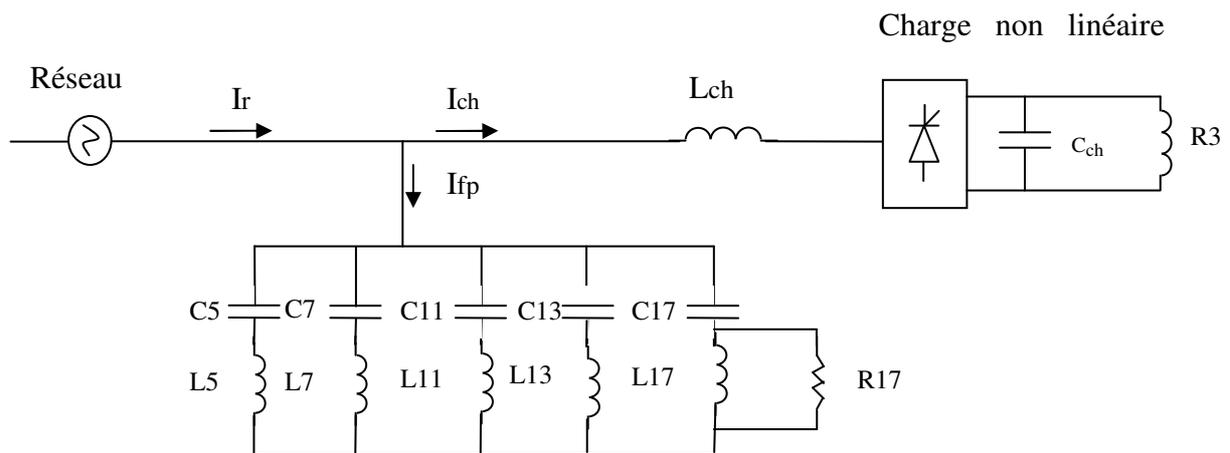


Figure (1.3): Schéma bloc monophasé de plusieurs filtres passifs connectés en parallèle sur un réseau pollué.

Les Modèles des filtres passifs sont:

a.1 Filtre résonant:

Le filtre résonant (ou filtre shunt) est composé d'une inductance L en série avec un condensateur C . Les valeurs d'inductance L et de capacité C sont calculées à la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer. Lorsque l'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres où chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer, figure (1.4). [4]

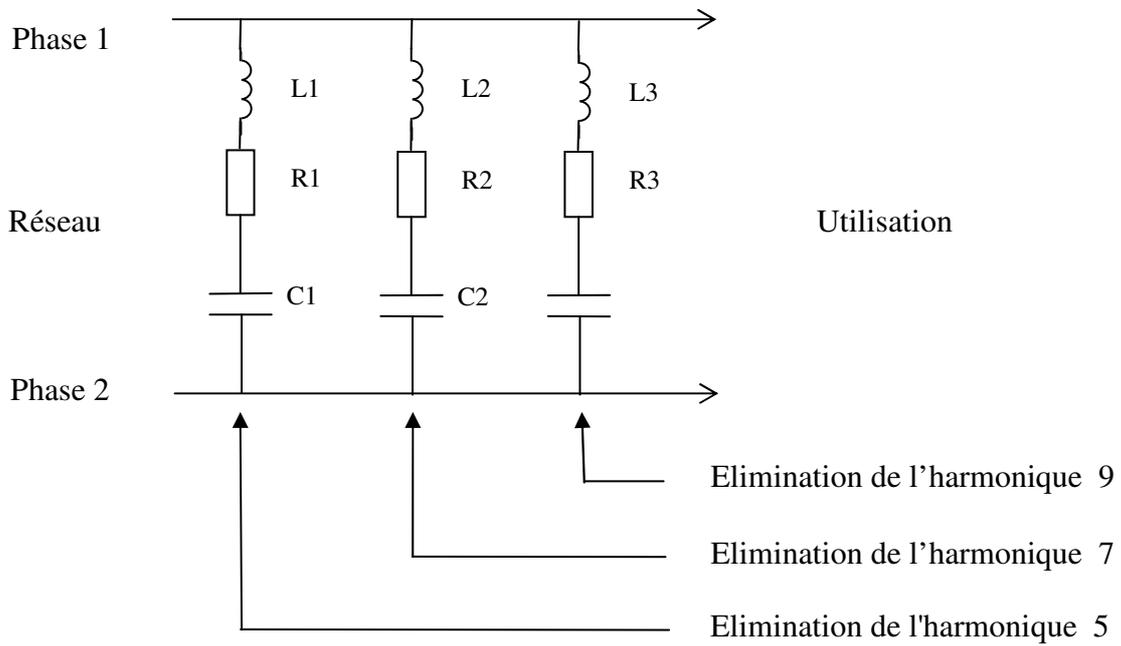


Figure (1.4) : Filtres résonants agissant sur plusieurs rangs harmoniques.

a.2 Filtre amorti:

Le filtre amorti est constitué d'une structure identique au filtre résonant, avec en supplément, une résistance R branchée en parallèle sur l'inductance, figure (1.5). [4]

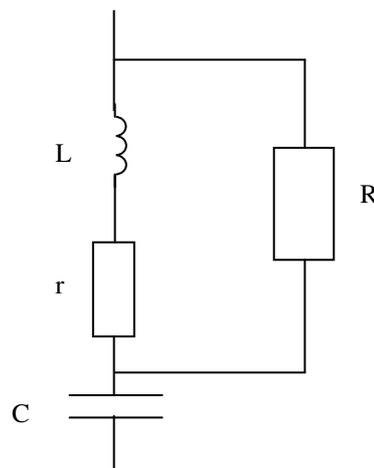


Figure (1.5) : Structure du filtre amorti.

b Inconvénients des filtres passifs :[2]

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.

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

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

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). 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).

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (FAS), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs.

Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques. Dans la suite, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées. [1]

c Filtre Actif :

Les filtres actifs de puissance sont composés d'un onduleur connecté au réseau par l'intermédiaire d'un filtre passif. Les avantages les plus importants de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants: [4]

- Le volume physique du filtre est plus réduit,
- La capacité de filtrage est supérieure,
- La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils ont aussi quelques inconvénients :

- Leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie,
- Les pertes sont plus élevées.

d Filtre actif série (FAS):

d.1 Principe de fonctionnement:

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme le montre la figure. (1.6), comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également à 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. [2]

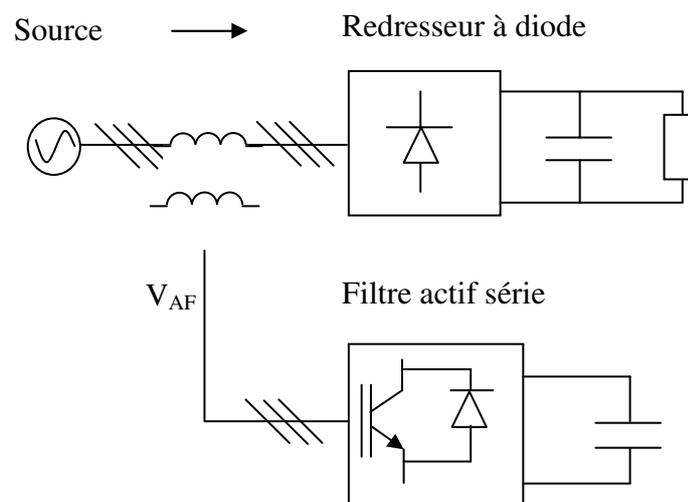


Figure (1.6): Filtre actif série.

d.2 Mise en œuvre :

Le filtre actif Série est une solution adaptée à la compensation des tensions perturbatrices, harmoniques, déséquilibrées et des creux de tension. Ces perturbations trouvent généralement leurs origines dans le réseau lui-même mais peuvent parfois être provoquée par les charges elles-mêmes.

En 1976, une famille de filtres actifs séries avec des onduleurs à transistors contrôlés en M.L.I a été présenté. Un compensateur statique pour le rééquilibrage de la tension du réseau électrique a été proposé en 1985. La génération, par l'onduleur à thyristors, des composantes non désirées, ayant une faible fréquence de commutation, a découragé l'avancement pratique de cette solution [2].

En 1990, un compensateur de tension à base d'onduleur de tension triphasé a été proposé pour compenser le déséquilibre de tension de réseau électrique. Depuis, beaucoup de travaux ont été consacrés à l'amélioration de la qualité de compensation du déséquilibre de la tension du réseau.

D'autres recherches ont introduit le problème des creux de tension et la solution de compensation par le compensateur actif série [2].

e Le filtre actif parallèle :

e.1 Principe de fonctionnement :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (1.7), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif [2].

e.2 Mise en œuvre :

Les premiers principes de fonctionnement des filtres actifs parallèles ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de filtre actif parallèle a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en M.L.I. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles. En effet, dans ces années là, il était presque impossible de trouver, sur le marché, des interrupteurs de puissance capables de fonctionner aux fréquences de commutation et aux niveaux de puissance exigés par la réalité industrielle.[2]

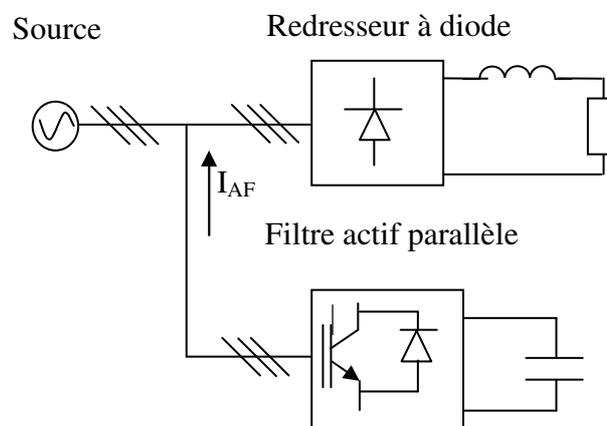


Figure (1.7): Schéma unifilaire d'un Filtre actif parallèle.

f La combinaison parallèle -série actifs:

La combinaison parallèle -série actif, aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la figure (1.8) profitant des avantages des deux filtres actifs, 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. [2]

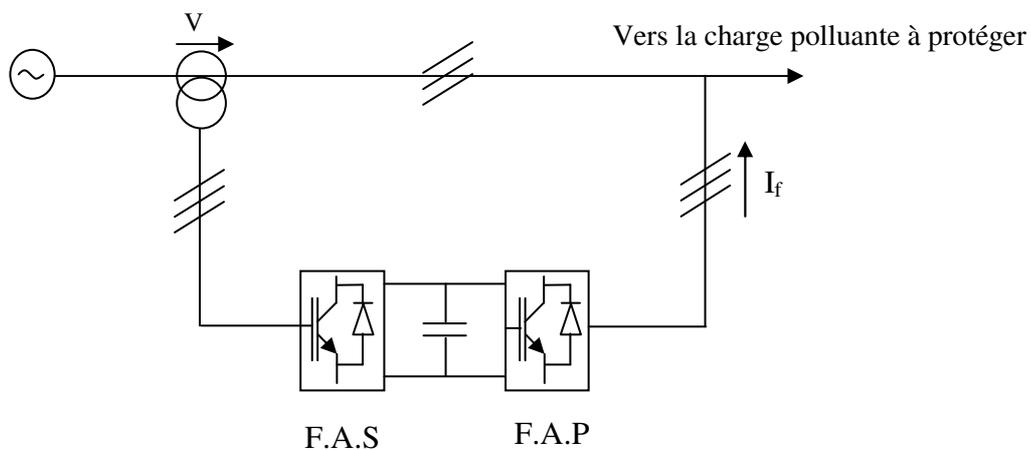


Figure (1.8): Combinaison parallèle-série actifs (UPQC).

Configuration des systèmes	Filtre actif parallèle	Filtre actif série
	Figure (1.7)	Figure (1.6)
- Circuit de puissance du filtre actif.	- Onduleur de tension à M.L.I avec boucle de courant.	- Onduleur de tension à M.L.I sans boucle de courant.
- Filtre actif fonctionnant comme.	- Source de courant I_{AF} .	- Source de tension V_{AF} .
- Type de charge non linéaire.	- Redresseur à diode ou à thyristor à charge inductive et cycloconvertisseur .	- Redresseur à diode à charge capacitive au coté continu.
- Fonction additionnelle .	- Compensation de la puissance réactive.	- Régulation de la tension alternative.

Tableau (1.6): Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre actif série. [2]

g Les filtres hybrides; (mixte actif et passif) :

Le filtrage mixte ou hybride résulte de l'association d'un filtre passif et d'un filtre actif.

L'intérêt des filtres mixtes est que le filtre passif prend en charge la compensation d'une grande partie des harmoniques ; le filtre actif maintient les performances de filtrage en fonction de l'évolution de la charge du réseau. Ainsi la puissance du convertisseur qui constitue le filtre actif est fortement diminuée grâce aux éléments passifs. Ces structures permettent donc d'optimiser le rapport performance coût et d'avoir une meilleure tenue en tension.

On a plusieurs structures de filtres hybrides par exemple :

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

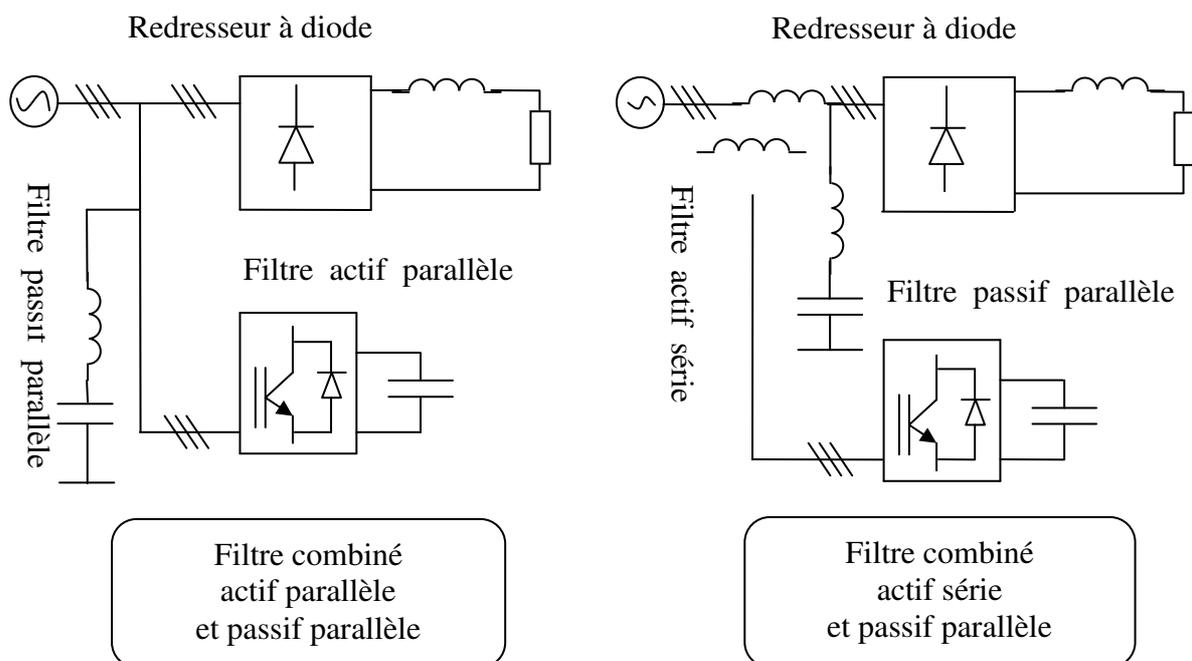


Figure (1.9): Les filtres combinés.

g.1 Configuration des filtres hybrides:

Ces dernières années, de nombreuses topologies de filtres hybrides associées à différentes stratégies de commandes ont été présentées dans la littérature scientifique, afin d'améliorer la qualité de l'énergie mais surtout pour réduire le dimensionnement du filtre actif de puissance et par conséquent son coût.

Les filtres hybrides peuvent être classés selon le nombre d'éléments mis en œuvre dans la topologie étudiée (filtres actifs et filtres passifs), le système traité (monophasé, triphasé trois fils et triphasé quatre fils) et le type d'onduleur utilisé (structure tension ou courant). La figure (1.10) présente quelques configurations de filtres hybrides selon le type de système étudié et les éléments associés. [1]

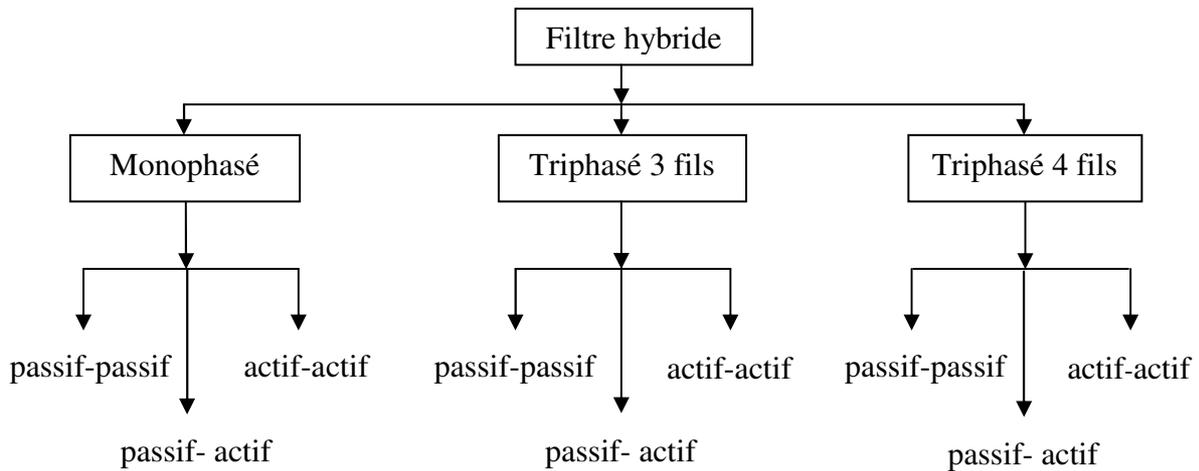


Figure (1.10): Classification des filtres hybrides.

La configuration traditionnelle du filtre hybride comprend un filtre actif et un filtre passif. Le filtre passif doit avoir une impédance aussi faible que possible pour les harmoniques de rangs 5, 7, 11 et 13, afin d'atteindre de bonnes caractéristiques de filtrage [1]. Pour cette raison le filtre passif se compose classiquement d'un premier filtre passif accordé sur l'harmonique cinq, d'un second filtre passif accordé sur l'harmonique sept et d'un troisième filtre passe haut.

La configuration de ce filtre passif est décrite à la figure (1.11).

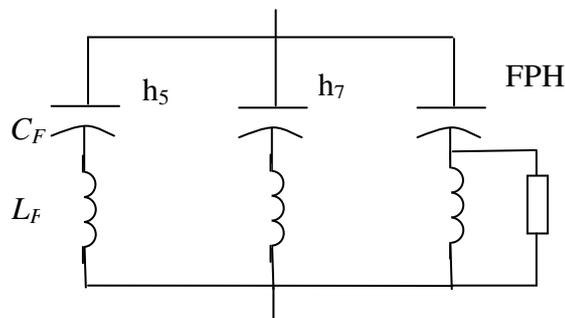


Figure (1.11): Configuration du filtre passif avec filtre passe haut.

La figure (1.12) présente une autre configuration de filtre passif où l'on utilise des filtres passifs accordés sur l'harmonique 11 et sur l'harmonique 13 au lieu du filtre passe haut.

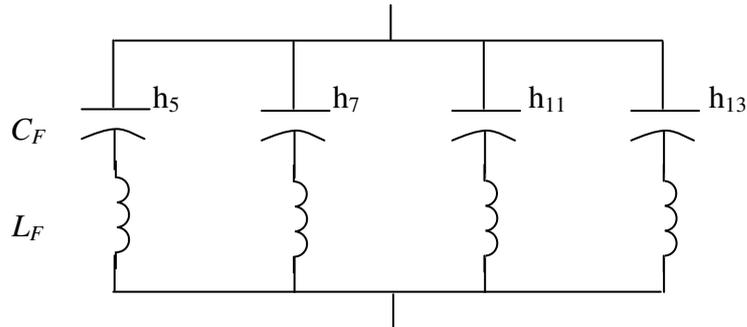


Figure (1.12): Configuration du filtre passif sans filtre passe haut.

En effet, dans les deux configurations du filtre passif présentées ci-dessus, le coût et la complexité sont des inconvénients majeurs. [1]

Le filtre passif a pour rôle d'éliminer les harmoniques générés par la charge or que le filtre actif est destiné à améliorer les performances de filtrage du filtre passif. Selon le mode d'association des filtres passifs aux filtres actifs.

h Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif:

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la figure (1.13).

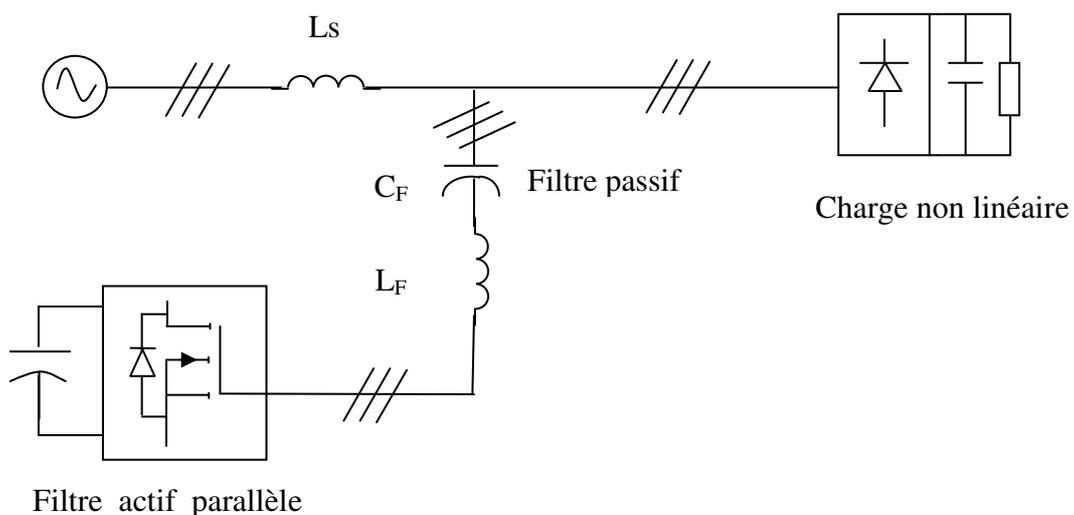


Figure (1.13): Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages : le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

i Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif:

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. ces derniers sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences.

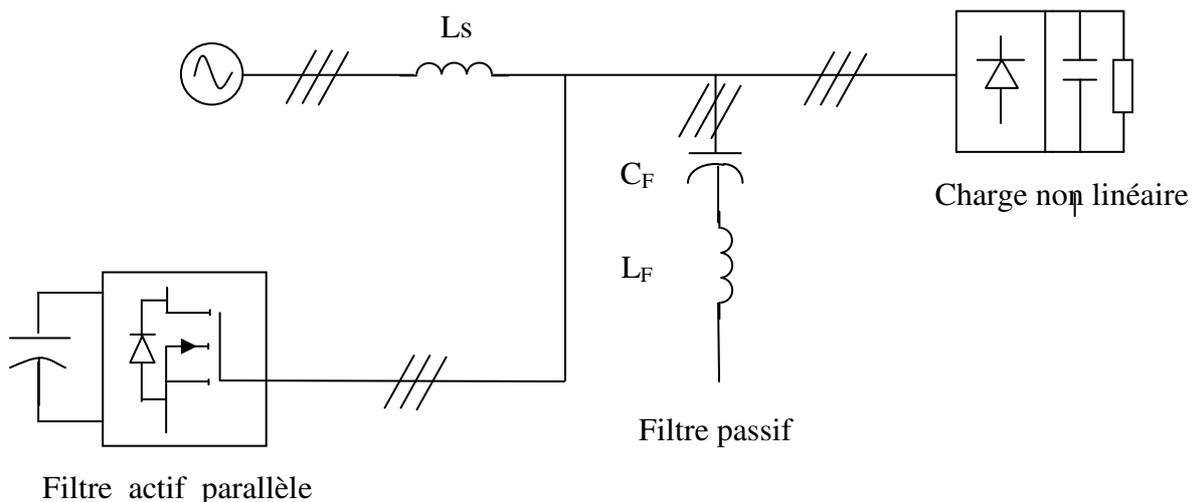


Figure (1.14): Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif.

j Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif:

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau. Dans ce cas, le filtre actif série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale. La figure (1.15) illustre cette topologie. [1]

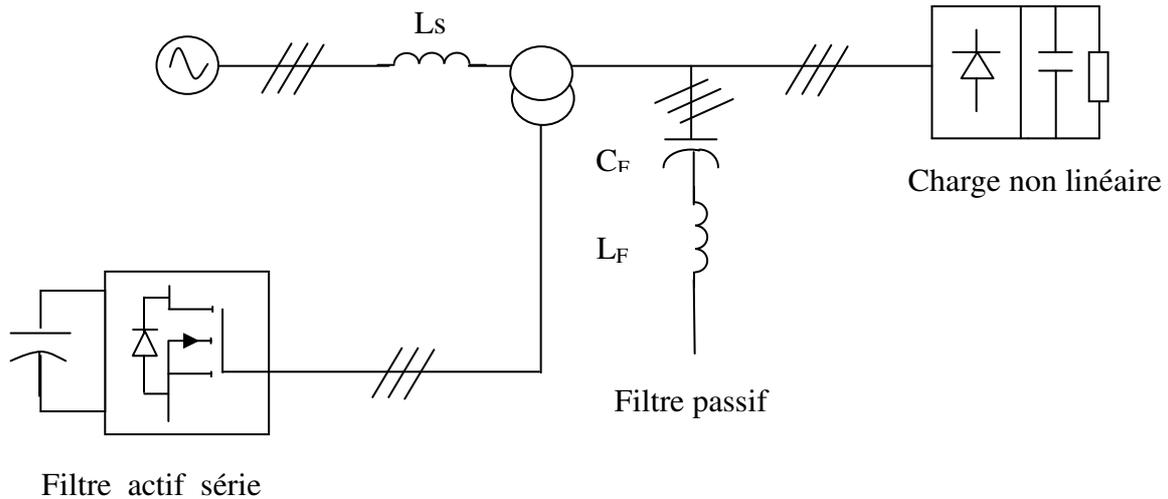


Figure (1.15): Association d'un filtre actif série et d'un filtre passif.

1.5 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté la distorsion harmonique et les différentes sources de perturbation affectant la forme d'onde des tensions du réseau électrique ainsi que, leurs effets néfastes sur les équipements électriques qui y sont connectés. Ces effets sont à l'origine d'échauffements et de dégradations du fonctionnement de ces équipements. Les normes imposées ont été également présentées. Elles fixent les limites de la génération d'harmoniques.

Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème ; les technologies mises en œuvre, telles que les filtres passifs, sont souvent pénalisantes en termes d'encombrement et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et des charges polluantes.

En ce qui concerne les solutions modernes, nous avons présenté les deux topologies utilisées, le filtre actif et le filtre hybride. Ces topologies ont pour le but de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau redeviennent sinusoïdaux. En effet, grâce aux progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance, ces solutions peu encombrantes n'occasionnent aucune résonance avec les éléments passifs du réseau et font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et de la charge polluante.

Ces solutions modernes peuvent être installées pour compenser toutes les perturbations de courant telles que les harmoniques, les déséquilibres ainsi que pour compenser de la puissance réactive.

Chapitre 2

Méthodes

d'Extraction des Harmoniques

2.1 Introduction :

Depuis quelques années, le filtrage actif fait l'objet de nombreux travaux de recherche, afin de compenser les courants harmoniques générés par les charges polluantes connectées aux réseaux électriques. La figure (2.1) présente la structure générale d'un filtre actif parallèle.

Le filtre actif parallèle contient deux parties: la partie puissance et la partie commande.[5] La première comporte un onduleur, un filtre de découplage et une source de stockage d'énergie. Ces deux derniers éléments déterminent la nature du filtre actif ;(structure tension ou courant).

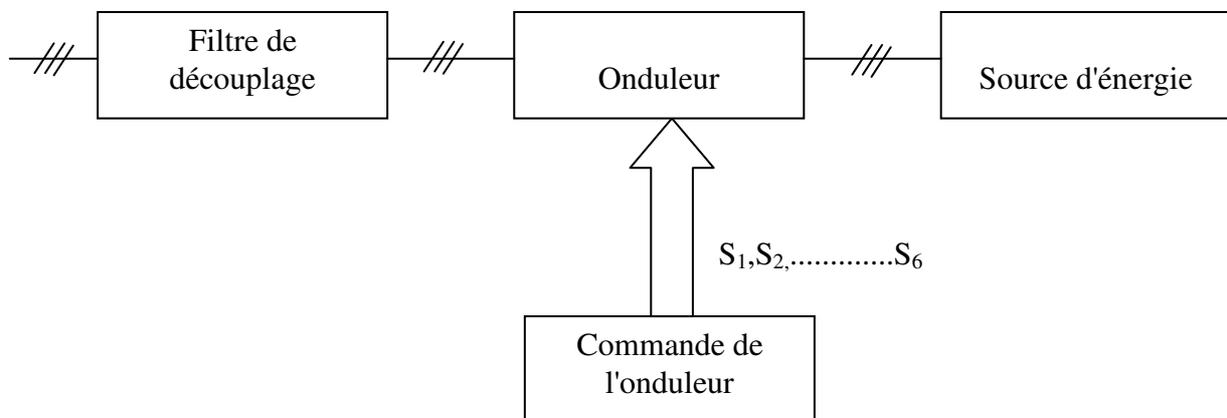


Figure (2.1): Structure générale d'un filtre actif parallèle.

Nous distinguons donc deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Dans cette étude, théorique et expérimentale, nous nous intéressons uniquement au filtrage actif parallèle à structure courant. Nous allons présenter successivement : [1]

- la structure générale du filtre actif parallèle,
- une variante de la méthode des puissances active et réactive instantanées, cette nouvelle méthode permet d'identifier les courants harmoniques de référence et met en œuvre des filtres sélectifs dits « multi-variables »,
- l'intérêt d'utiliser des FMVs,
- le contrôle du filtre actif par deux types de commandes Hystérésis ou M.L.I, pour la génération des courants de référence, le comportement du filtre actif en régime transitoire.

2.2 Modélisation du réseau électrique: [6]

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court circuit. D'où la représentation du réseau par un système des forces électromotrices triphasé équilibré en série avec une impédance, figure (2.2).

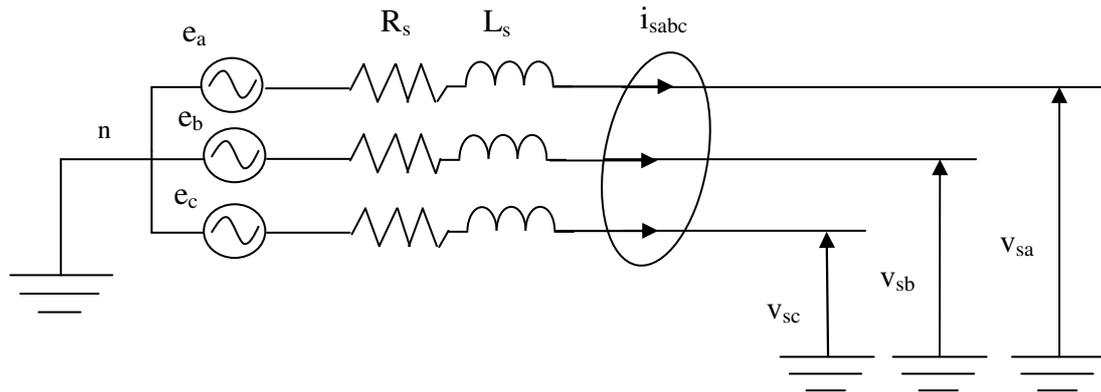


Figure (2.2) : Réseau électrique triphasé.

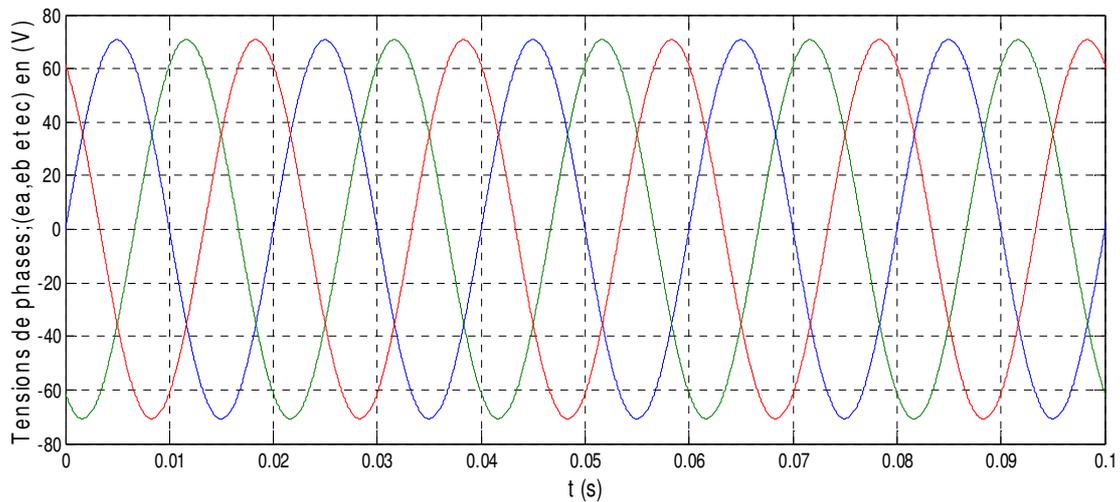


Figure (2.3) : Tensions de réseau triphasé.

Les tensions du réseau électrique sont données par :

$$e_a = \sqrt{2} v \sin(\omega t)$$

$$e_b = \sqrt{2} v \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_c = \sqrt{2} v \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Où :

- $\omega = 2\pi f_s$: Pulsation du réseau.

2.3 Modélisation de la charge polluante: [6]

La charge polluante est un redresseur de tension triphasé à diodes (pont de Graëtz), connectée au réseau par l'intermédiaire d'une impédance de ligne (L_l, R_l), et alimentant une charge inductive (L_d, R_d) côté continu, figure (2.4).

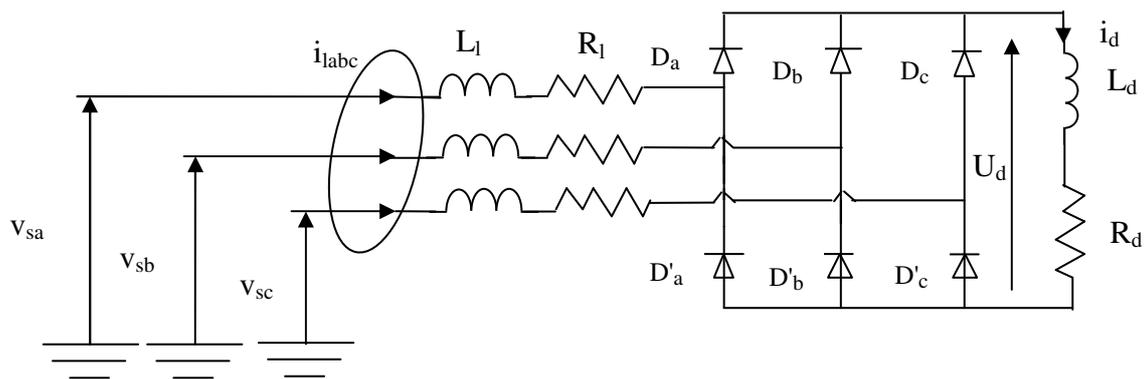


Figure (2.4) : Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge "RL".

• Résultats de simulation:

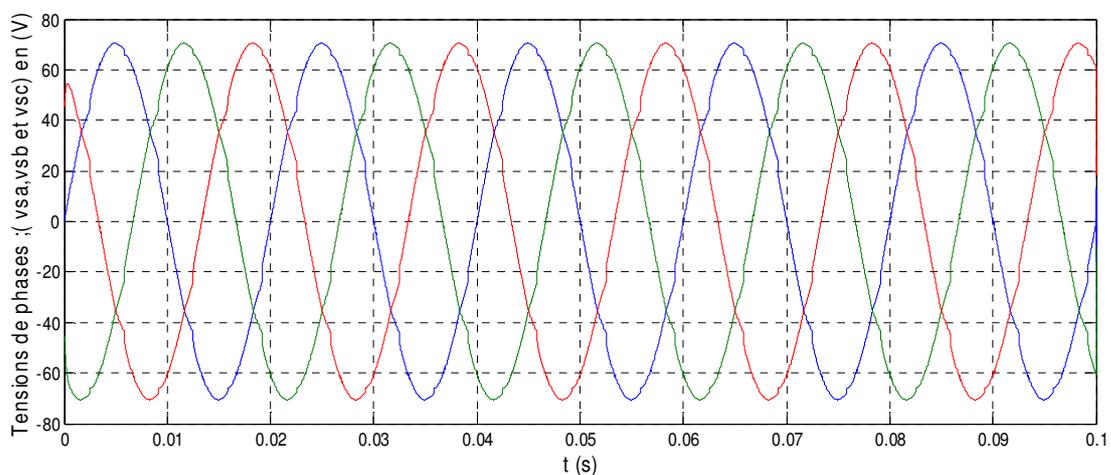


Figure (2.5) : Tensions de réseau triphasé aux points de connexion de la charge .

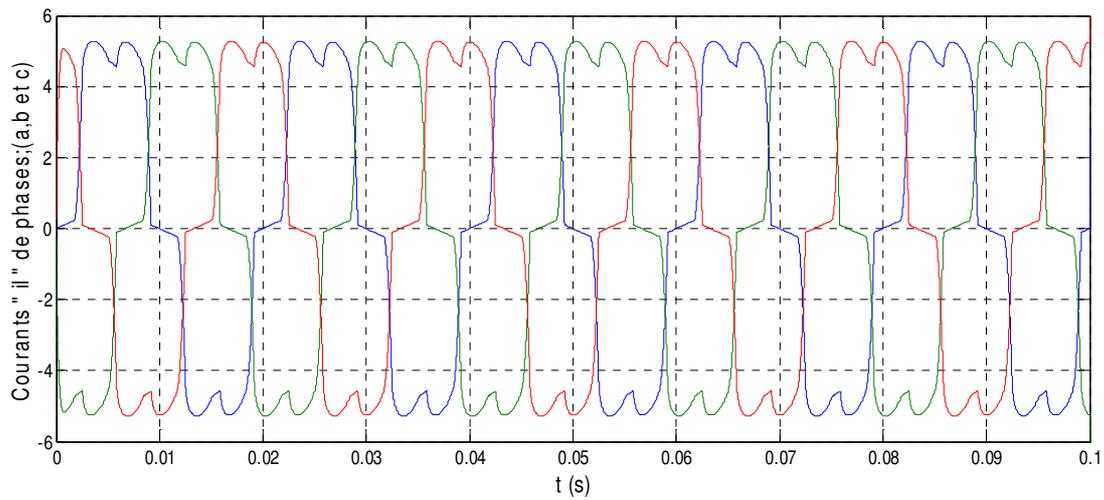


Figure (2.6) : Evolution du courant de la charge de trois phases.

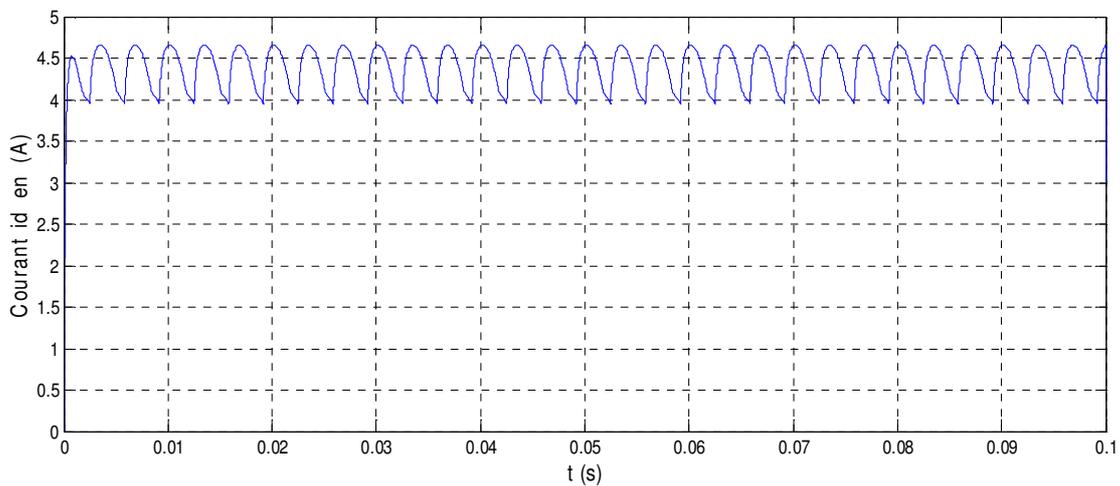


Figure (2.7) : Evolution du courant de la phase (a), au point de raccordement du circuit (Rd et Ld).

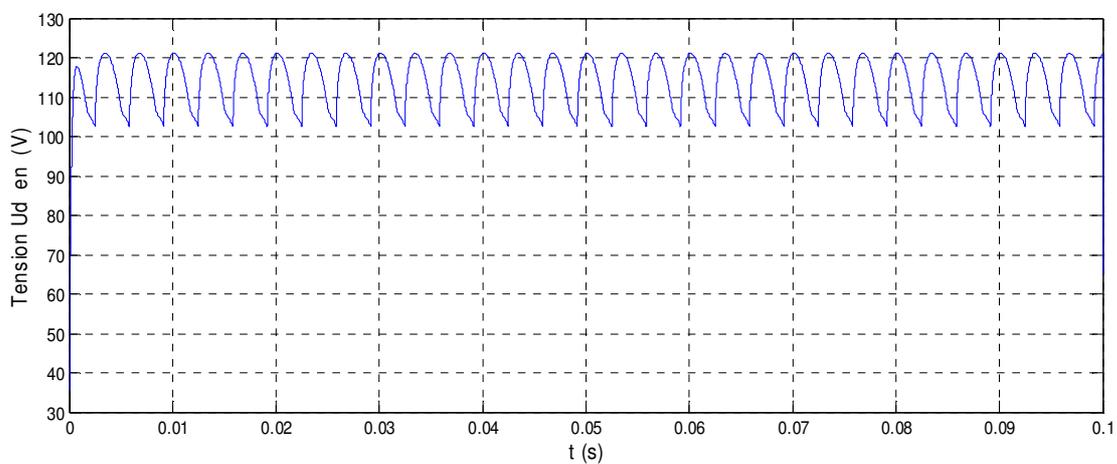


Figure (2.8) : Evolution de la tension de la phase (a), au point de raccordement du circuit (Rd et Ld).

Pour simplifier le calcul, on suppose que le redresseur est idéal et l'empêchement est nul. Deux diodes de même bras ne peuvent pas conduire simultanément. Lorsque D_a conduit, l'une de deux diodes D'_b et D'_c conduit également. Il en vient que D_a conduit lorsque v_{sa} est supérieure à v_{sb} et v_{sc} , ou encore :

$$v_{sa} = \text{Max}(v_{sj}) ; j = a, b, c$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i \text{ conduit si } v_{si} = \text{Max}(v_{sj}) ; i, j = a, b, c$$

$$D'_i \text{ conduit si } v_{si} = \text{Min}(v_{sj}) ; i, j = a, b, c$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension U_d à la sortie du redresseur est donnée par:

$$U_d = \text{Max}(v_{sj}) - \text{Min}(v_{sj}) ; j = a, b, c \quad (2.1)$$

A partir de la relation (2.1), on peut définir la valeur moyenne de la tension redressée par :

$$\bar{U}_d = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} v_{\max} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{2} v = 1.654 \sqrt{2} v \quad (2.2)$$

En supposant que le courant redressé I_d est parfaitement filtré et constant, on a :

Pour :

$$\frac{\pi}{6} \leq \omega t \leq \frac{5\pi}{6} \rightarrow I_d = i_{la}$$

$$i_{laeff} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{5\pi}{6}} I_d^2 d\omega t} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (2.3)$$

2.4 Filtre actif parallèle: [5][6]

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure (2.6) est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci, à fin de rendre le courant du réseau électrique à la forme sinusoïdale figure (2.7). Il empêche les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif. La figure (2.9) représente la structure générale du filtre actif parallèle, la quelle se présente sous forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

La partie puissance est constituée :

- 1- d'un onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandé à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT,...etc.) avec des diodes en antiparallèles ,
- 2- d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif ,
- 3- d'un filtre de sortie.

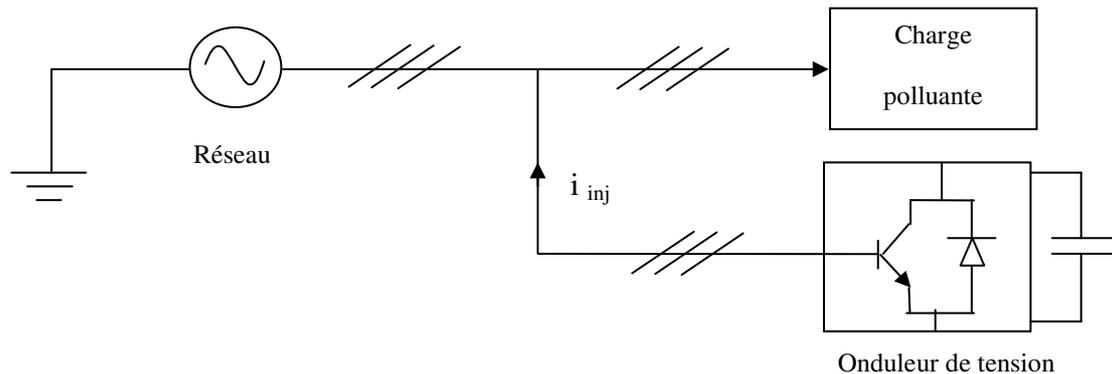


Figure (2.9) : Filtre actif parallèle.

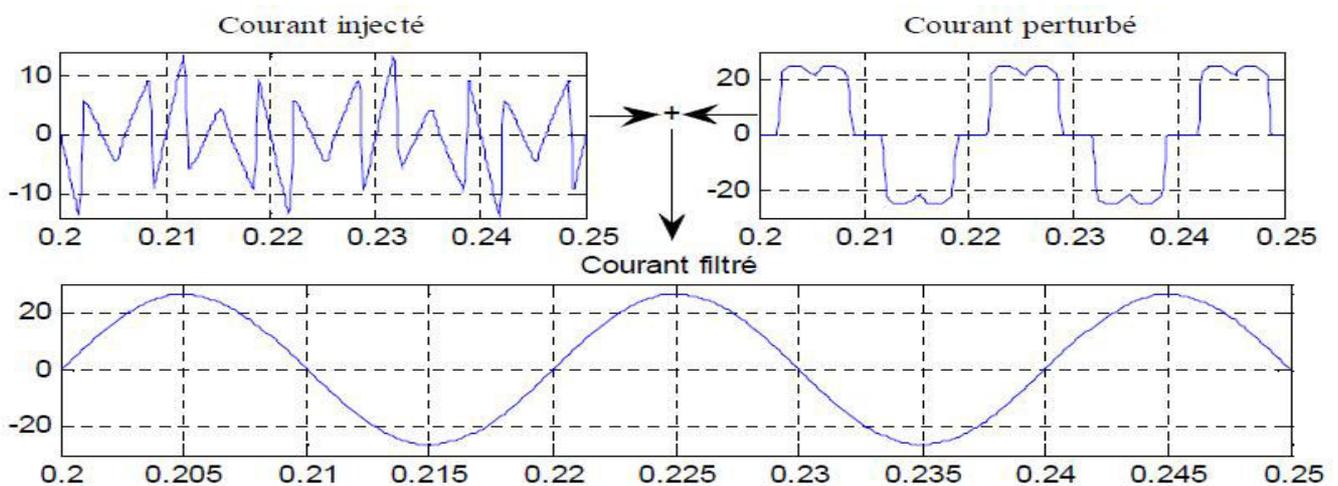


Figure (2.10) : Courant pollué, courant harmonique et courant filtré.

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- 1- de la méthode d'identification des courants perturbés ,
- 2- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie ,
- 3- de la régulation des courants injectés sur le réseau à partir de l'onduleur de tension ,
- 4- de la commande de l'onduleur de tension.

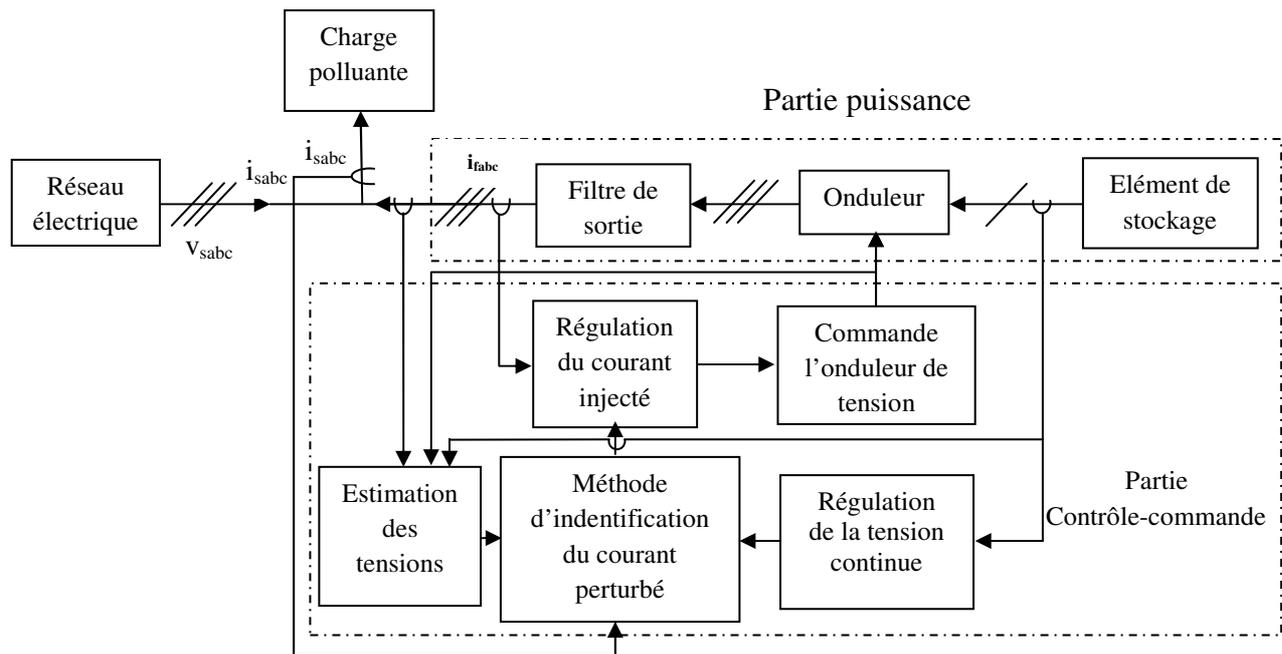


Figure (2.11) : Structure générale du filtre actif parallèle.

2.5 Identification des courants harmoniques: [6]

Le but du filtrage est de compenser les harmoniques produits dans les réseaux électriques par des charges non linéaires ou linéaires et de rendre les signaux de courant et de tension du réseau à la forme sinusoïdale. La première étape dans le filtrage est la détection des harmoniques à éliminer dans le but de les injecter dans le réseau électrique. Une bonne détection assure une bonne compensation des harmoniques et cela permet d'améliorer la qualité du signal du réseau.

La première méthode de calcul utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement et de ne choisir de compenser que les plus prépondérants. Les inconvénients les plus importants de cette méthode sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérable.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total.

Les méthodes du domaine temporel permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes.

La méthode de détection synchrone qui repose sur la transformée du Park, elle exige une précision parfaite du calcul de pulsation fondamentale, afin de ne pas avoir des courants identifiés erronés. Enfin, la méthode d'identification la plus utilisée est celle appelée méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées.

2.5.1 Méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées: [6]

Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité, et facilité d'implantation. Elle n'est cependant valable que si les tensions appliquées à l'entrée de l'identificateur sont équilibrées. Dans le cas où la tension du réseau est polluée, un système à base de P.L.L est ajouté après la mesure des tensions au point de connexion du filtre actif. Une autre solution efficace de ce problème peut être l'insertion d'un filtre appelé filtre multi-variables (F.M.V) après la mesure. L'étude du fonctionnement du filtre (F.M.V) est présentée ci-après.

Cette méthode exploite la transformation des paramètres du système dans le repère triphasé abc en biphasé dans le repère stationnaire. Cette transformation est appelée la Transformation de Concordia Directe (T.C.D). Notons par (v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}) et (i_{1a}, i_{1b}, i_{1c}) représentant respectivement les tensions au point de raccordement du filtre actif et les courants absorbés par les charges polluantes. La transformation (T.C.D) permet d'écrire ces composantes dans le repère stationnaire comme suit :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \\ v_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{10} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Les composantes d'indice (0) représentent les séquences homopolaires du système triphasé de courant et de tension.

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

$$p(t) = v_{sa} i_{la} + v_{sb} i_{lb} + v_{sc} i_{lc} \quad (2.6)$$

Cette expression peut être écrite dans le repère stationnaire par :

$$\begin{cases} p(t) = v_{s\alpha} i_{l\alpha} + v_{s\beta} i_{l\beta} \\ p(t) = v_{s0} i_{l0} \end{cases} \quad (2.7)$$

Avec :

- $p(t)$: la puissance réelle instantanée,
- $p_0(t)$: la puissance homopolaire instantanée.

L'avantage de la transformation dans le repère stationnaire est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance Imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante: [5][6]

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{sa} - v_{sb}) i_{lc} + (v_{sb} - v_{sc}) i_{la} + (v_{sc} - v_{sa}) i_{lb}] = v_{s\alpha} i_{l\beta} - v_{s\beta} i_{l\alpha} \quad (2.8)$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courant et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le voltampère imaginaire (VAI).

A partir des relations (2.7) et (2.8), nous pouvons établir la relation matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et une partie alternative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous : [5][6]

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (2.10)$$

Avec :

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

- \tilde{p} et \tilde{q} : Les puissances alternatives correspondantes à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Afin d'isoler les puissances actives et réactives conventionnelles, il faut connaître avec précision les fréquences des pulsations des puissances instantanées formées à partir de la relation (2.9). Il est à noter qu'on considère désormais que le réseau étudié est composé de trois fils ce qui empêche les composantes homopolaires d'y circuler. Après avoir identifié les pulsations des puissances instantanées, le filtre de puissance chargé d'isoler les puissances active et réactive conventionnelles peut être dimensionné. Un circuit constitué d'un filtre passe bas avec un soustracteur peut être employé, comme le présente la figure (2.12). [5][6]

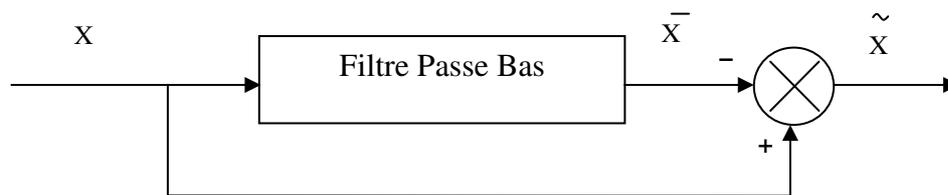


Figure (2.12) : Schéma représentant le principe de séparation des puissances.

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

Le filtre passe-bas de quatrième ordre a pour l'extraction des harmoniques.

a Calcul des courants harmoniques: [5] [6]

En inversant la relation (2.9), nous pouvons recalculer les courants dans le repère stationnaire comme le montre l'équation suivante:

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_{s\alpha}^2 + \hat{v}_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

En considérant les équations (2.10) et (2.11), nous pouvons séparer le courant dans le repère stationnaire en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{1\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q}_1 \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad (2.12)$$

Courant actif + Courant réactif + Courant harmonique

Avec :

$$\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$$

On suppose " Δ " constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique. Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère stationnaire revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence du filtre \mathbf{i}_f^* , sont calculés à partir de la transformation de Concordia inverse définie par :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_{1\alpha} \\ \tilde{i}_{1\beta} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Où $\tilde{i}_{1\alpha}$ et $\tilde{i}_{1\beta}$ sont les courants perturbateurs calculés à partir des courants harmoniques dans la relation (2.12). La figure (2.13) représente le schéma de détermination des courants de référence par la méthode des puissances instantanées.

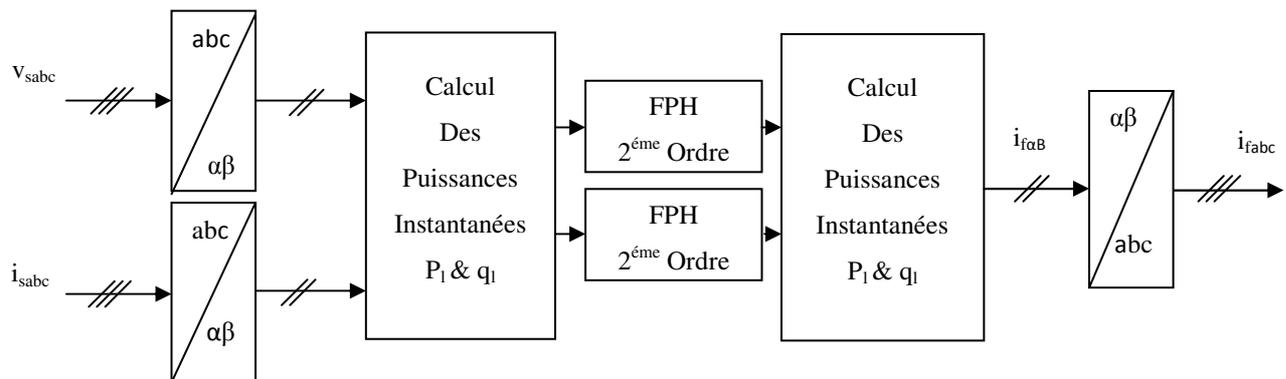


Figure (2.13): Détermination des courants de référence par la méthode des puissances instantanées.

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



Figure (2.14.a) : Filtre passe haut.

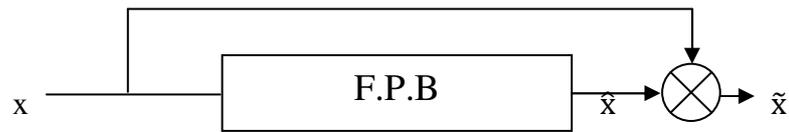
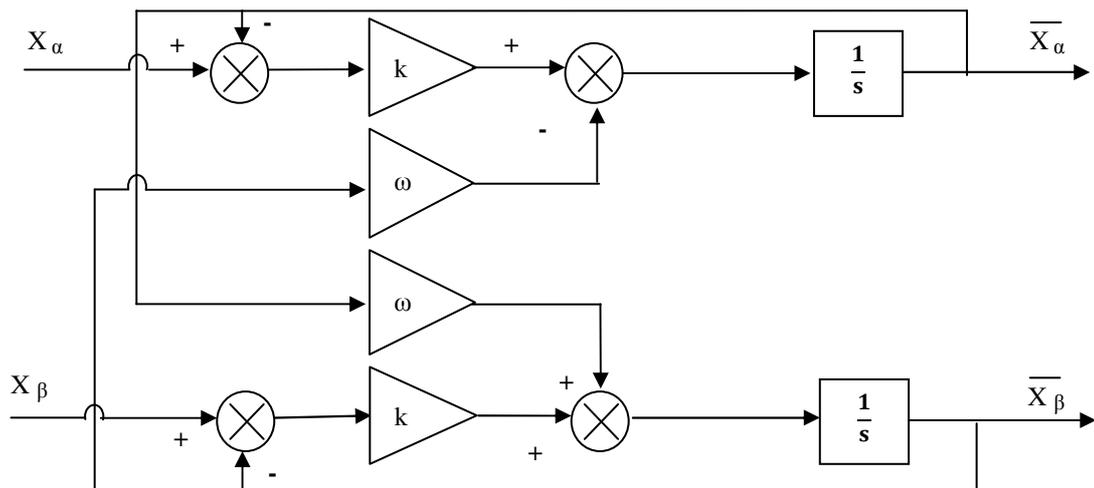


Figure (2.14.b) : Filtre passe bas.

Cependant, comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques concernant le résidu harmonique sont différentes. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car :

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

Pour ces raisons, un nouveau type de filtre d'extraction nommé ici Filtre Multi Variable (F.M.V) a été développé, son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok et basé sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux, directement selon les axes α - β comme cela est présenté à la figure (2.15). [5]



Figure(2.15) : Principe du F.M.V.

Selon les axes α - β , les expressions liant les composantes $\hat{x}_{\alpha\beta}$ en sortie du F.M.V aux composantes d'entrée $x_{\alpha\beta}$ sont les suivantes :

$$\hat{x}_{\alpha} = \left(\frac{K}{s} [x_{\alpha}(s) - \hat{x}_{\alpha}(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\beta}(s) \right) \quad (2.14)$$

$$\hat{x}_{\beta} = \left(\frac{K}{s} [x_{\beta}(s) - \hat{x}_{\beta}(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{x}_{\alpha}(s) \right)$$

où sont représentés par :

- $x_{\alpha\beta}$: le signal électrique d'entrée selon les axes α , β de nature tension ou courant.
- $\hat{x}_{\alpha\beta}$: les composantes fondamentales de $x_{\alpha\beta}$.
- K : constante à fixer
- $\omega_c = 2\pi f$: pulsation fondamentale du réseau.

Ce filtre F.M.V sera systématiquement mis en œuvre dans toutes les commandes étudiées .
Présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des F.M.Vs.

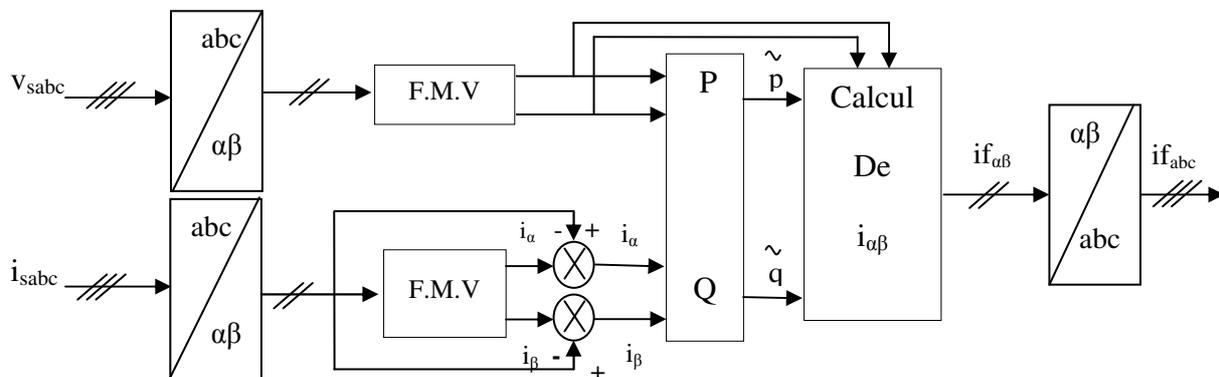


Figure (2.16) : Détermination des courants de référence à l'aide de (F.M.V).

- **Résultats de simulation:**

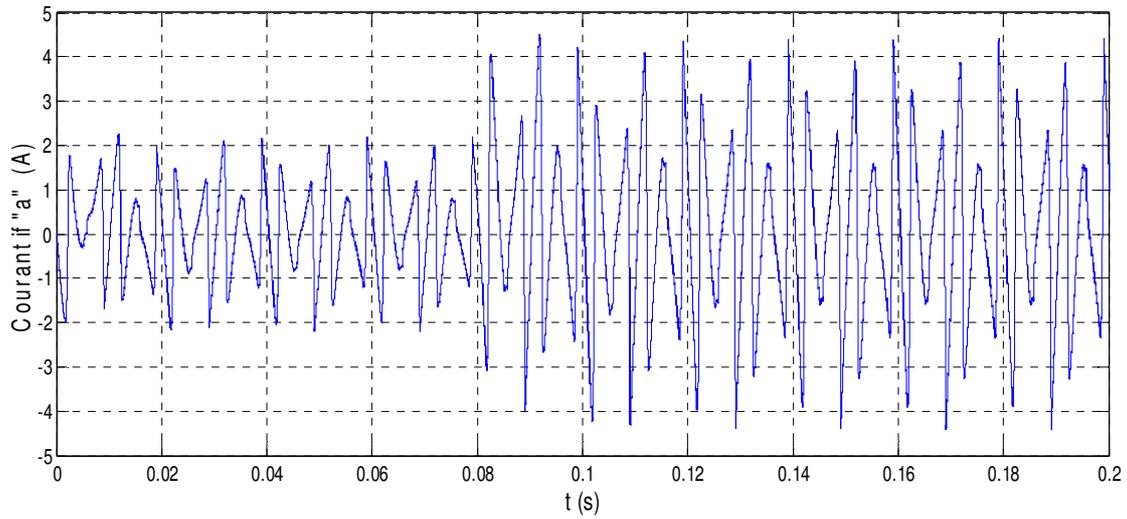


Figure (2.17) : Allure du courant de référence de la phase (a) par le (F.M.V).

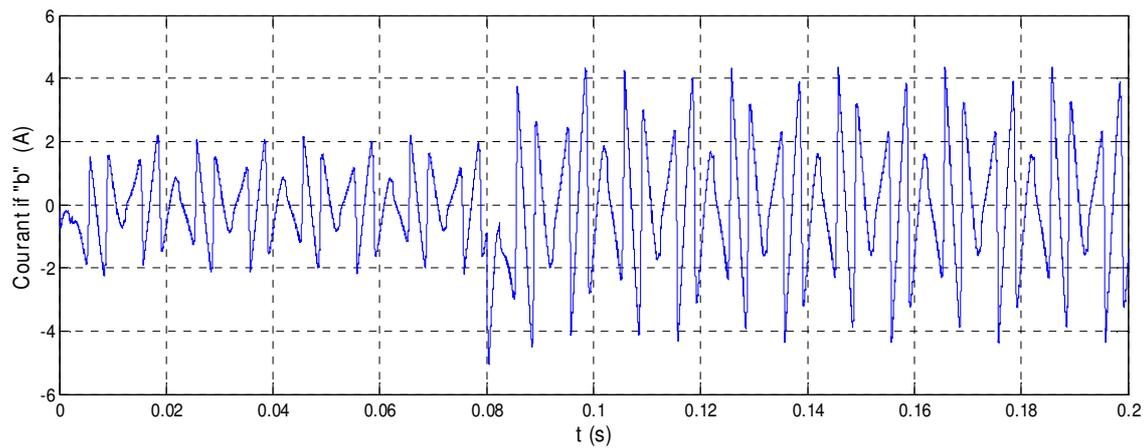


Figure (2.18) : Allure du courant de référence de la phase (b) par le (F.M.V).

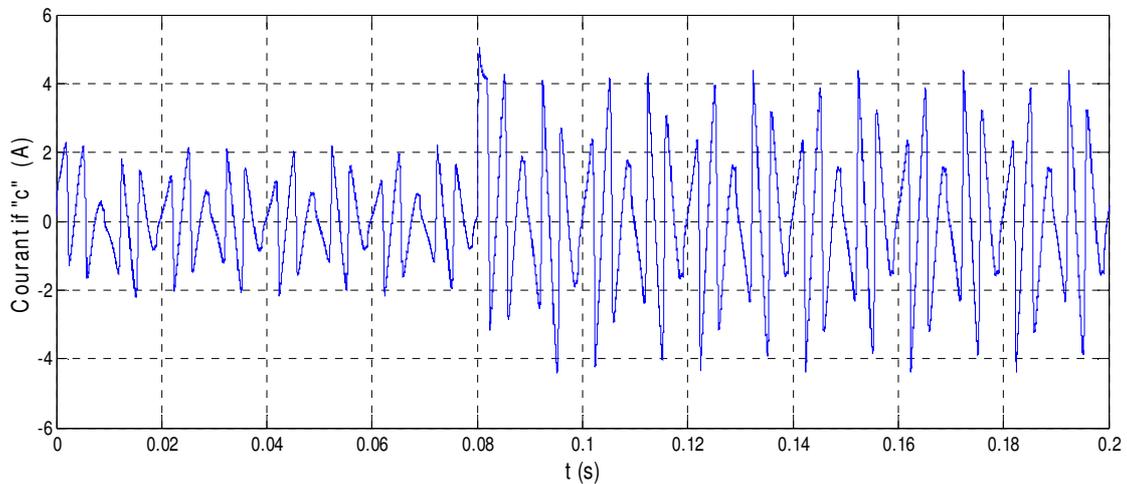


Figure (2.19) : Allure du courant de référence de la phase (c) par le (F.M.V).

b) Théorie de modification des puissances instantanées: [6]

Cette théorie est adéquate dans le cas où la source de tensions triphasée est déséquilibrée. Takashi a défini La puissance active instantanée p comme le résultant du produit scalaire entre les trois tensions et les courants, et la puissance imaginaire instantanée q comme le produit vectoriel entre eux comme suit :

$$\begin{cases} p_1 = v_{sa}i_{1a} + v_{sb}i_{1b} + v_{sc}i_{1c} \\ q_1 = v_{sa}^{\wedge}i_{1a} + v_{sb}^{\wedge}i_{1b} + v_{sc}^{\wedge}i_{1c} \end{cases} \quad (2.15)$$

Où v_{sa}^{\wedge} , v_{sb}^{\wedge} et v_{sc}^{\wedge} sont les coordonnées orthogonales (en retard de 90°) des tensions simples respectivement v_{sa} , v_{sb} et v_{sc} . Ils sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{sa}^{\wedge} \\ v_{sb}^{\wedge} \\ v_{sc}^{\wedge} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{1}{3}} \begin{bmatrix} v_{sc} & -v_{sb} \\ v_{sa} & -v_{sc} \\ v_{sb} & -v_{sa} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

La relation (2.16) peut être écrite sous forme matricielle comme suit :

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} & v_{sb} & v_{sc} \\ v_{sa}^{\wedge} & v_{sb}^{\wedge} & v_{sc}^{\wedge} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Avec :

l'hypothèse d'un système triphasé sans neutre, la somme des courants de phases est nulle ($i_a + i_b + i_c = 0$), la relation (2.17) devient :

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} - v_{sc} & v_{sb} - v_{sc} \\ v_{sa}^{\wedge} - v_{sc}^{\wedge} & v_{sb}^{\wedge} - v_{sc}^{\wedge} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Pour déterminer les consignes du courant du filtre, il suffit d'écrire :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{sb} - v_{sc} & v_{sc} - v_{sb} \\ v_{sc}^{\wedge} - v_{sa}^{\wedge} & v_{sa}^{\wedge} - v_{sc}^{\wedge} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} \\ i_{fc}^* = - (i_{fa}^* + i_{fb}^*) \end{cases} \quad (2.19)$$

$$\text{Où : } \Delta = (v_{sa} - v_{sc})(v_{sb}^{\wedge} - v_{sc}^{\wedge}) - (v_{sb} - v_{sc})(v_{sa}^{\wedge} - v_{sc}^{\wedge})$$

Dans le cas de compensation de l'énergie réactive, la relation (2.19) devient :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{sb} - v_{sc} & v_{sc} - v_{sb} \\ v_{sc} - v_{sa} & v_{sa} - v_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_1 \\ \tilde{q}_1 \end{bmatrix} \\ i_{fc}^* = - (i_{fa}^* + i_{fb}^*) \end{cases} \quad (2.20)$$

2.5.2 Méthode du référentiel synchrone: [5][6]

Dans la méthode du repère synchrone, appelée aussi méthode des courants instantanés d et q, les courants de la charge sont transformés dans le repère synchrone, afin d'extraire la composante harmonique. Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibrée. La figure (2.20) représente le schéma de principe de cette méthode.

La transformation est définie comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \\ i_{1o} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1a} \\ i_{1b} \\ i_{1c} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Où θ qui représente la position angulaire du repère tournant est une fonction linéaire de la pulsation angulaire. Ce repère de référence tourne à une vitesse constante en synchronisme avec les tensions triphasées. La référence harmonique sera extraite des courants dans le repère stationnaire à l'aide d'un F.M.V. Les courants sur les axes d et q peuvent être décomposés en deux composantes comme suit:

$$\begin{cases} i_{1d} = \overline{i_{1d}} + \tilde{i}_{1d} \\ i_{1q} = \overline{i_{1q}} + \tilde{i}_{1q} \end{cases} \quad (2.22)$$

En l'absence du neutre, seule les composantes alternatives seront présentées à la sortie du système filtre-soustracteur. En plus, en insérant ce système-là uniquement sur l'axe d, tout le courant sur l'axe q sera disponible comme référence. Par conséquence, la puissance réactive de la charge sera compensée en plus des harmoniques, les courants de référence deviennent alors:

$$\begin{bmatrix} i_{fd}^* \\ i_{fq}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_{1d} \\ \tilde{i}_{1q} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Utilisons la transformation inverse de Park, les références dans le repère triphasé seront :

$$\begin{bmatrix} i_{fa}^* \\ i_{fb}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \\ \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fd}^* \\ i_{fq}^* \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Cette méthode est sensible aux variations de la fréquence, Ce qui signifie le besoin d'une boucle de verrouillage de phase (P.L.L). La méthode montre des meilleures performances dans des conditions imparfaites du système de tensions. Une autre méthode également utilisée pour déterminer l'angle θ repose sur la transformation de Concordia. Après la transformation des courants de la charge polluante dans le repère stationnaire, ces derniers sont définis dans le repère synchrone par :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{fd} \\ \tilde{i}_{fq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{l\alpha} \\ i_{l\beta} \end{bmatrix} \text{ Où } \theta = \arctan \left(\frac{v_{s\beta}}{v_{s\alpha}} \right) \quad (2.25)$$

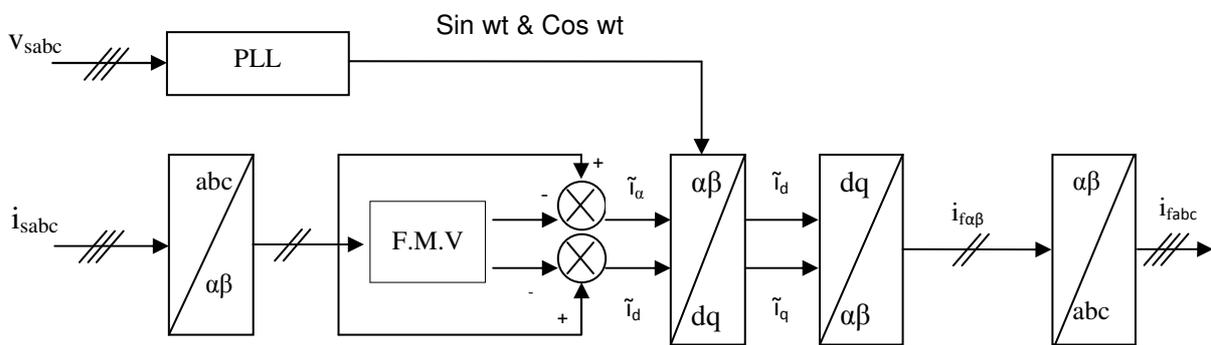


Figure (2.20) : Extraction des harmoniques par la méthode de référentiel synchrone.

• **Résultats de simulation:**

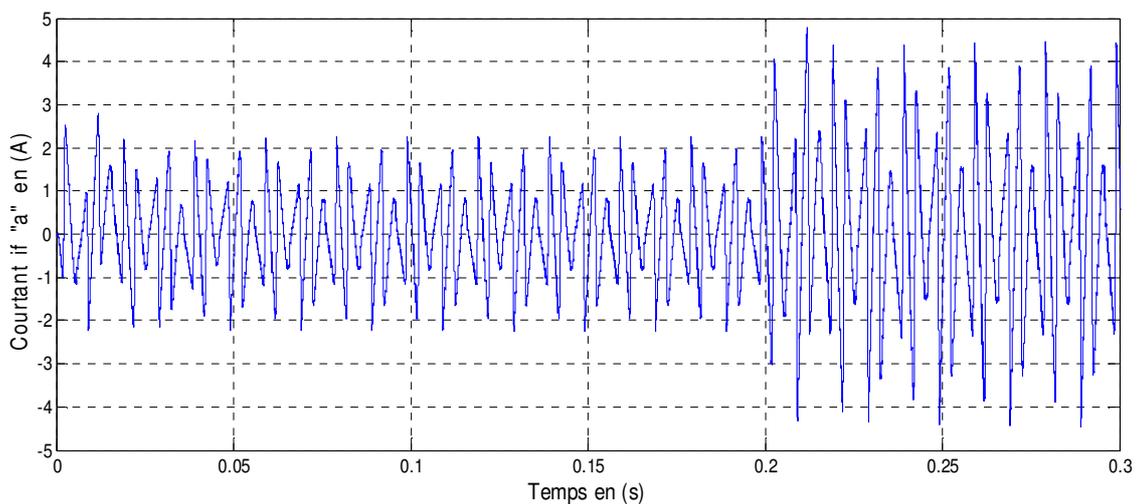


Figure (2.21) : Allure du courant de référence de la phase (a) par le (F.M.V).

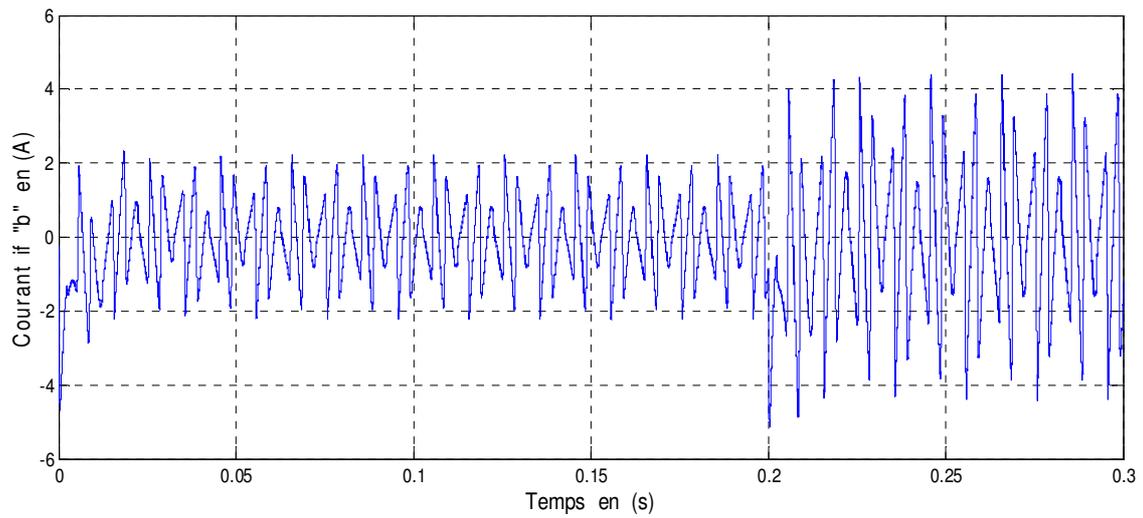


Figure (2.22) : Allure du courant de référence de la phase (b) par le (F.M.V).

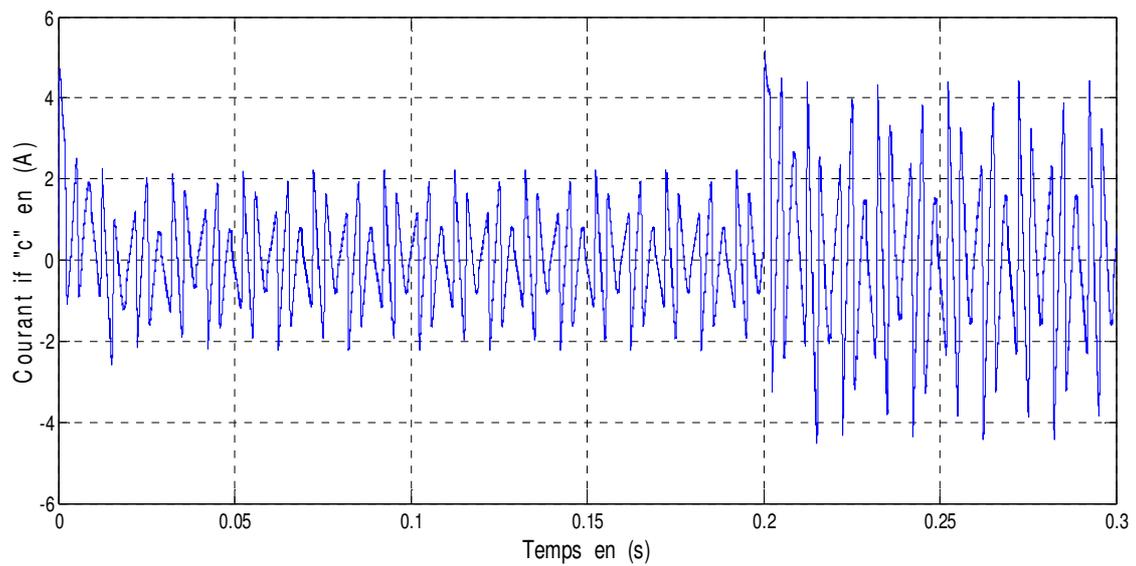


Figure (2.23) : Allure du courant de référence de la phase (c) par le (F.M.V).

2.6 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure générale d'un filtre actif parallèle , la modélisation du réseau électrique ainsi que, sa charge polluante et quelques méthodes existantes pour l'identification des composantes harmoniques du courant pollué et ce par deux méthodes différentes , une de puissance réelle et imaginaire instantanée et l'autre du référentiel synchrone et nous avons présenté aussi, un nouveau type du filtre appelé filtre multi-variables (F.M.V).

Chapitre 3

Commande

Linéaire du

Filtre Actif Parallèle

3.1 Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons étudier en détail les trois modèles de modulation utilisés de la commande de l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux à savoir ;(modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé, modèle du filtre actif dans le repère synchrone (Park) et le modèle du filtre actif dans le repère stationnaire) ainsi que, les différents types de commandes de l'onduleur et les méthodes de commande directe basées sur ; (la puissance instantanée et le référentiel synchrone).

On résoudra les équations mathématiques des différentes méthodes de commande du filtre actif parallèle des réseaux électriques triphasé, par le logiciel "**MATLAB-SIMULINK**" et l'évolution des résultats de simulation obtenus du courant perturbé , va nous permettre de distinguer les valeurs des composants électriques correspondantes et le circuit équivalent adéquat, pour l'amélioration des performances du filtre, dans le but d'élimination des perturbations du courant de réseau, ainsi que celle de la tension du réseau .

3.2 Onduleur de tension: [5][6]

Les onduleurs de tension constituent une fonction incontournable de l'électronique de puissance . Les deux grands domaines d'application classiques des onduleurs de tension sont les alimentations de secours et les entraînements à vitesse variable , la forte évolution des onduleurs de tension s'est appuyée, d'une part, sur le développement des composants semi-conducteurs contrôlables, puissants, robustes , rapides, et d'autre part sur l'utilisation quasi généralisée des techniques dites de modulation de largeur d'impulsion (M.L.I).

La figure (3.1) représente un onduleur triphasé à structure de 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 interrupteur (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle qui assure la circulation du courant de roue libre. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} , la tension à ses bornes, V_{dc} est maintenue à une valeur quasi constante. La fluctuation de cette tension doit être faible d'une part pour ne pas dépasser la limite de tension des semi-conducteurs, et d'autre part, pour ne pas dégrader les performances du filtre actif . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) , employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique. Dans ce cas, le pont onduleur est l'interface entre deux types de sources : source de courant côté alternatif et source de tension côté continu.

La figure (3.2) représente le schéma équivalent par phase d'un filtre actif connecté au réseau électrique.

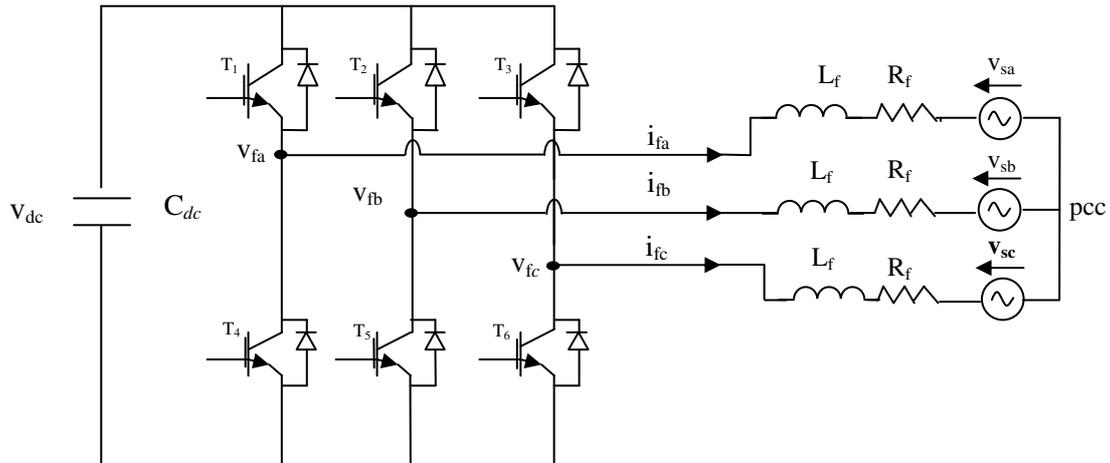


Figure (3.1) : Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux.

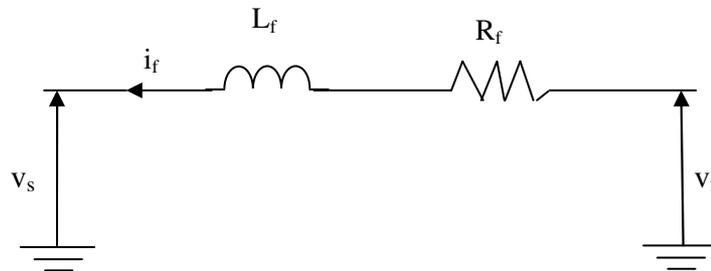


Figure (3.2) : Schéma de liaison entre l'onduleur de tension et le réseau.

3.2.1 Modélisation de l'onduleur de tension à deux niveaux: [5][6]

Le schéma de l'onduleur montré dans la figure (3.1), représente un onduleur que l'on appelle à deux niveaux, la sortie de cet onduleur peut prendre deux niveaux de tension ($+V_{dc}$, $-V_{dc}$) dépendante de la tension de la source continue et des impulsions de commande des interrupteurs. 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.

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure (3.1) dépendent de l'état des signaux de commande (S_a , S_b , S_c), comme défini ci-dessous :

$$S_a = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

A partir de la figure (3.3), on peut dériver les tensions de l'onduleur en fonction des états des interrupteurs, les potentielles des nœuds A, B, et C de l'onduleur par rapport au point milieu imaginaire M sont données par les équations (3.1) :

$$\begin{cases} V_{AM} = U_c \cdot (2S_a - 1) \\ V_{BM} = U_c \cdot (2S_b - 1) \\ V_{CM} = U_c \cdot (2S_c - 1) \end{cases}, \text{ avec } U_c = \frac{V_{dc}}{2} \quad (3.1)$$

Les tensions composées de l'onduleur s'expriment en fonction des états des interrupteurs comme suit:

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AM} - V_{BM} = 2 \cdot U_c \cdot (S_a - S_b) \\ V_{BC} = V_{BM} - V_{CM} = 2 \cdot U_c \cdot (S_b - S_c) \\ V_{CA} = V_{CM} - V_{AM} = 2 \cdot U_c \cdot (S_c - S_a) \end{cases} \quad (3.2)$$

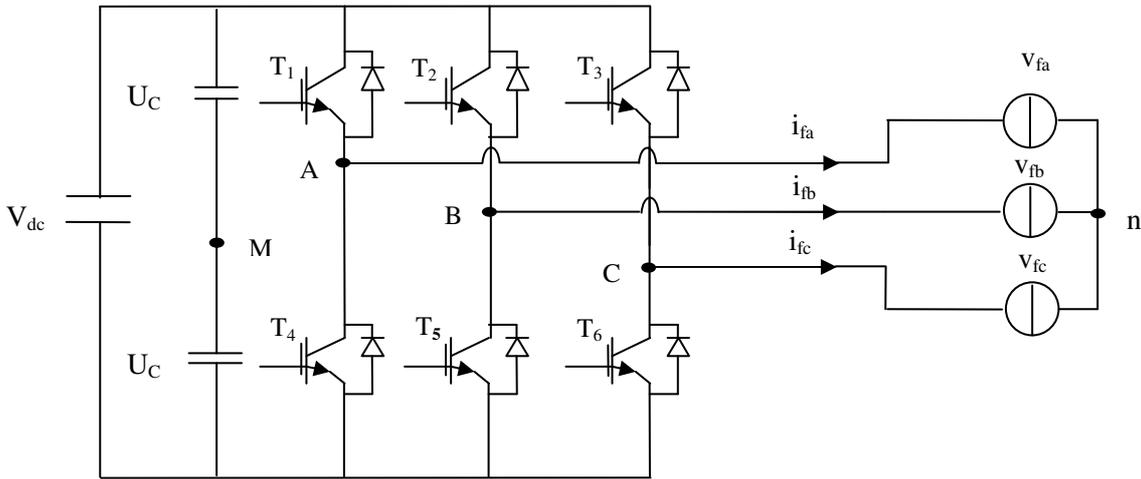


Figure (3.3) : Structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux.

Et en fonction des tensions simples de l'onduleur :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{An} - V_{Bn} \\ V_{BC} = V_{Bn} - V_{Cn} \\ V_{CA} = V_{Cn} - V_{An} \end{cases} \quad (3.3)$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} V_{AB} - V_{CA} = V_{An} - (V_{Bn} + V_{Cn}) + V_{An} \\ V_{BC} - V_{AB} = V_{Bn} - (V_{Cn} + V_{An}) + V_{Bn} \\ V_{CA} - V_{BC} = V_{Cn} - (V_{An} + V_{Bn}) + V_{Cn} \end{cases} \quad (3.4)$$

Dans un système de trois tensions équilibrées, la somme des tensions est nulle, alors :

$$V_{An} + V_{Bn} + V_{Cn} = 0 \quad (3.5)$$

A partir de la relation (3.5), on peut écrire :

$$\begin{cases} V_{An} = -(V_{Bn} + V_{Cn}) \\ V_{Bn} = -(V_{An} + V_{Cn}) \\ V_{Cn} = -(V_{An} + V_{Bn}) \end{cases} \quad (3.6)$$

En remplaçant le système (3.6) dans (3.4), on peut trouver les tensions simples de l'onduleur en fonction de celles composées :

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{V_{AB} - V_{CA}}{3} \\ V_{Bn} = \frac{V_{BC} - V_{AB}}{3} \\ V_{Cn} = \frac{V_{CA} - V_{BC}}{3} \end{cases} \quad (3.7)$$

A partir des systèmes (3.2) et (3.4), les tensions simples de l'onduleur peuvent s'écrire en fonction des états S_a , S_b et S_c et de la tension V_{dc} comme suit :

$$\begin{cases} v_{fa} = V_{An} = 2U_c \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} = V_{dc} \frac{2S_a - S_b - S_c}{3} \\ v_{fb} = V_{Bn} = 2U_c \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} = V_{dc} \frac{2S_b - S_a - S_c}{3} \\ v_{fc} = V_{Cn} = 2U_c \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} = V_{dc} \frac{2S_c - S_a - S_b}{3} \end{cases} \quad (3.8)$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de la tension de sortie du filtre actif V_{fk} (référées au neutre n de la source) comme le montre le Tableau (3.1);

Cas	S_a	S_b	S_c	v_{fa}/V_{dc}	v_{fb}/V_{dc}	v_{fc}/V_{dc}
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3
2	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3
3	1	1	0	1/3	1/3	-2/3
4	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3
5	1	0	1	1/3	-2/3	1/3
6	0	1	1	-2/3	1/3	1/3
7	1	1	1	0	.0	0

Tableau (3.1) : Tensions possibles à la sortie de l'onduleur.

3.3 Modèle mathématique du filtre actif parallèle dans le repère triphasé: [5][6]

L'équation de tension par phase du filtre actif parallèle triphasé illustré par la figure (3.3) est donnée par :

$$\begin{aligned} V_{sk} &= V_{fk} - V_{L_{fk}} - V_{R_{fk}} \\ &= V_{fk} - L_f \frac{di_{fk}}{dt} - R_f i_{fk} \quad , k= a,b,c \end{aligned}$$

(3.9)

Alors, les équations des trois phases sont données par :

$$L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} = -R_f \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{fa} \\ v_{fb} \\ v_{fc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Et pour le coté continu :

$$C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \quad (3.11)$$

Le système d'équation définissant le filtre actif dans le repère triphasé est donnée par :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fa}}{dt} = -R_f i_{fa} + v_{fa} - v_{sa} \\ L_f \frac{di_{fb}}{dt} = -R_f i_{fb} + v_{fb} - v_{sb} \\ L_f \frac{di_{fc}}{dt} = -R_f i_{fc} + v_{fc} - v_{sc} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} - S_c i_{fc} \end{cases} \quad (3.12)$$

3.4 Modèle du filtre actif dans le repère synchrone (Park): [5][6]

Appliquons la transformée de Park sur le système (3.12), nous obtiendrons le modèle de l'onduleur dans le repère synchrone d_q comme suit:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fd}}{dt} = -R_f i_{fd} - L_f \omega i_{fq} + v_{fd} - v_{sd} \\ L_f \frac{di_{fq}}{dt} = -R_f i_{fq} + L_f \omega i_{fd} + v_{fq} - v_{sq} \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_d i_{fd} - S_q i_{fq} \end{cases} \quad (3.13)$$

$$S_d = S_\alpha \cos \omega t + S_\beta \sin \omega t$$

$$S_q = -S_\alpha \sin \omega t + S_\beta \cos \omega t \quad (3.14)$$

$$S_{\alpha} = \frac{1}{\sqrt{6}}(2S_a - S_b - S_c)$$

$$S_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}}(S_b - S_c) \quad (3.15)$$

3.5 Modèle du filtre actif dans le repère stationnaire: [5][6]

A partir du modèle du filtre actif dans le repère triphasé et en appliquant la transformée de Concordia directe sur ce modèle, le modèle de l'onduleur dans le repère stationnaire est donné par :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{f\alpha}}{dt} = -R_f i_{f\alpha} + v_{f\alpha} - v_{s\alpha} \\ L_f \frac{di_{f\beta}}{dt} = -R_f i_{f\beta} + v_{f\beta} - v_{s\beta} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = S_{\alpha} i_{f\alpha} + S_{\beta} i_{f\beta} \end{cases} \quad (3.16)$$

Où, les tensions du réseau, les courants et les tensions du filtre sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$\begin{bmatrix} v_{f\alpha} \\ v_{f\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\alpha} \\ S_{\beta} \end{bmatrix} v_{dc} \quad (3.18)$$

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

3.5.1 Système de stockage d'énergie: [5][6]

L'utilisation des batteries de condensateurs est effective dans les petites et moyennes puissances, dans le cas des grandes puissances on utilise des bobines supraconductrices.

Le choix de la tension V_{dc} et de la capacité de condensateur C_{dc} affecte la dynamique et la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_{dc} élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_{dc} causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible.

Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées :

- Le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graëtz), est la base de la première méthode. On choisit un taux d'ondulation ΔV_{dc} acceptable, généralement de l'ordre de 2% V_{dc} . On peut calculer C_{dc} à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{v \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\Delta V_{dc} \omega V_{dc}^2} \quad (3.20)$$

Avec :

- v_S : la tension simple du réseau,
- I_h : le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont de Graëtz, zéro dans le cas d'un redresseur à diodes.

On choisit la tension V_{dc} comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs la valeur minimale de la tension V_{dc} est deux fois plus grande que le max de tension simple du réseau pour assurer la contrôlabilité du courant du filtre de sortie en tous temps .

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

$$C_{dc} = \frac{I_h}{V_{dc} \Delta V_{dc} \omega_h} \quad (3.21)$$

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

- Une troisième méthode basée sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif et celle de la charge polluante comme suit :

La valeur efficace du courant de la charge coté alternatif dans les trois phases est :

$$I_{\text{leff}} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (3.22)$$

où I_d représente le courant de charge coté continu.

Le fondamental du courant de la charge est donné par :

$$I_{\text{l.fon.eff}} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad (3.23)$$

Les courants harmoniques produits par la charge représente la différence entre le fondamentale et la valeur efficace du courant coté alternatif de la charge. Ces courants sont donnés par :

$$I_{L\text{ har}} = \sqrt{I_{1.\text{eff}}^2 - I_{1.\text{fon.eff}}^2} = \sqrt{\frac{2}{3} - \frac{6}{\pi^2}} I_d = 0,2423 I_d \quad (3.24)$$

Le filtre actif doit fournir la puissance correspondante aux harmoniques produite par la charge.

Le rapport entre la puissance du filtre actif et celle de la charge polluante est :

$$\begin{aligned} \frac{S_f}{S_1} &= \frac{S_{1.\text{har}}}{S_1} = \frac{3I_{1.\text{har}}V_{\text{sa.eff}}}{3I_{1.\text{eff}}V_{\text{sa.eff}}} \\ &= \frac{I_{1.\text{har}}}{I_{1.\text{eff}}} = \frac{0,24I_d}{\sqrt{\frac{2}{3}}I_d} = 0,2968 \end{aligned} \quad (3.25)$$

D'où, on peut exprimer la puissance apparente du filtre en fonction de celle de la charge polluante par :

$$S_f = 0,2968S_1 \quad (3.26)$$

La puissance apparente de la charge est constituée de la puissance active, réactive et déformante, elle est donnée par la relation suivante :

$$S_1^2 = P_1^2 + Q_1^2 + D_1^2 \quad (3.27)$$

Dans le cas de compensation simultanée des harmoniques et de la puissance réactive, la puissance du filtre est donnée par :

$$S_f = \sqrt{D_1^2 + Q_1^2} \quad (3.28)$$

$$\frac{S_f}{S_1} = 0,2968 = \frac{\sqrt{D_1^2 + Q_1^2}}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + D_1^2}} \quad (3.29)$$

A partir de la relation (3.29), la puissance du filtre peut s'exprimer en fonction de la puissance active de la charge polluante par la relation suivante :

$$S_f = 0,3036 P_1 \quad (3.30)$$

Le condensateur du filtre doit produire une variation d'énergie qui doit être égale ou supérieure à l'énergie équivalente à $0.3036 P_1$. L'énergie emmagasinée dans le condensateur est donnée par :

$$E_{\min} = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc.\min}^2$$

$$E_{\max} = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc.\max}^2 \quad (3.31)$$

Où E_{\min} , E_{\max} : représentent respectivement l'énergie minimale et l'énergie maximale emmagasinées dans le condensateur. La variation de l'énergie du condensateur pendant une période d'ondulation de la tension continue ΔT doit être supérieure ou égale à la puissance que doit produire le filtre actif. Ce qui est exprimé par :

$$E_{\max} - E_{\min} = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc.\max}^2 - \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc.\min}^2 \geq 0,3036 P_1 \Delta T \quad (3.32)$$

En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau électrique, on peut trouver :

$$C_{dc} \geq \frac{2 * 0,3036 P_1}{6 f_s (V_{dc.\max}^2 - V_{dc.\min}^2)} \quad (3.33)$$

Avec f_s : la fréquence fondamentale du réseau électrique.

Si on fixe l'ondulation de la tension continue à $\Delta V_{dc} = 2\% V_{dc}$, on peut écrire :

$$V_{dc.\max(\min)} = V_{dc} \pm \frac{\Delta V_{dc}}{2} \quad (3.34)$$

3.5.2 Filtre de couplage: [5][6]

Le filtre de couplage est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau.

Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

- assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_{lh}}{dt} \quad (3.35)$$

Où i_f : Courant du filtre,

i_{lh} : Courant harmonique de la charge.

- empêcher les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau électrique.

Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance L_f avec une résistance interne R_f , une petite valeur de cette inductance assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{\max} = \frac{V_{f\max} - V_{s\max}}{L_f} \quad (3.36)$$

Avec :

- $V_{f\max}$: La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur,
- $V_{s\max}$: La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

Nous prenons la valeur maximale de tension $V_f = \sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc}$ avec la valeur maximale de la tension du réseau, pour des petites variations du courant du filtre, on obtient :

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{\max} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc} - V_{s\max}}{L_f} \quad (3.37)$$

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

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

$$L_f = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}V_{dc} - V_{s\max}}{0,25 i_{s\max} f_{\text{ond}}} \quad (3.38)$$

3.6 Commande de l'onduleur: [5][6]

Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants à la sortie du filtre actif et leurs références calculées à partir des différentes méthodes d'extraction et de régulation des courants harmoniques et de la tension du condensateur de stockage d'énergie.

3.6.1 Commande par hystérésis: [5]

La commande conventionnelle par hystérésis est très couramment utilisée de par sa simplicité d'utilisation et sa robustesse. En fait, cette stratégie assure un contrôle satisfaisant du courant sans exiger une connaissance poussée du modèle du système à contrôler ou de ses paramètres. La figure (3.4) expose son principe qui consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence $i_{f\text{ref}}$ et le courant produit par l'onduleur i_f .

Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

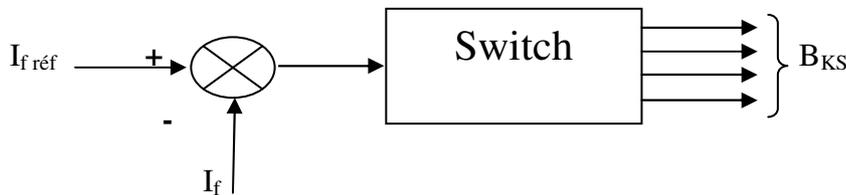


Figure (3.4): Schéma de commande par hystérésis.

a) Commande par hystérésis à bande fixe: [6]

Dans ce cas de contrôle du courant, la fréquence de commutation dépend essentiellement de la dérivée du courant de consigne. Cette dernière dépend de la valeur de l'inductance de découplage et de la chute de tension à ses bornes. Il faut noter que le filtre de couplage a des effets sur la fréquence de commutation et sur le comportement dynamique du filtre actif.

L'avantage principale de cette méthode est la simplicité de mise en œuvre, tandis que la fréquence de commutation variable qu'on ne peut pas maîtriser correctement peut être son majeur inconvénient. Cette fréquence variable rend le filtrage à la sortie difficile. 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 modulée ». Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, 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.

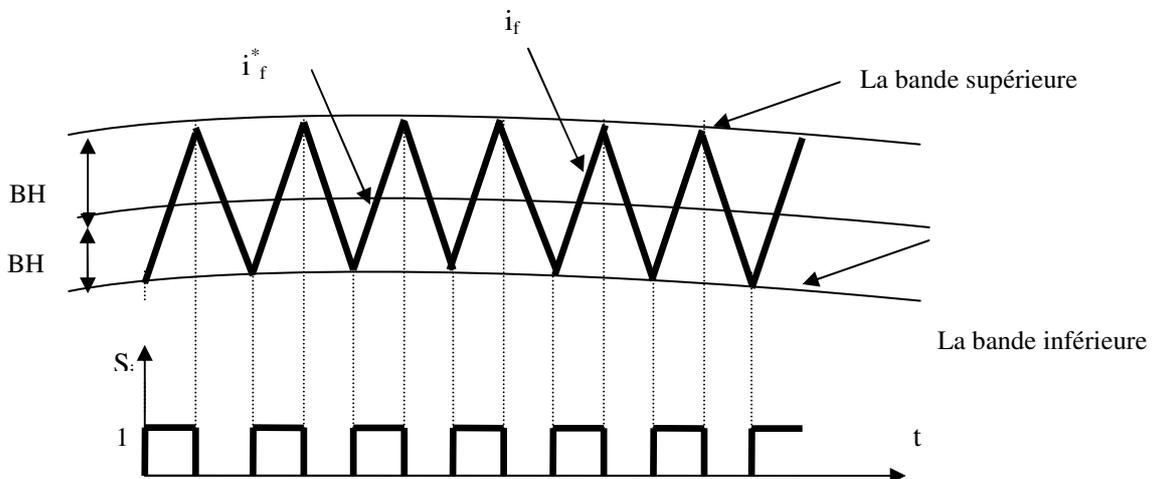


Figure (3.5) : Commande des interrupteurs par hystérésis à bande fixe.

- **Résultats de simulation:**

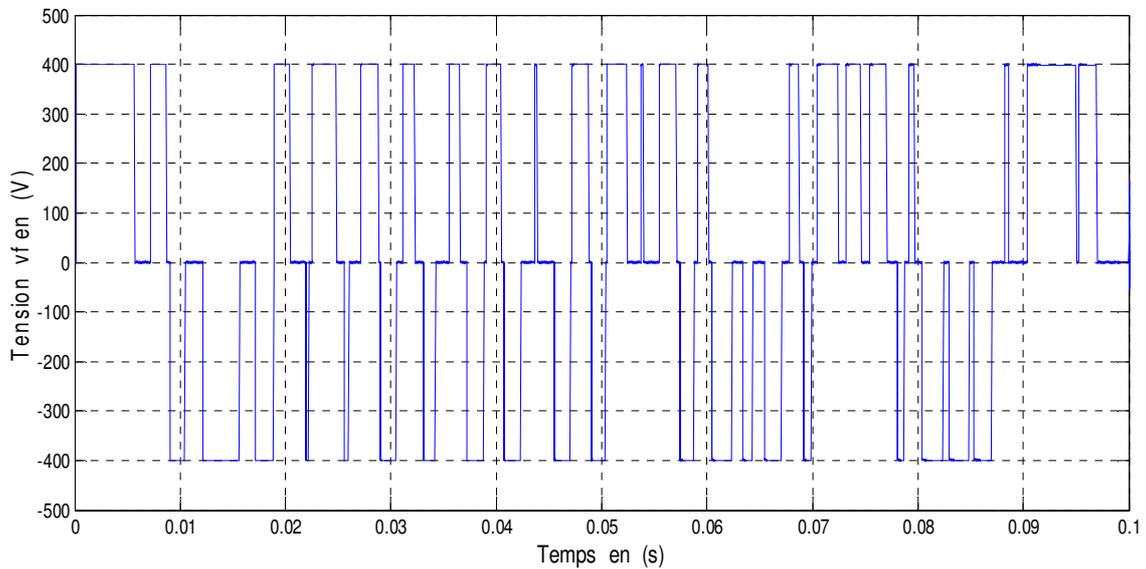


Figure (3.6) : Allure de la tension de l'onduleur à deux niveaux par la commande hystérésis.

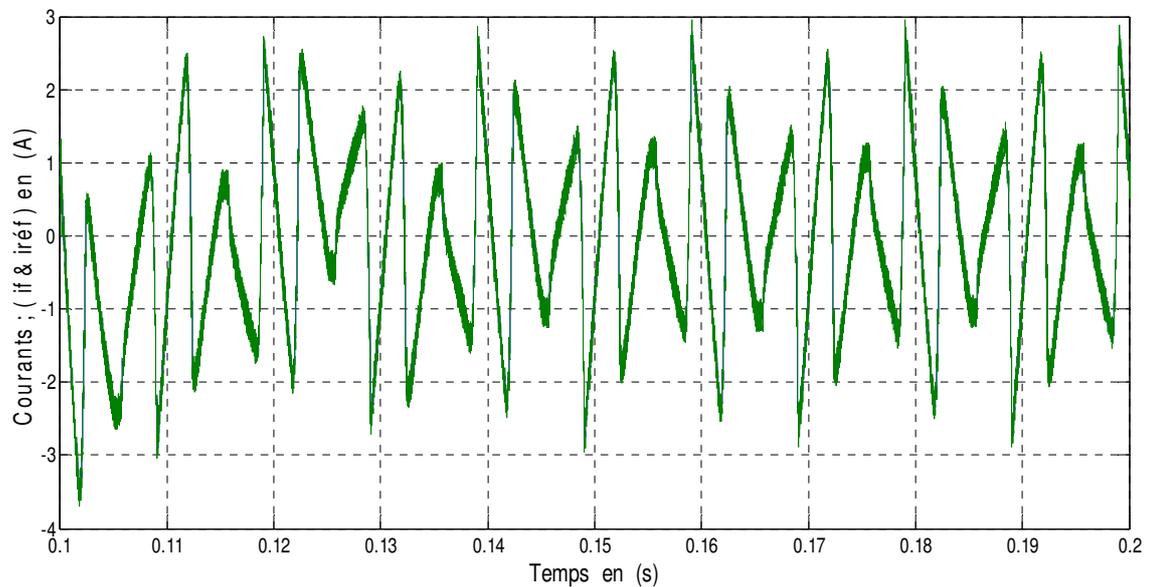


Figure (3.7) : Allure du courant de l'onduleur et le courant de référence par la commande hystérésis.

3.6.2 Commande par M.L.I sinusoïdale: [5][6]

La technique de commande par Modulation de Largeur d'impulsion (M.L.I) 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 M.L.I à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette tension est ensuite comparée avec un signal en dent de scie (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs.

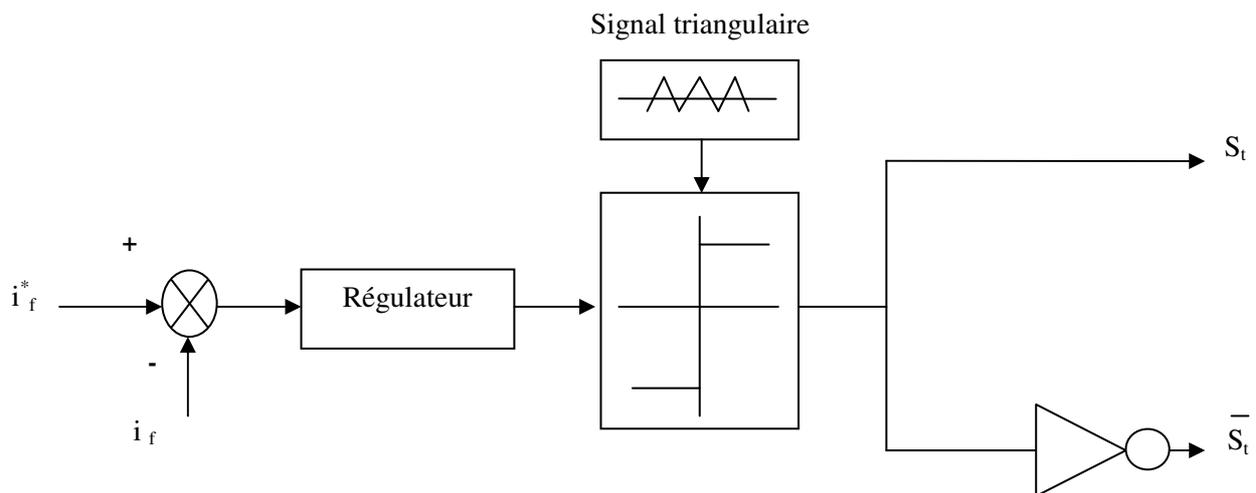


Figure (3.8) : Principe de commande du courant par M.L.I .

- **Résultats de simulation:**

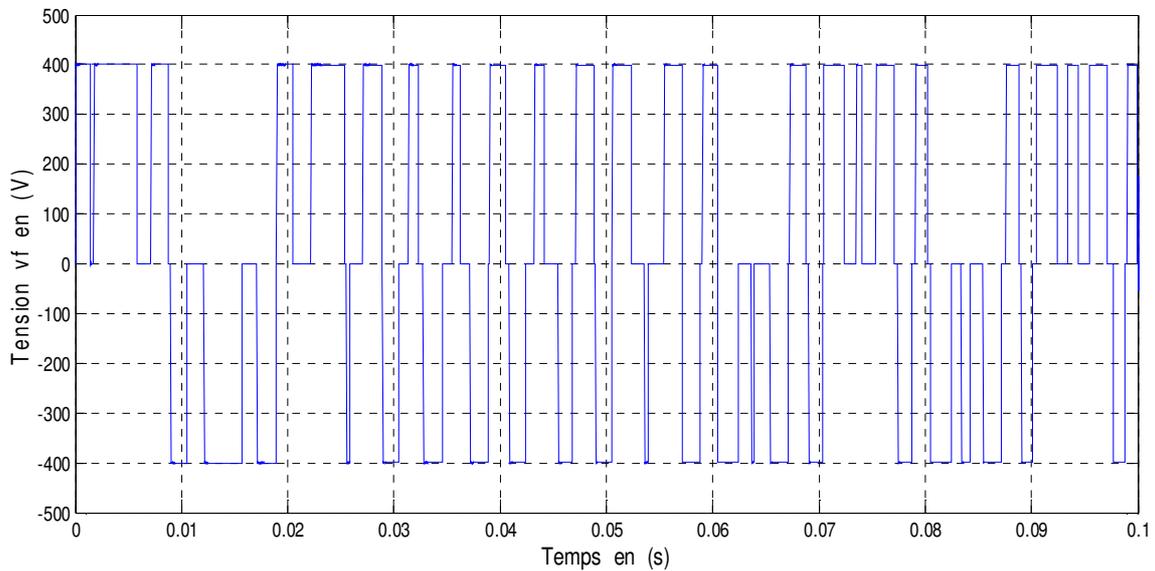


Figure (3.9) : Allure de la tension de l'onduleur à deux niveaux par la commande M.L.I.

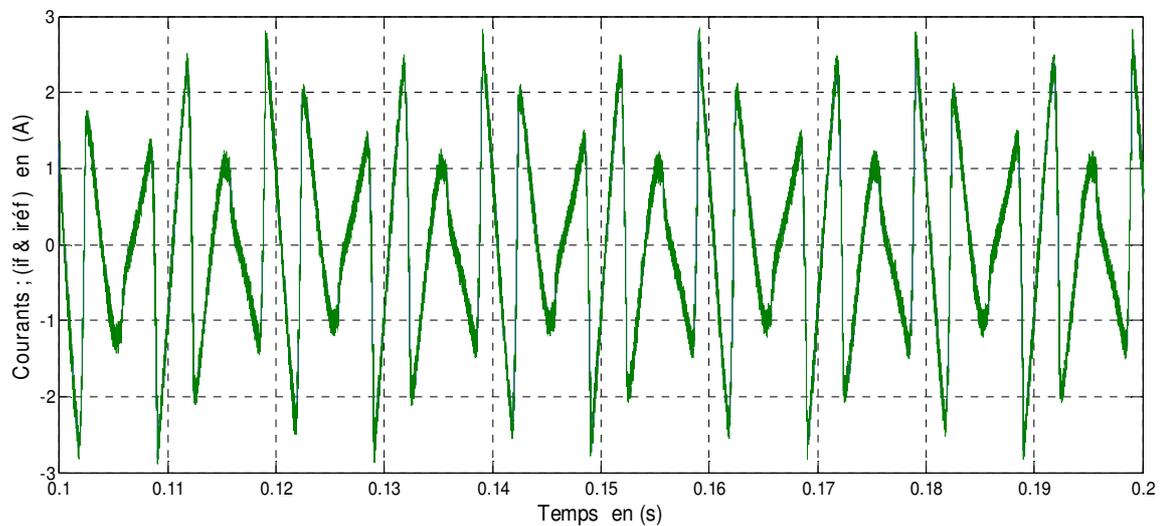


Figure (3.10) : Allure du courant de l'onduleur et le courant de référence par la commande M.L.I.

3.7 Commande du filtre actif parallèle: [5][6]

A l'heure actuelle, les chercheurs continuent toujours à améliorer les méthodes de commande des filtres actifs parallèles à fin d'obtenir des meilleurs résultats, tant du point de vue d'une meilleure extraction des perturbations, amélioration du régime dynamique, diminution du THD...etc, que de développement des nouvelles stratégies de commande pour une meilleure adaptation et robustesse de ces dernières face aux différents types des charges. Il existe principalement deux stratégies de commande pour supprimer les courants harmoniques du réseau dépendant du courant mesuré.

3.7.1 Méthode directe (dite aussi en boucle ouverte): [5][6]

Cette méthode est basée sur la mesure du courant de la charge polluante puis, de l'extraction des composantes harmoniques de ce courant. La figure (3.11) représente le schéma de la stratégie de commande directe. De cette manière, le filtre actif injecte les courants de compensation sans information sur les courants du réseau. Toutes les erreurs dans le système comme l'incertitude des paramètres, les erreurs de mesure ou de commande apparaîtront dans le réseau sous formes des harmoniques non-filtrés, l'avantage principal de cette méthode est la stabilité du système. Cependant, elle est connectée avec un algorithme étendu de commande et un grand nombre des capteurs.

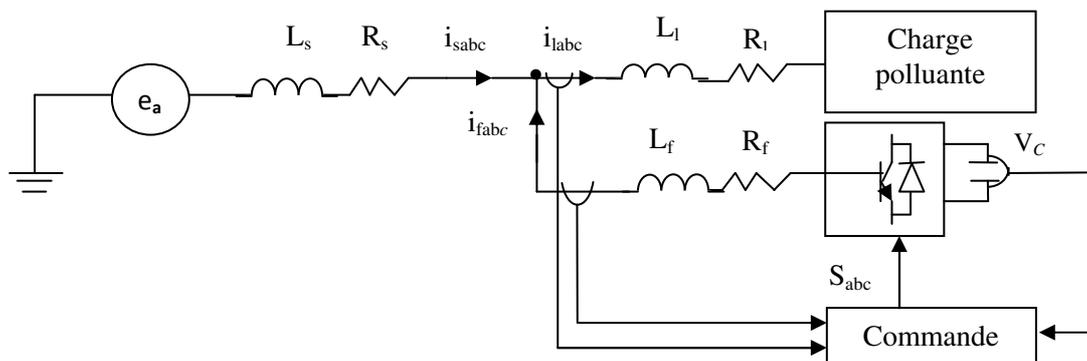


Figure (3.11): Schéma de la commande directe.

3.8 Méthode de commande directe basée sur la méthode de puissance instantanée:[5]

3.8.1 Commande directe dans le repère triphasé:

a Régulation de la tension continue V_{dc} :

La tension continue V_{dc} aux bornes du condensateur de stockage, doit être maintenue constante. La cause de variation de cette tension est l'échange de puissance active avec le réseau. Les fluctuations de cette tension doivent être faibles d'une part pour ne pas dépasser la limite en tension des semi-conducteurs constituant les interrupteurs et d'autre part pour ne pas dégrader les performances du filtre actif. Afin d'assurer le rôle de source de tension continue, une régulation de cette tension est nécessaire. Pour assurer la régulation de la tension continue, on peut utiliser un régulateur "P.I".

Si on néglige les pertes au niveau de l'onduleur et dans le filtre de sortie. La relation entre la puissance absorbée par le condensateur et la tension à ses bornes peut s'écrire sous la forme suivante :

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (3.39)$$

Appliquons la transformation de "Laplace" sur cette relation, nous obtenons :

$$P_{dc}(s) = \frac{1}{2} S C_{dc} V_{dc}^2(s) \quad (3.40)$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée par :

$$V_{dc}^2(s) = \frac{2P_{dc}(s)}{C_{dc} S} \quad (3.41)$$

A partir de la relation (3.42), et en tenant compte du régulateur (P.I), la boucle de régulation de tension continue peut être représentée par la figure (3.12). Le choix des paramètres k_{pdc} et k_{idc} aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal ,afin de ne pas nuire la dynamique du filtre actif.

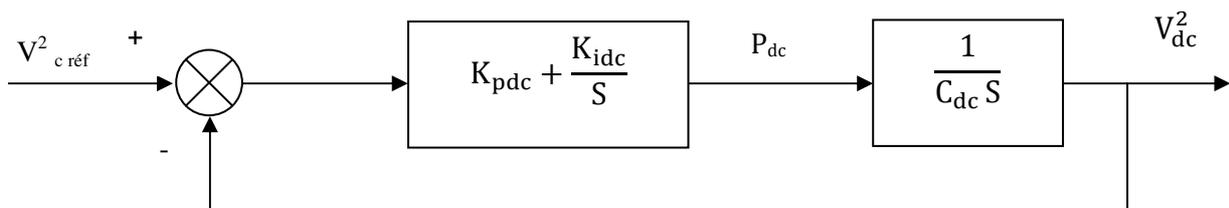


Figure (3.12) : Boucle de régulation de la tension continue.

A partir de la figure (3.12), la fonction de transfert représentant la régulation en boucle fermée de la tension continue est donnée par :

$$G_{BF} = \frac{\left(1 + \frac{K_{pdc}}{K_{idc}} s\right)}{s^2 + 2\frac{K_{pdc}}{C_{dc}}s + 2\frac{K_{idc}}{C_{dc}}} \quad (3.42)$$

Comparant cette équation avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, on trouve :

$$K_{idc} = \frac{1}{2} C_{dc} \omega_c^2 \quad \omega_c = 2\pi f_c \quad k_{pdc} = \varepsilon \sqrt{2C_{dc}k_{idc}}$$

On choisit la valeur de $\zeta = 0.707$ pour un bon coefficient d'amortissement du système. Pour un bon filtrage, on peut choisir la fréquence de coupure $f_c = 32$ HZ.

La commande directe par hystérésis est présentée par le schéma suivant :

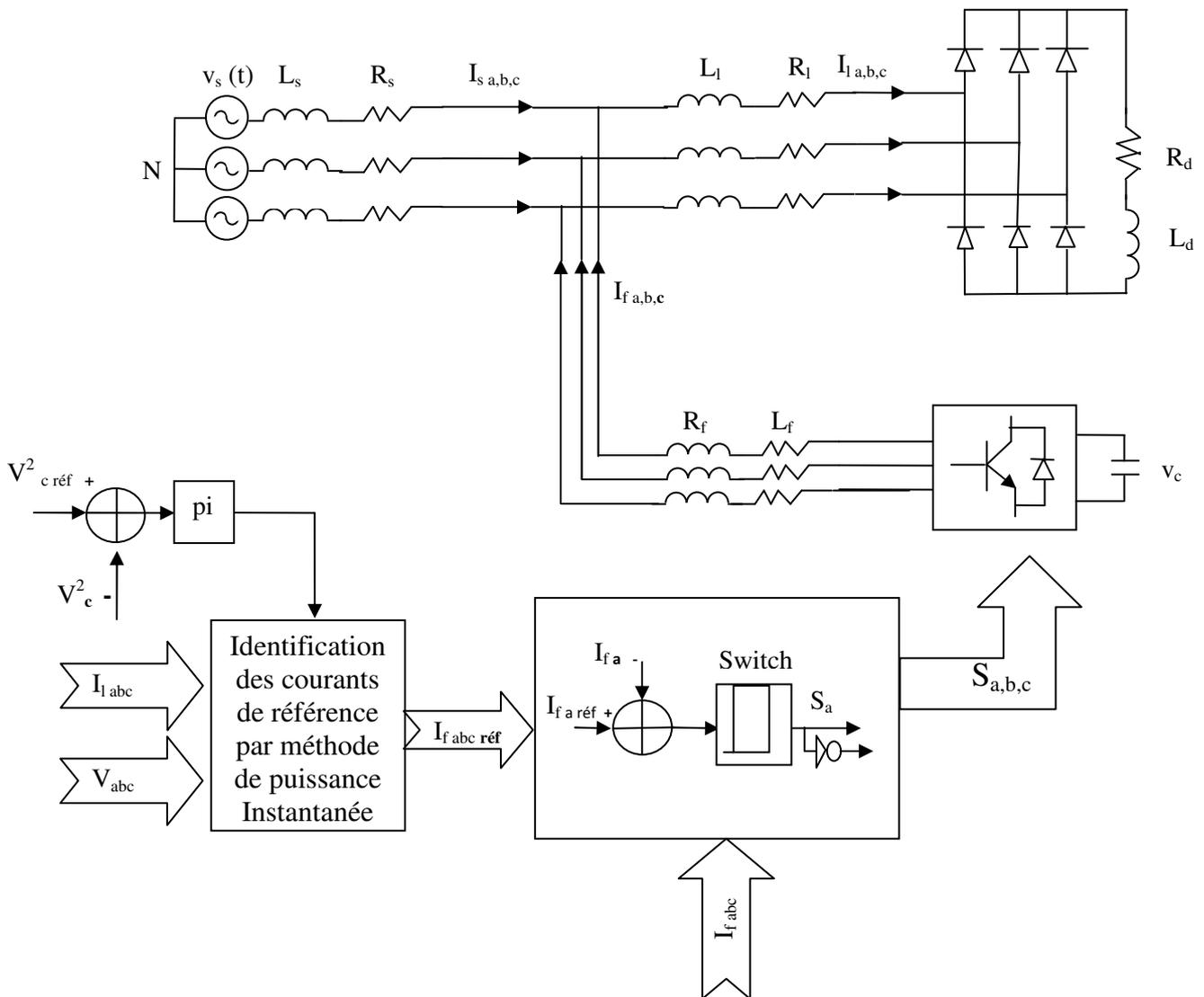


Figure (3.13): Commande directe par hystérésis dans le repère triphasé.

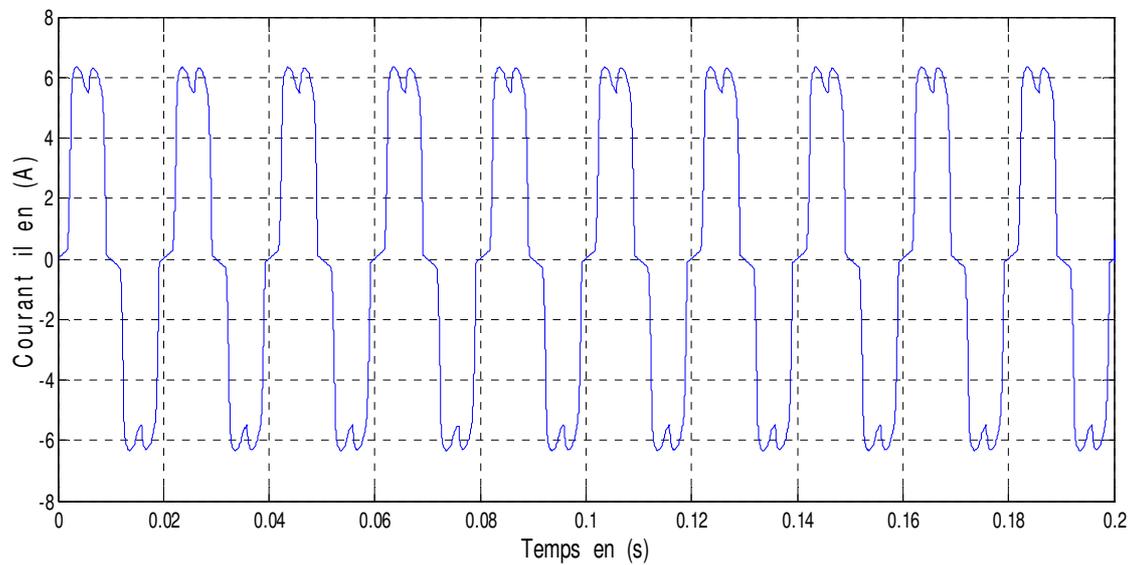
- **Résultats de simulation:**

Les résultats suivants représentent la réponse du filtre actif parallèle commandé par hystérésis, celle-ci basée sur la méthode de puissance instantanée dans le repère triphasé.

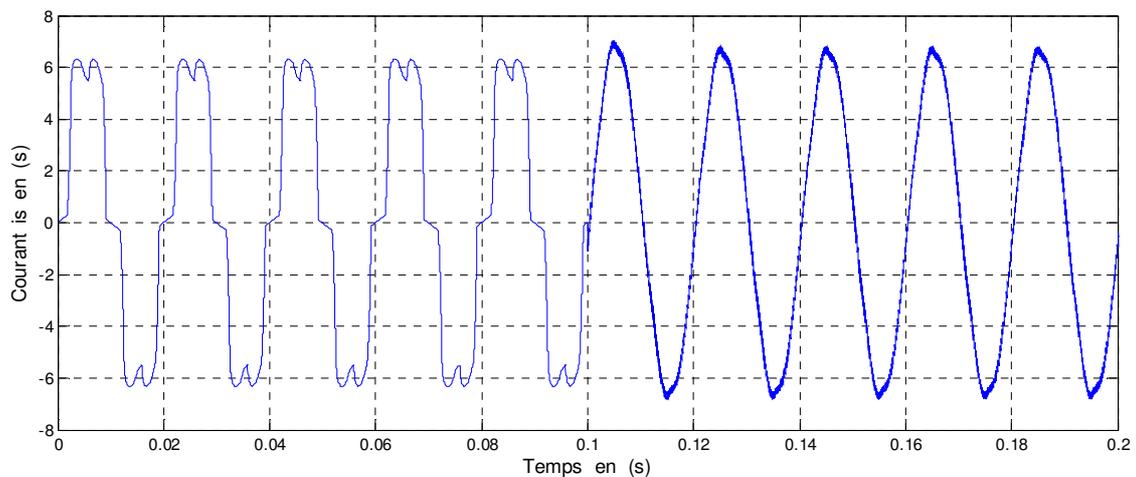
Les paramètres de ce système sont :

- Bande d'hystérésis $\Delta i = 0.02$ A;
- La valeur de référence de la tension continue est de 400V;
- Les courants présentés dans ce travail sont des courants de la phase (a) .

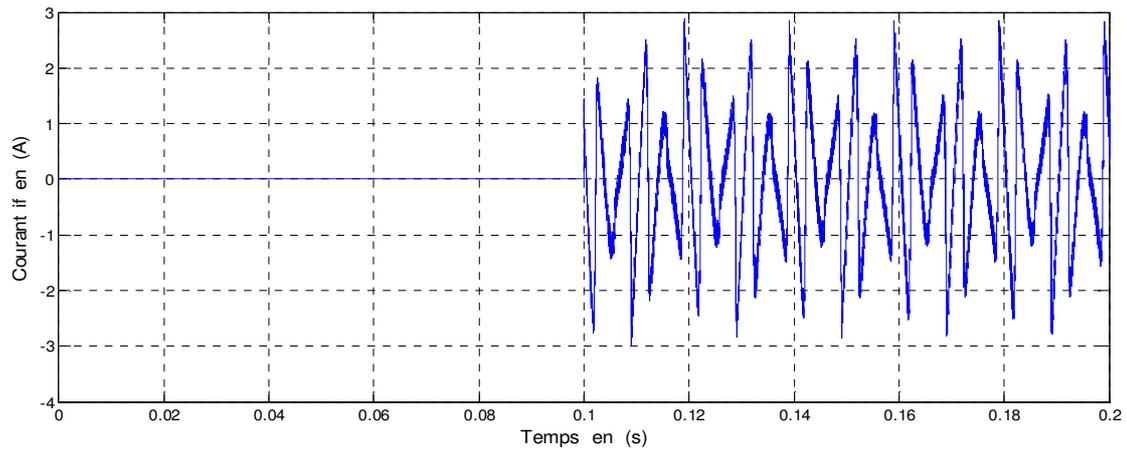
Pour étudier les performances du (F.A.P), les premiers essais de simulations se feront avec une charge fixe et à l'instant de ($t = 0.1$ s), on injecte le courant du filtre et on décèle ce qui suit;



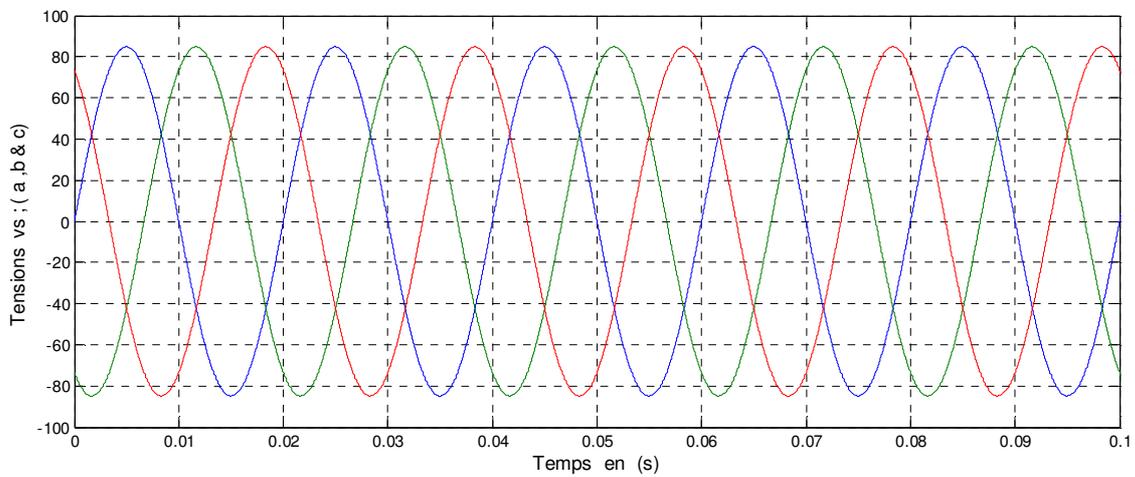
a)



b)



c)

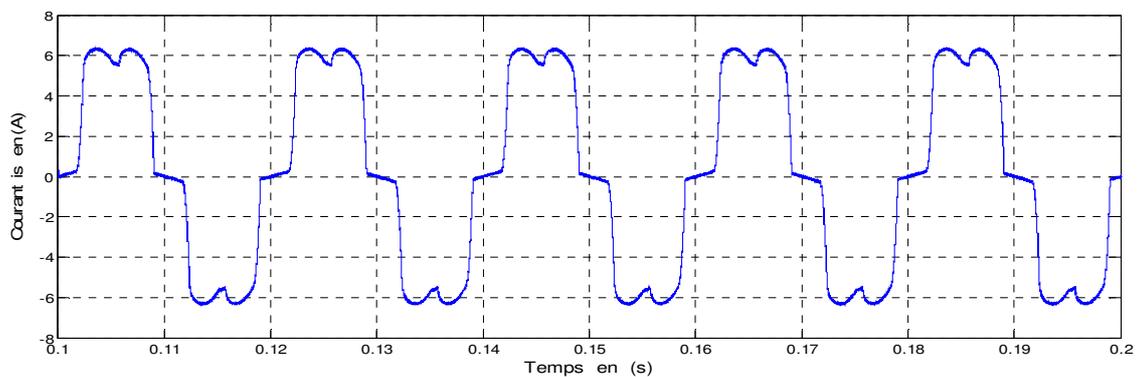


d)

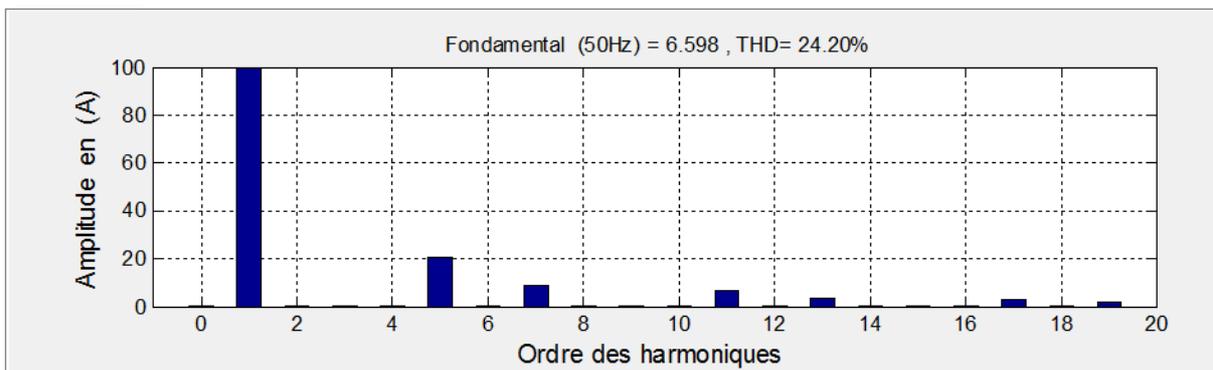
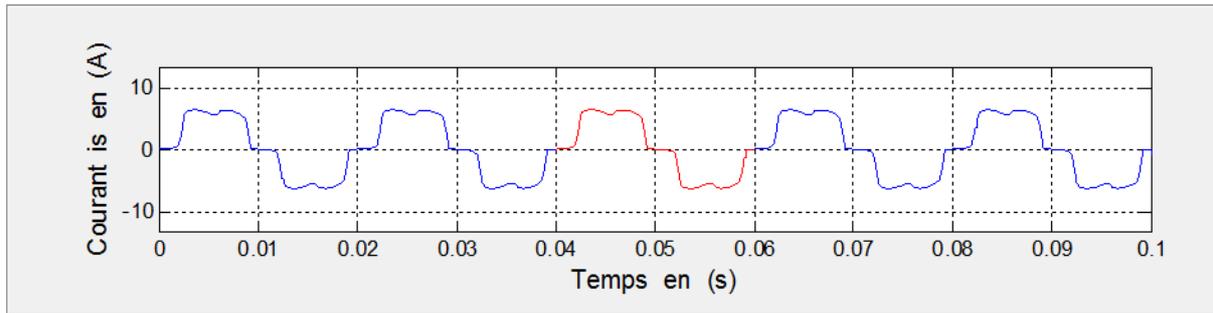
Figure (3.14) : Résultats de simulation du (F.A.P) avec une charge fixe.

a) Courant de la charge - b) Courant de la source - c) Courant injecté - d) Tensions du réseau.

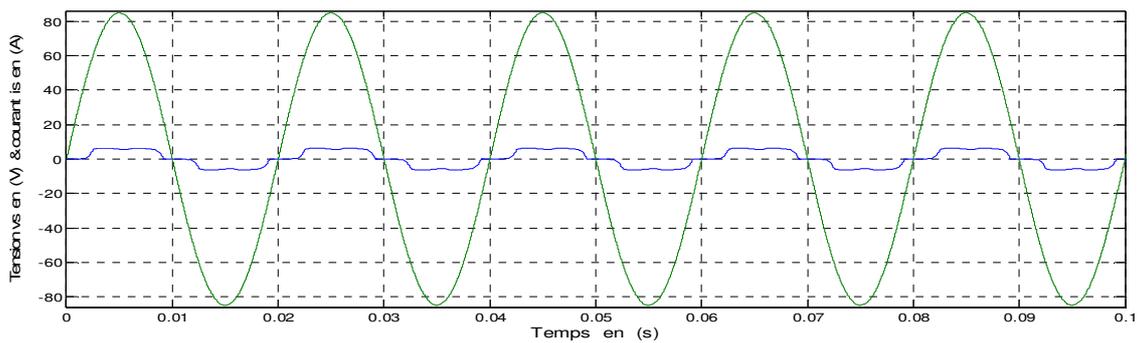
- **Avant filtrage:**



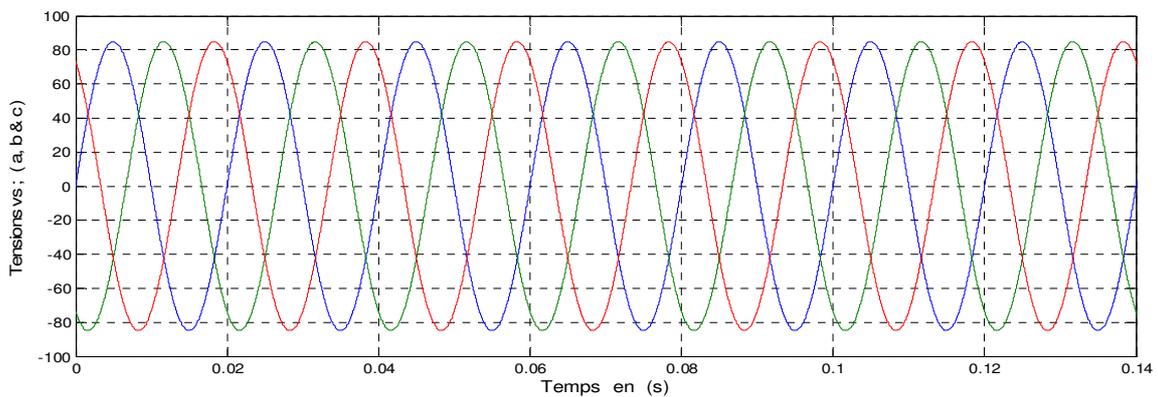
a)



b)



c)

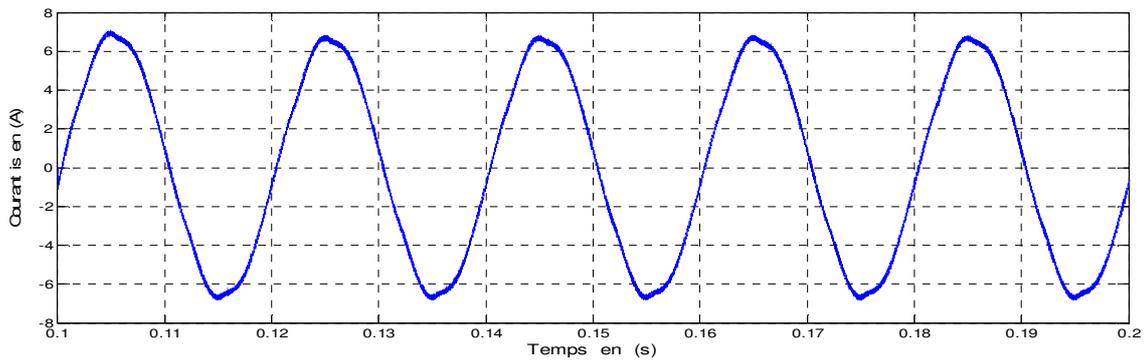


d)

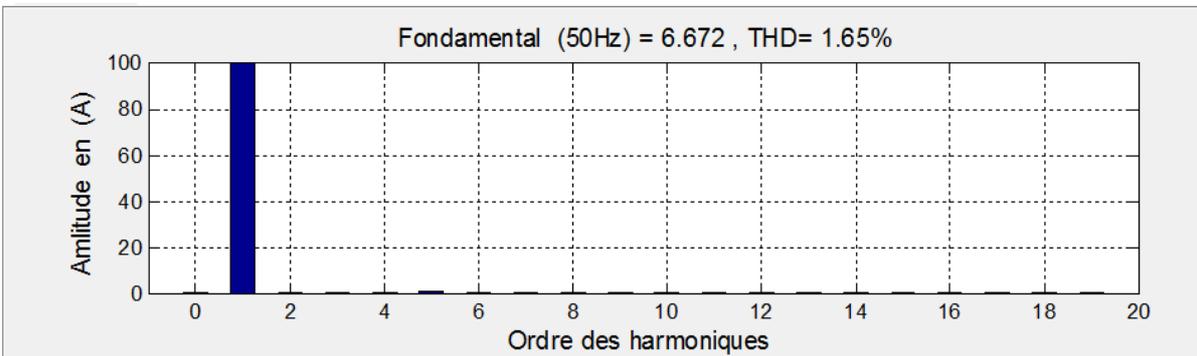
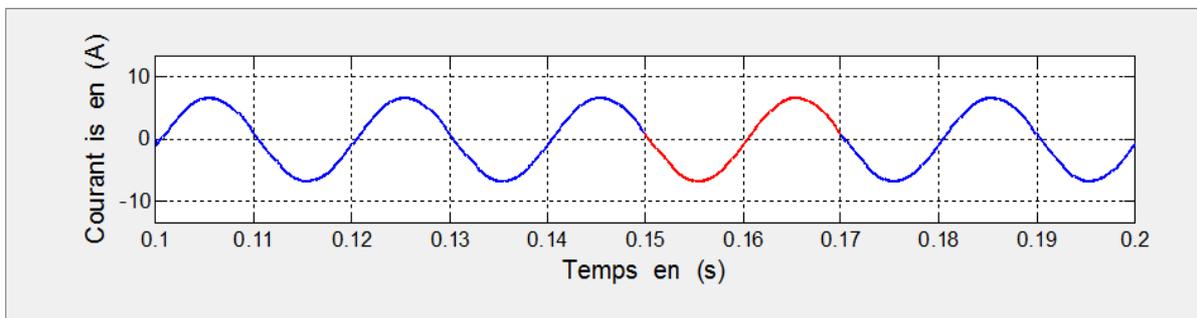
Figure (3.15) : Résultats de simulation du (F.A.P) avant filtrage.

a) Courant de la source - b) Spectre d'harmonique - c) Tension et courant de la source - d) Tensions du réseau.

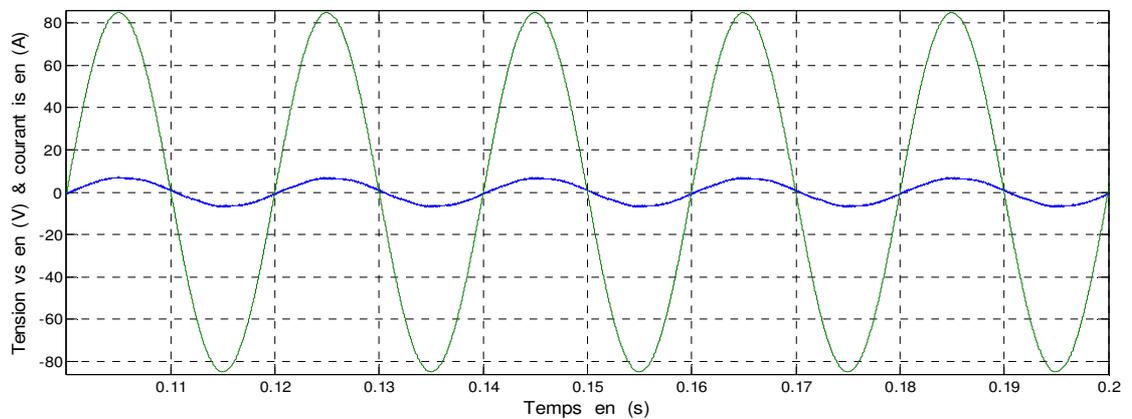
- **Après filtrage:**



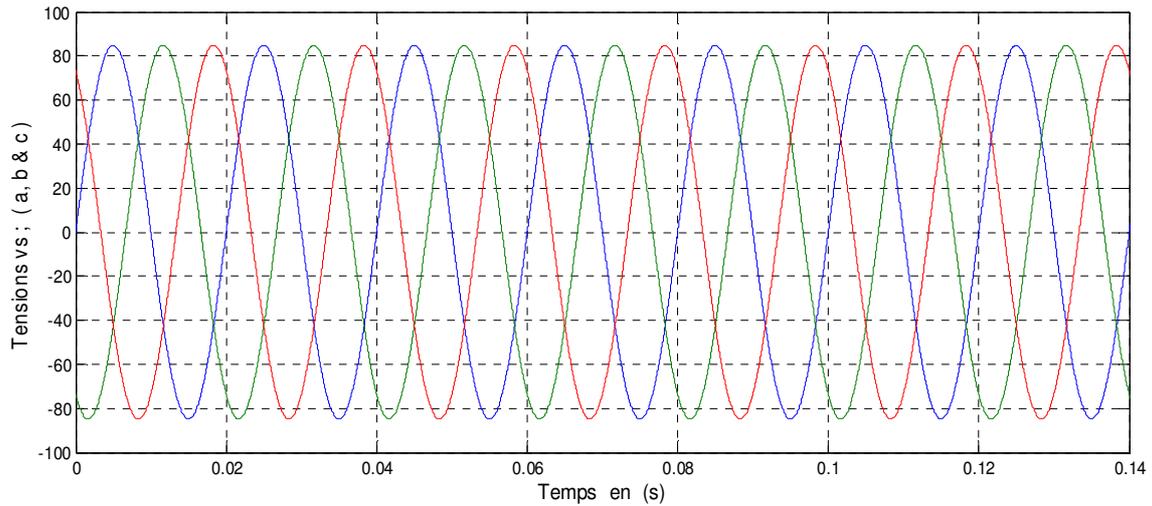
a)



b)



c)

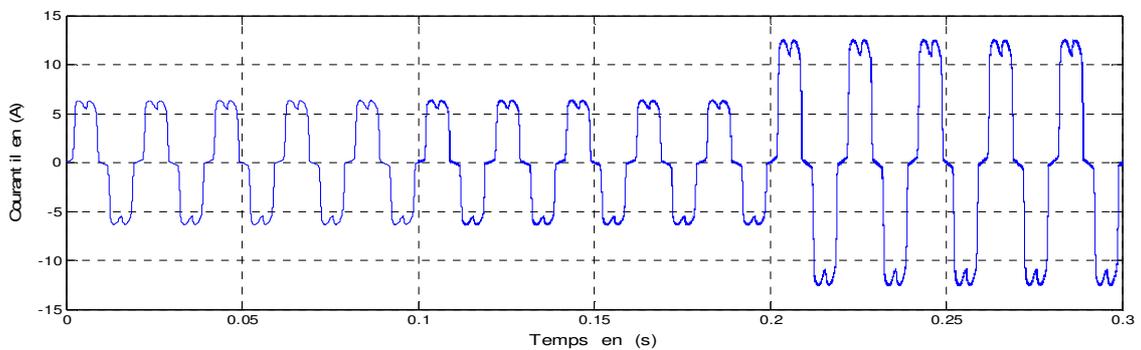


d)

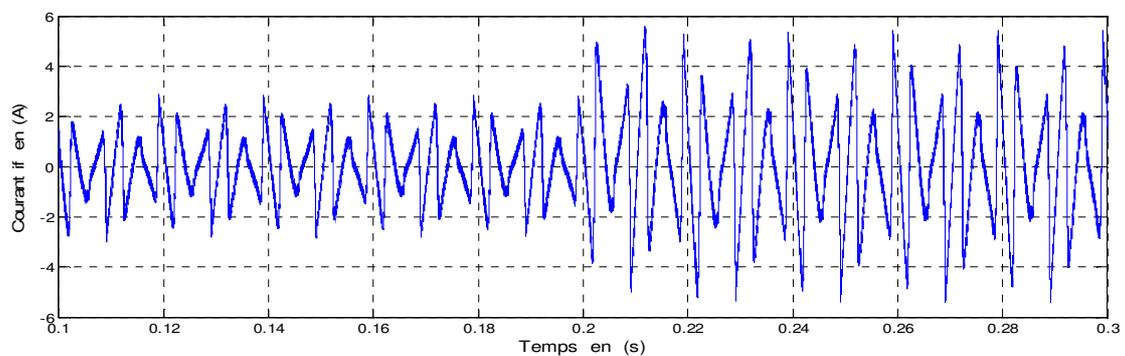
Figure (3.16) : Résultats de simulation du (F.A.P) après filtrage .

a) Courant de la source - b) Spectre d'harmonique - c) Tension et courant de la source - d) Tensions du réseau.

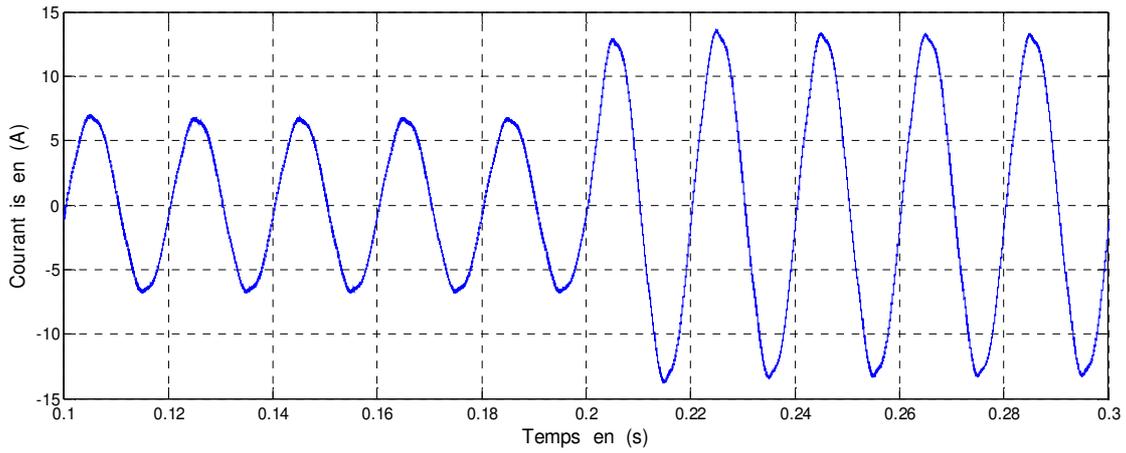
Pour nous permettre d'étudier les performances du (F.A.P), ainsi que de tester la robustesse de régulateur "P.I", on diminue la charge de R_{L1} à R_{L2} , à l'instant de; ($t = 0.2s$).



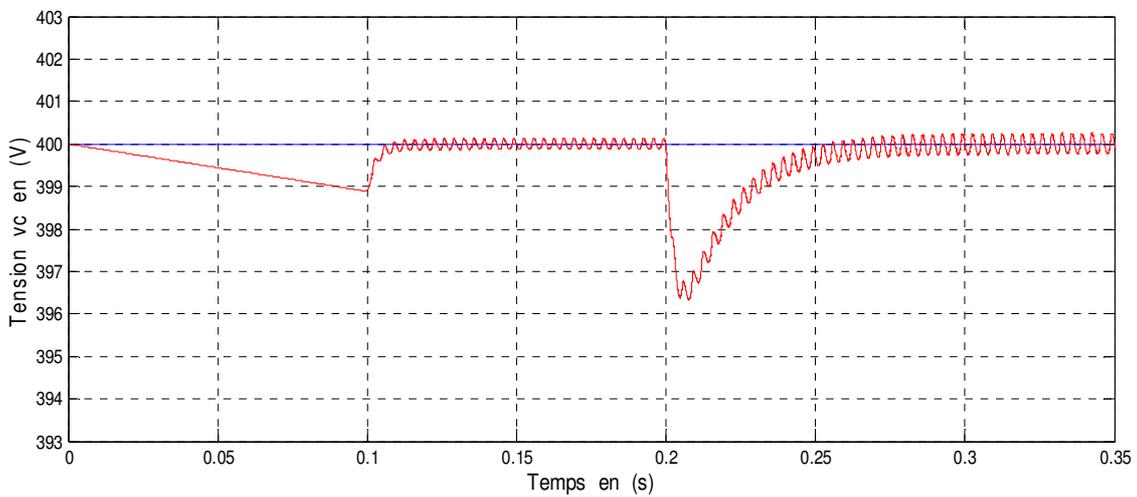
a)



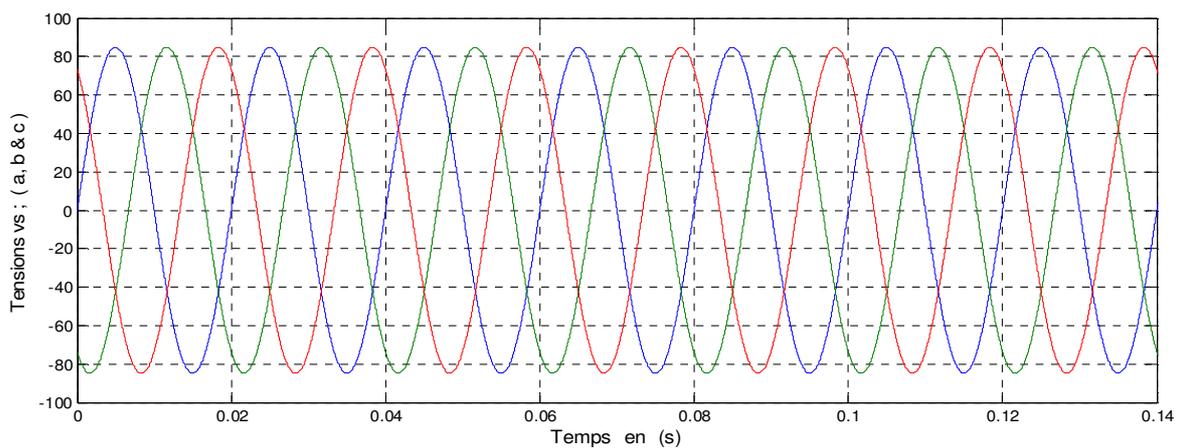
b)



c)



d)



e)

Figure (3.17) : Réponse du (F.A.P) dans le cas de diminution de la charge .

- a) Courant de la charge - b) Courant injecté - c) Courant de la source
 d) Tension aux bornes du condensateur - e) Tensions du réseau.

- **Interprétation des résultats:**

Les figures ;(3.14), (3.15), (3.16) et (3.17) présentent les résultats obtenus de l'extraction des courants harmoniques basé sur la méthode des puissances instantanées. Les figures; (3.15. a, b, c) montrent : avant d'injecter les courants d'harmoniques dans le réseau, la forme du courant de réseau est la même de la charge avec THD de 24,20%, le courant de réseau prennent la forme sinusoïdale quand on injecte les courants d'harmoniques avec THD de 1.65 % ,figure;(3.16.a,b,c) et les tensions du réseau sont équilibrées avant et après le filtrage, figure ;(3.15.d & 3.16. d).

Quand la résistance de la charge change de R_{L1} à R_{L2} , les figures;(3.17.a,b,c) montrent l'appelle du courant . La tension aux bornes du condensateur suit parfaitement sa référence lors de changement de la résistance et ce à partir de (0.28 s), comme illustrée dans la figure; (3.17.d) .Les tensions de réseau sont équilibrées avant et après la variation de la charge, les figures ;(314.d & 317.e).

A partir des figures; (3.15.a,b,c) et (3.16.a,b,c), nous remarquons que le filtre a corrigé le facteur de puissance ,la tension et le courant de la source sont en phase, figure; (3.16.c), notamment une bonne régulation du courant du filtre actif par la méthode de commande hystérésis.

Enfin, on conclut que cet type de commande présente d'un inconvénient irrémédiable de variations aléatoires de la fréquence de commutation des interrupteurs, pour cela on propose la régulation du courant par "Régulateur P.I".

b Contrôle du courant du filtre par un correcteur "P.I":

Le correcteur proportionnel-intégral est le correcteur le plus classique utilisé pour le contrôle du courant à cause de sa simplicité. Le schéma simplifié de la boucle de régulation du courant par ce régulateur est illustré par la figure (3.18).

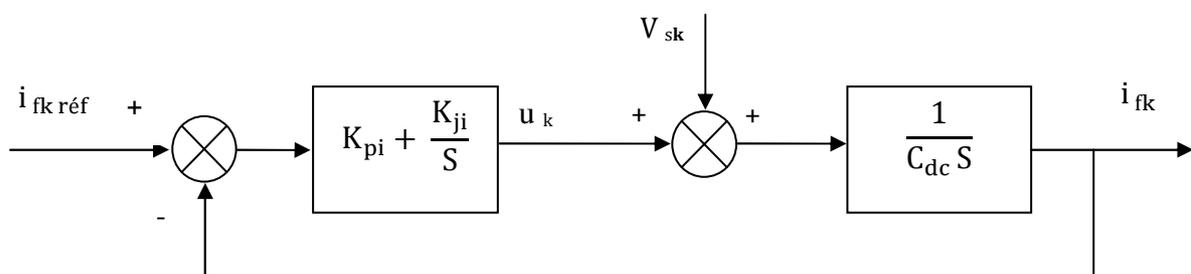


Figure (3.18) : Boucle de régulation du courant.

Pour une bonne réponse dynamique du système, on choisit la valeur de $\xi = 0.707$. Pour un rejet maximal d'harmoniques dus à la commutation, il faut que la pulsation de coupure soit éloignée de la pulsation de commutation du la M.L.I . Les valeurs des constantes du régulateur sont données par :

$$k_{pi} = 2\xi\omega_{cp}L_f - R_f \tag{3.43}$$

$$K_{ji} = L_f\omega_{cp}^2$$

avec ; $\omega_{cp} = 2\pi f_{cp}$

Le signal de sortie du régulateur est sommé à une image de la tension du réseau de façon à compenser totalement l'effet de cette tension sur le comportement statique de la boucle de courant .

- Le schéma de la commande directe dans le repère triphasé est de :

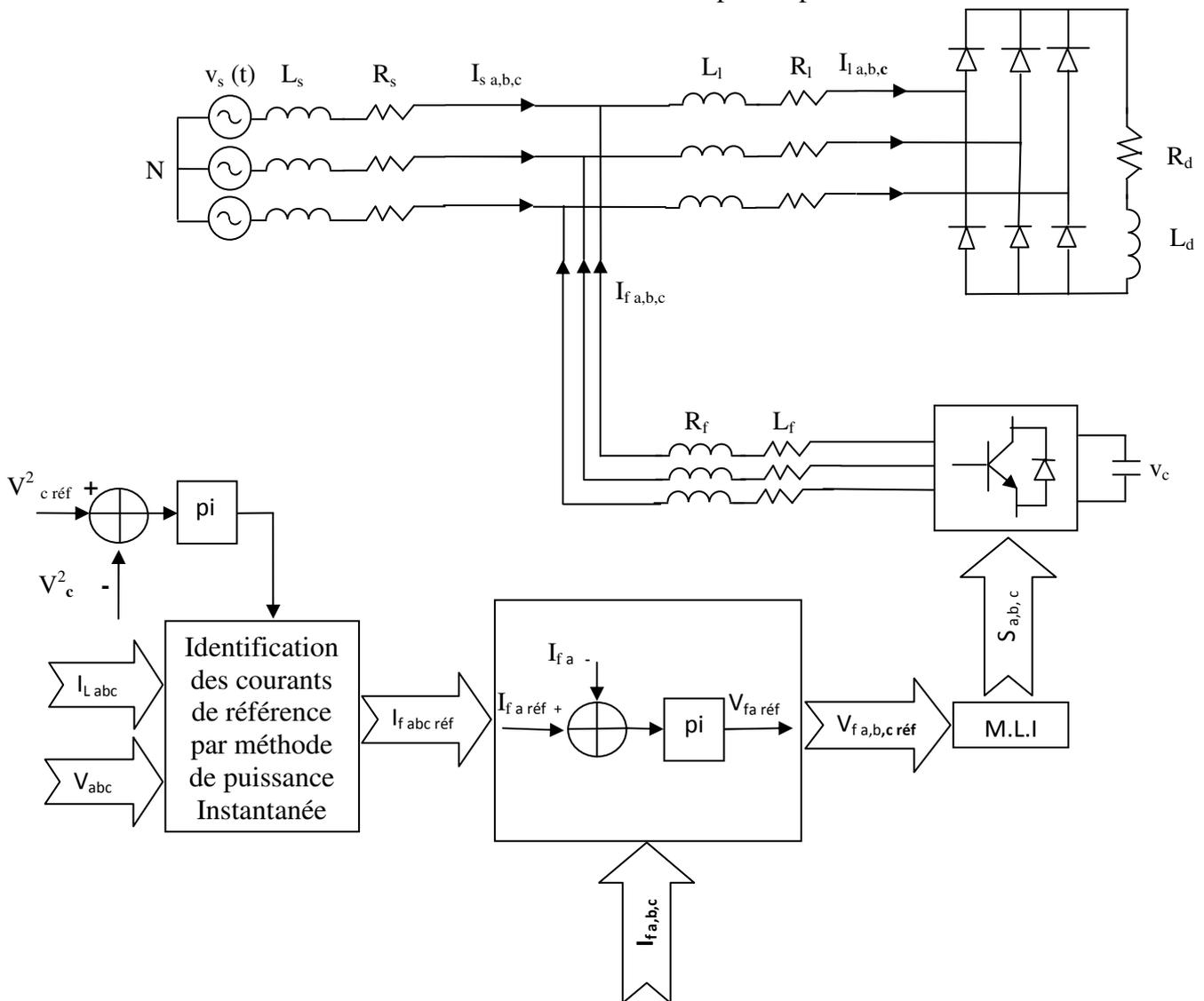


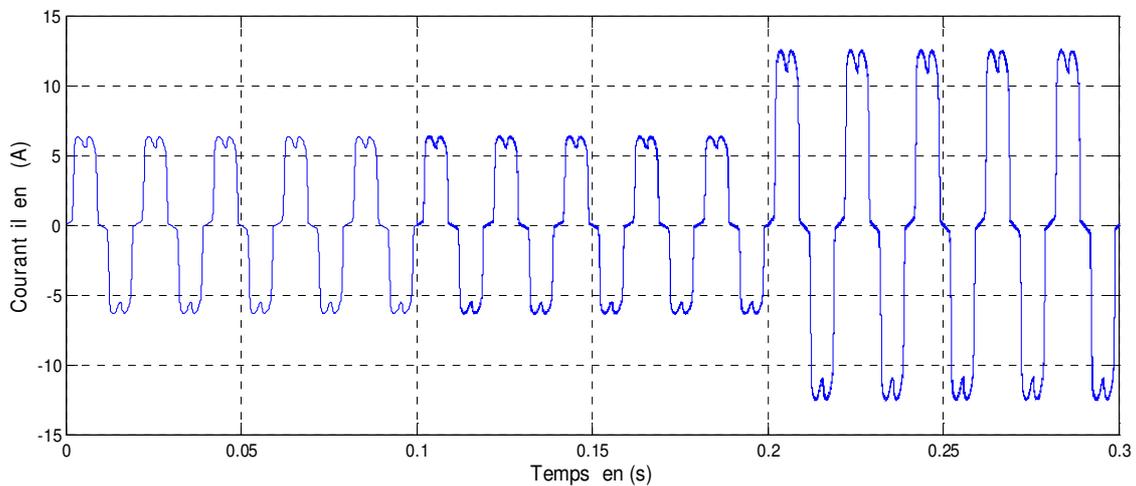
Figure (3.19) : Commande directe par "P.I" dans le repère triphasé.

- **Résultats de simulation:**

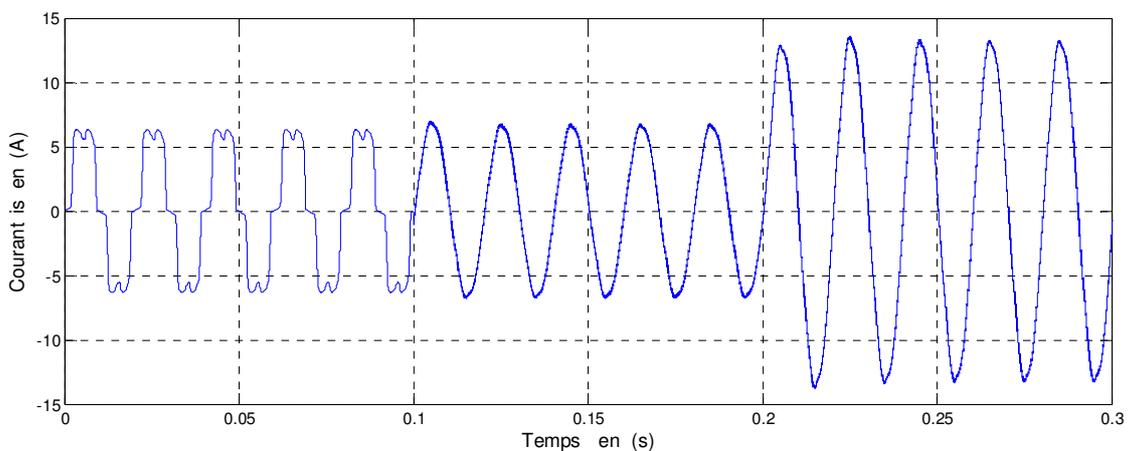
Les résultats suivants représentent la réponse du filtre actif commandée par régulateur "P.I", dans le repère triphasé basé sur la méthode de puissance active instantanée, lors d'une variation de résistance de la charge polluante au moment de $t=0.2$ s, pour tester la robustesse de régulateur "P.I" .

Les paramètres du système sont les suivants :

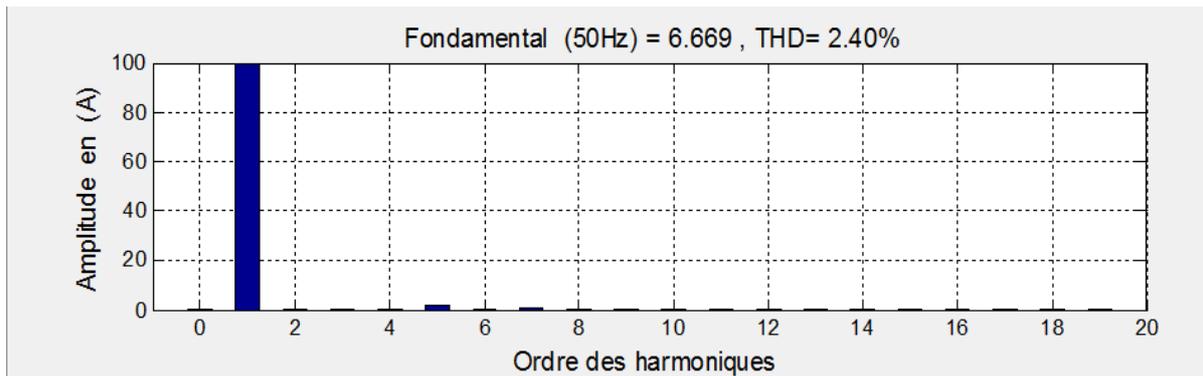
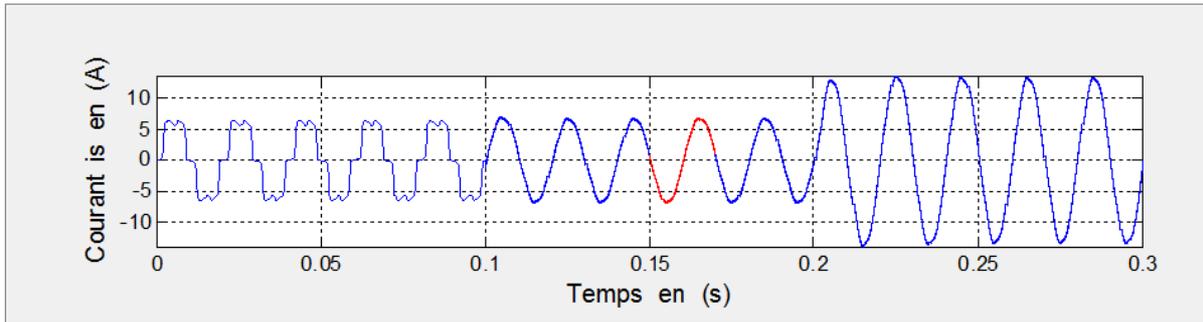
- La fréquence de coupure des régulateurs de courant est $f_{ci} = 6000\text{Hz}$;
- La fréquence de commutation est fixée à 12.5 kHz ;
- La valeur de référence de la tension continue est égale à 400V .



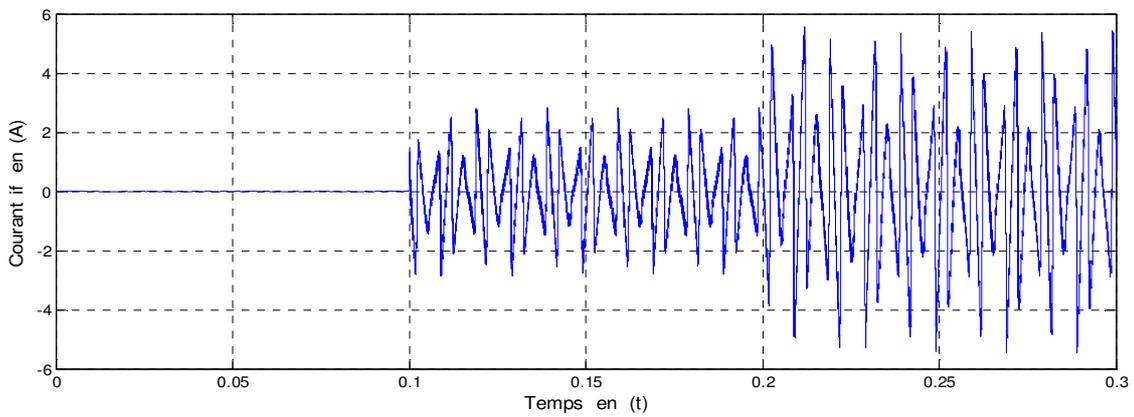
a)



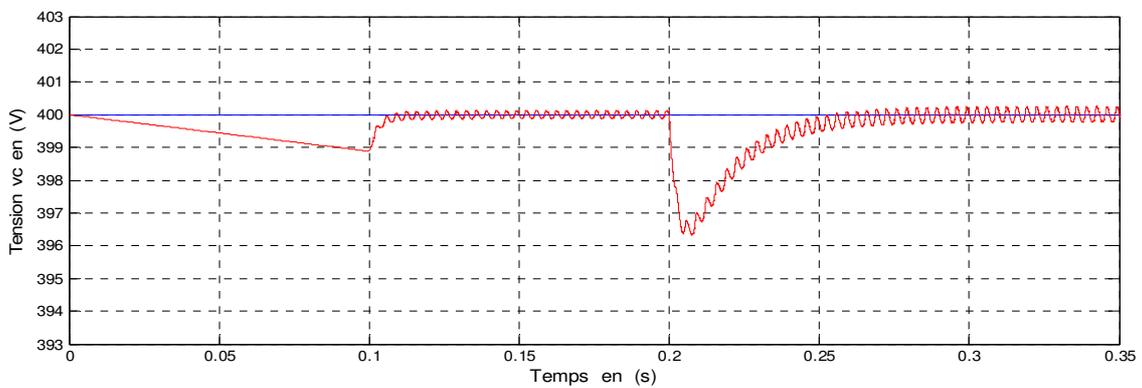
b)



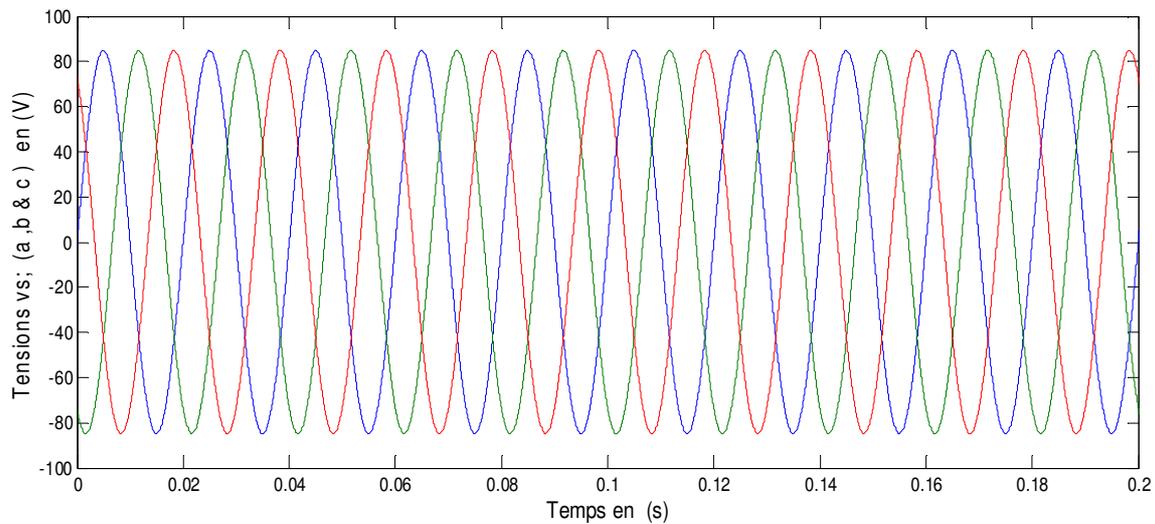
c)



d)



e)



f)

Figure (3.20) : Réponse du F.A.P cas de perturbation.

a) Courant de la charge - b) Courant de la source - c) Spectre d'harmonique -d) Courant injecté - e)Tension aux bornes du condensateur
f) tensions du réseau.

- **Interprétations des résultats:**

Les simulations traitées dans cette partie, auront pour le but de tester la performance des régulateurs "P.I" des courants et la tension aux bornes du condensateur. Les figures; (3.20.a) et (3.20.d) présentent le courant de la charge et le courant injecté. L'objectif principal de la commande proposée, consiste à maintenir la tension aux bornes du condensateur à sa valeur de référence , d'une manière parfaite, comme présente la figure; (3.20.e). Sur les figures; (3.20.b et c), nous présentons le courant de la phase (a) et son spectre d'harmoniques, on remarque que la forme de ce courant est sinusoïdale, après l'injection du courant d'harmoniques, soit un THD de 2.40%, ce résultat montre la performance des régulateurs "P.I".

3.9 Méthode de commande directe basée sur le référentiel synchrone:[5]

3.9.1 Commande directe dans le repère triphasé:

- Le schéma de la commande directe dans le repère triphasé est :

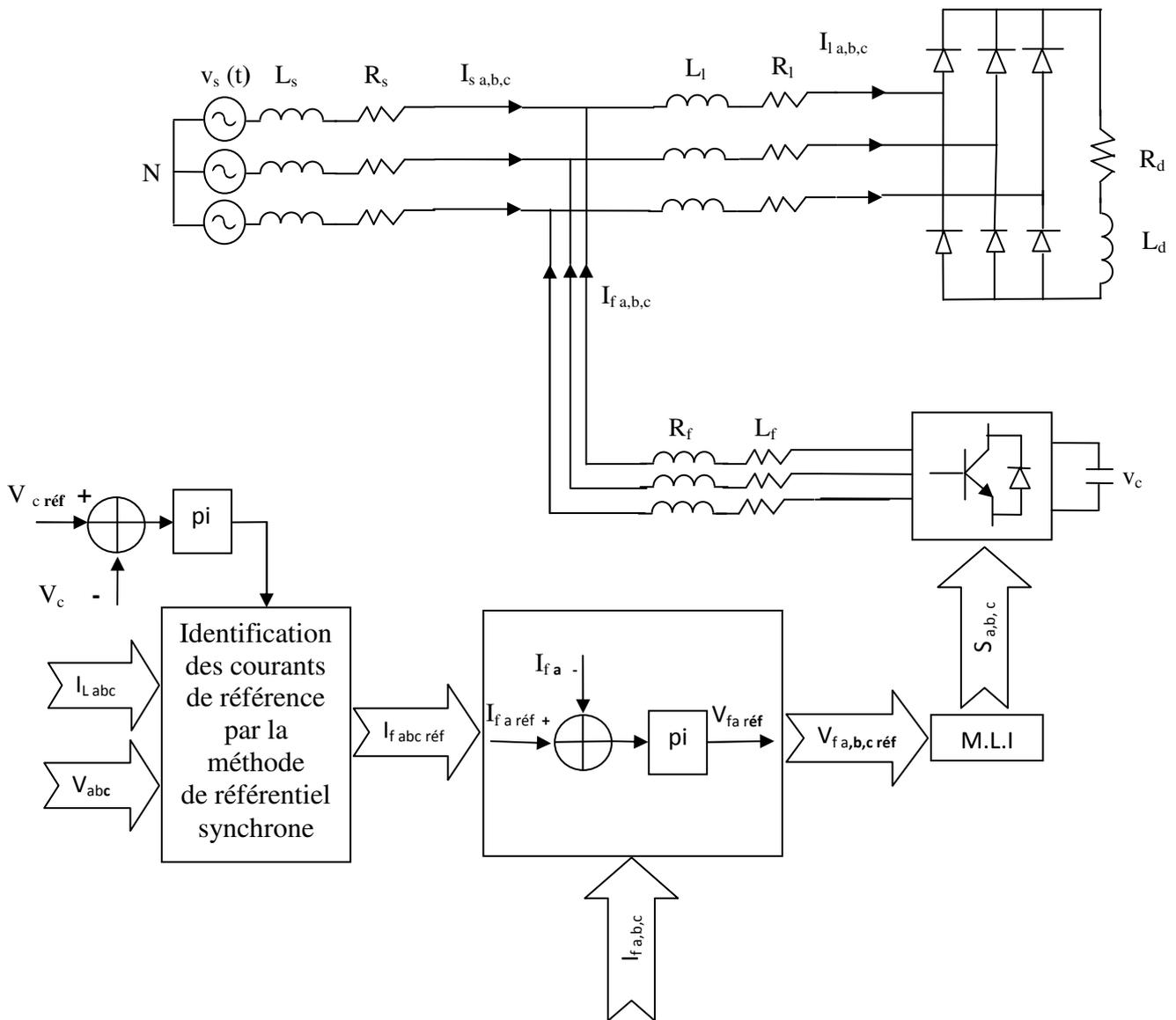


Figure (3.21) : Commande directe par des régulateurs "P.I" dans le repère triphasé.

a Régulateur de la tension continue:

Nous avons utilisé un régulateur proportionnel intégral "P.I", pour que la tension moyenne aux bornes du condensateur soit maintenue à une valeur quasi-constante.

La valeur de la tension mesurée V_c est comparée à sa référence $V_{c\text{ref}}$. Le signal d'erreur appliqué à l'entrée du régulateur "P.I".

b Détermination des paramètres du régulateur "P.I":

La relation suivante donne l'expression générale du régulateur "P.I" utilisée dans notre étude:

$$K(S) = K_p + \frac{K_I}{S} \quad (3.44)$$

avec:

- K_p : Gain proportionnel du régulateur,
- K_I : Gain intégral du régulateur.

La figure ; (3.22) présente le schéma de la régulation de V_c . Le bloc $G(s)$ est défini par :

$$G(S) = \frac{1}{cS}$$

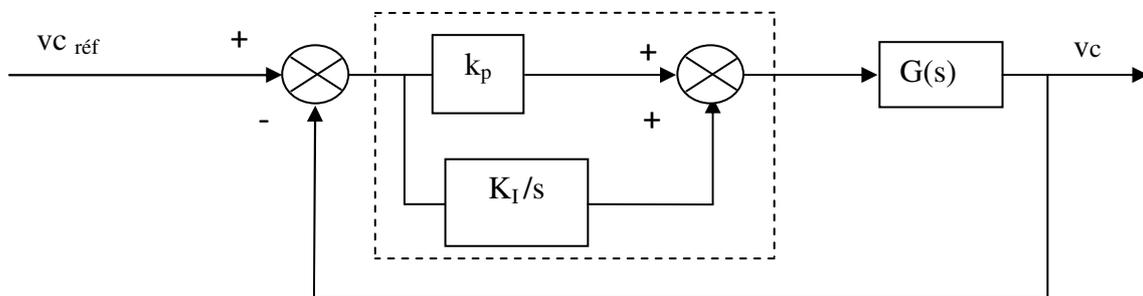


Figure (3.22) : Schéma de la régulation de V_c par le régulateur "P.I".

La fonction de transfert en boucle fermée est alors donnée par :

$$F(S) = \frac{\left(1 + \frac{K_p}{K_I} S\right) \frac{K_I}{C}}{S^2 + \frac{K_p}{C} S + \frac{K_I}{C}} \quad (3.45)$$

L'expression générale d'une fonction de transfert du second ordre est :

$$F(S) = \frac{\left(1 + \frac{K_p}{K_I} S\right) \omega_c^2}{S^2 + 2 \xi_c \omega_c S + \omega_c^2} \quad (3.46)$$

Après identification avec l'équation (3.45), on obtient :

$$K_I = \omega_c^2 C \quad \text{et} \quad K_p = 2 \xi_c \sqrt{K_I C}$$

Nous avons choisi:

$$\omega_c = 2\pi \times 18 \text{ rad/s} \quad \text{et} \quad \xi_c = 0,6.$$

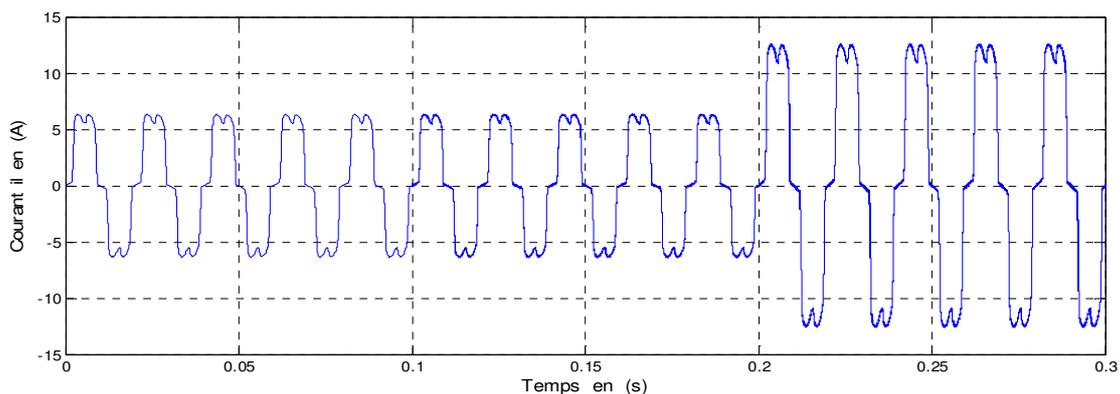
- **Résultats de simulation:**

Les résultats suivants représentent la réponse du filtre actif, commandé par régulateurs "P.I", dans le repère triphasé, ce dernier est basé sur la méthode de référentiel synchrone.

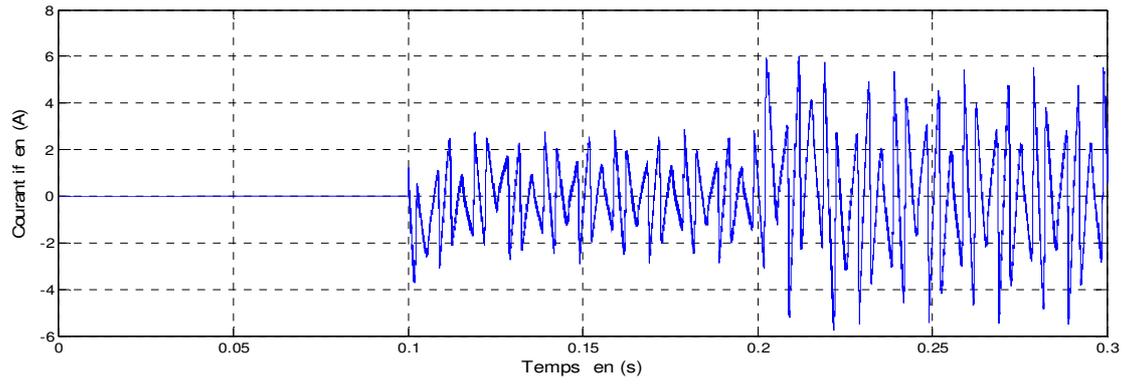
A l'instant de $t = 0.2$ s, on procédera à la variation de la résistance de la charge polluante.

Les paramètres du système sont :

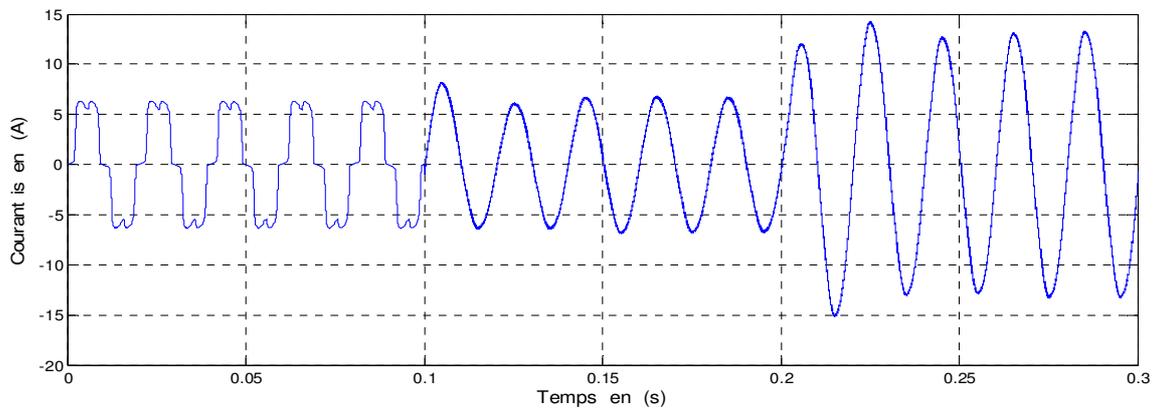
- La fréquence du coupure des régulateurs de courant f_{ci} : 6000Hz,
- La fréquence de commutation est fixée à; 12.5 kHz ,
- La valeur de référence de la tension continue est de; 400V.



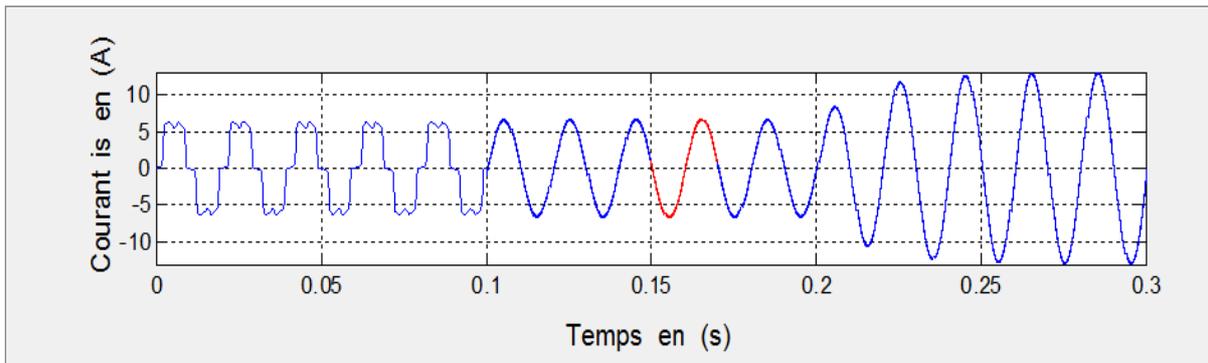
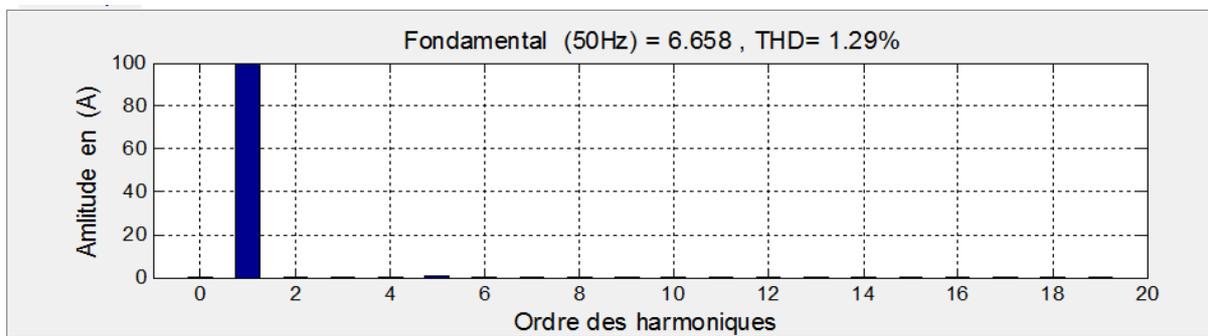
a)



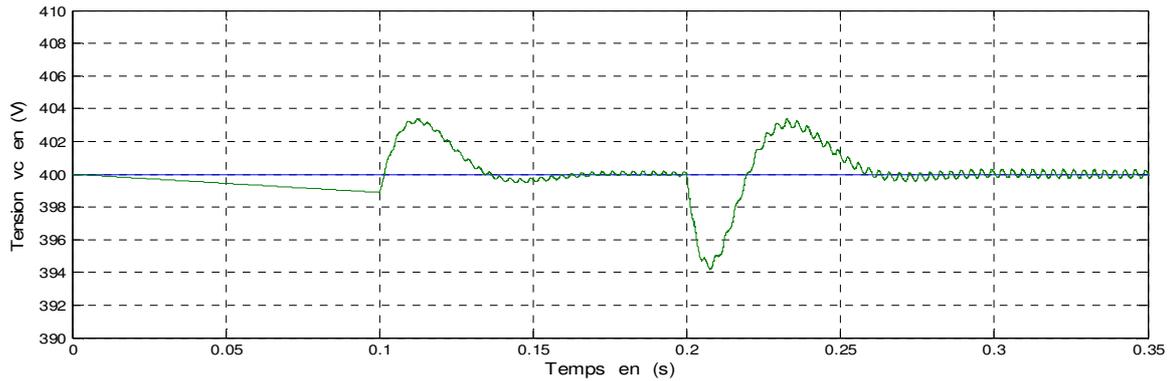
b)



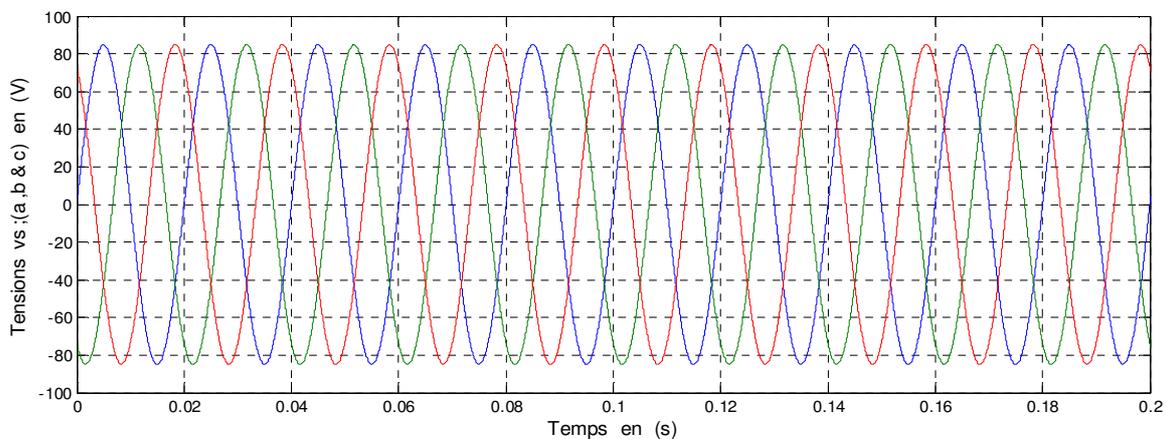
c)



d)



e)



f)

Figure (3.23) : Réponse du F.A.P cas de perturbation dans le repère triphasé.

a) Courant de la charge - b) Courant injecté - c) Courant de la source - d) Spectre d'harmonique - e) Tension aux bornes du condensateur - f) Tensions du réseau.

- **Interprétations des résultats:**

Les figures; (3.23.a , b) présentent le courant de charge et le courant injecté ,le courant de la source et son analyse spectrale illustrés par les figures; (3.23. c, d) . L'analyse spectrale montre que l'implantation de la méthode de référentiel synchrone a une amélioration remarquable en terme de THD, soit une valeur de 1.29% ,si on fera la comparaison entre les deux méthodes d'extraction harmoniques à savoir ;(puissance instantanée et référentiel synchrone) , on découvre un dépassement des tensions aux bornes du condensateur V_c , figures ; (3.20. e) et (3.23.e) ,notamment le temps de réponse est long par rapport la méthode de référentiel synchrone ainsi que, elle donne une valeur d'ondulation réduite, ce phénomène explique la diminution de THD de; (2,40% à 1.29%), les tensions de réseau sont équilibrées comme montre la figure; (3.23.f).

- Le schéma de la commande directe dans le repère triphasé est :

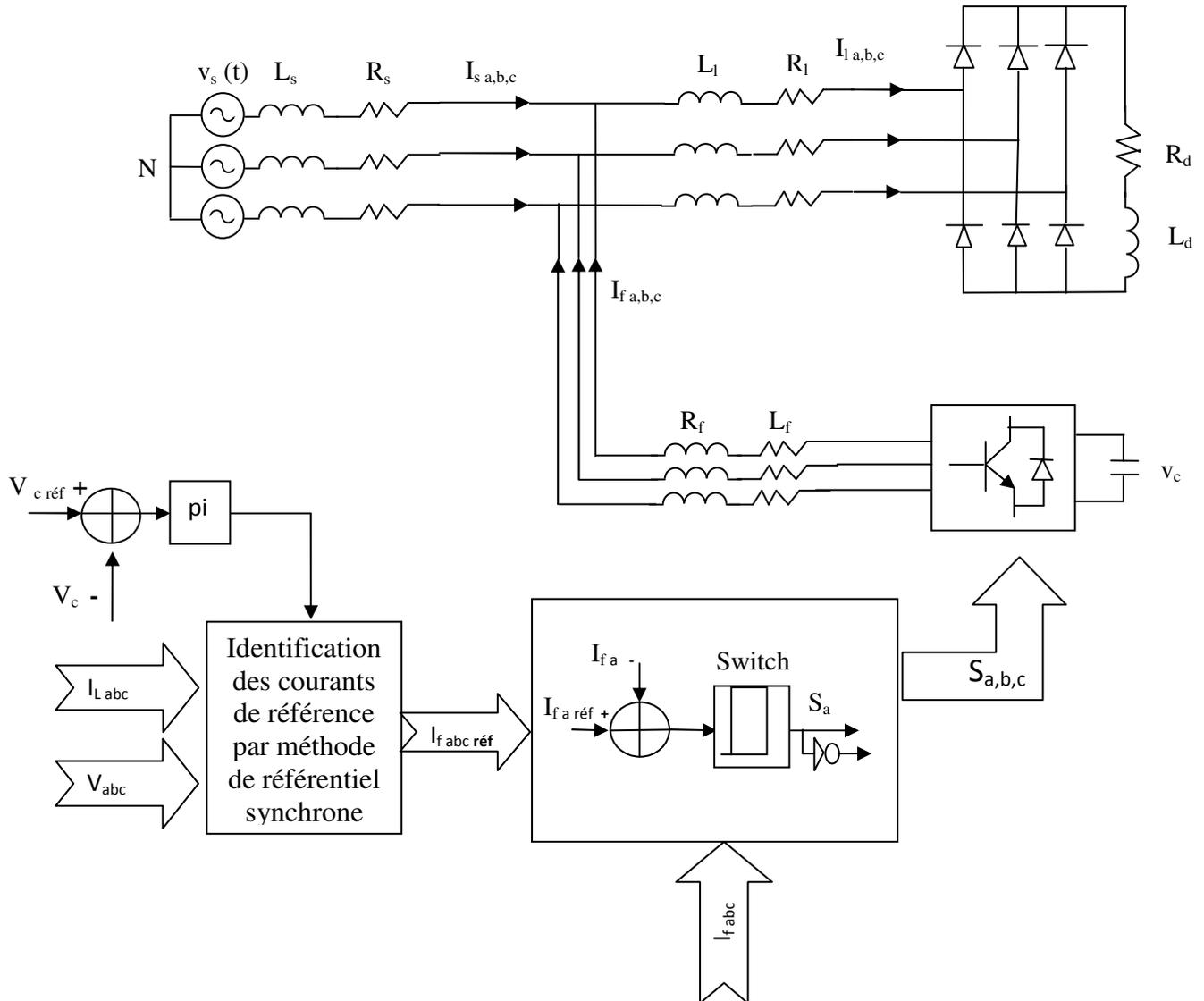


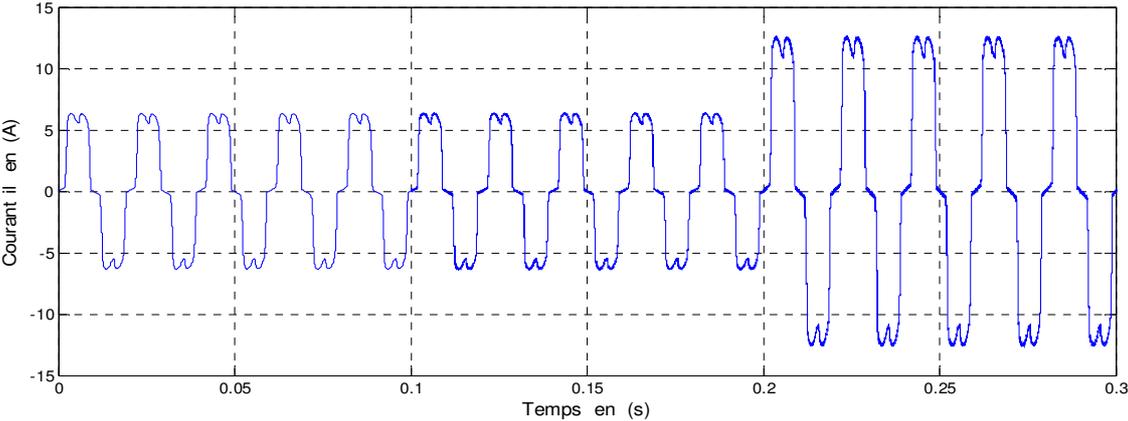
Figure (3.24): Commande directe par hystérésis dans le repère triphasé.

- Résultats de simulation:**

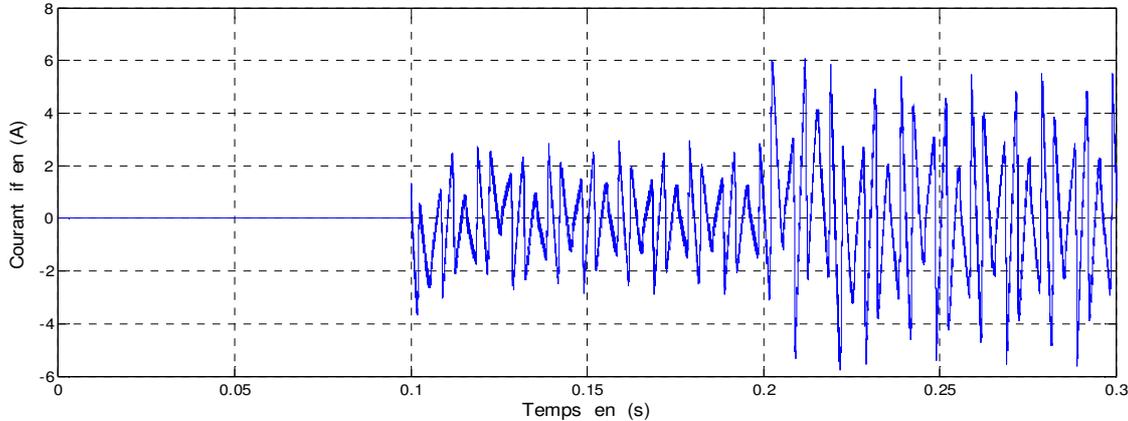
Les résultats suivants représentent la réponse de filtre actif commandé par des régulateurs "P.I" ,celui basé sur la méthode du référentiel synchrone dans le repère triphasé, à l'instant de $t= 0.2 \text{ s}$, on varier la résistance de la charge polluante.

Les paramètres du système sont comme suit :

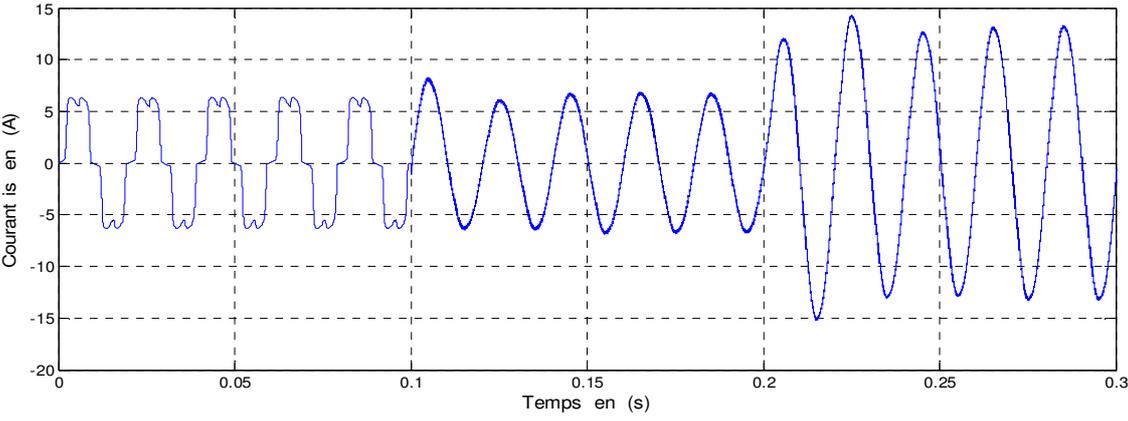
- Bande d'hystérésis $\Delta i= 0.02 \text{ A}$;
- La valeur de référence de la tension continue est de 400V;
- Les courants présentés dans ce travail sont des courants de la phase (a) .



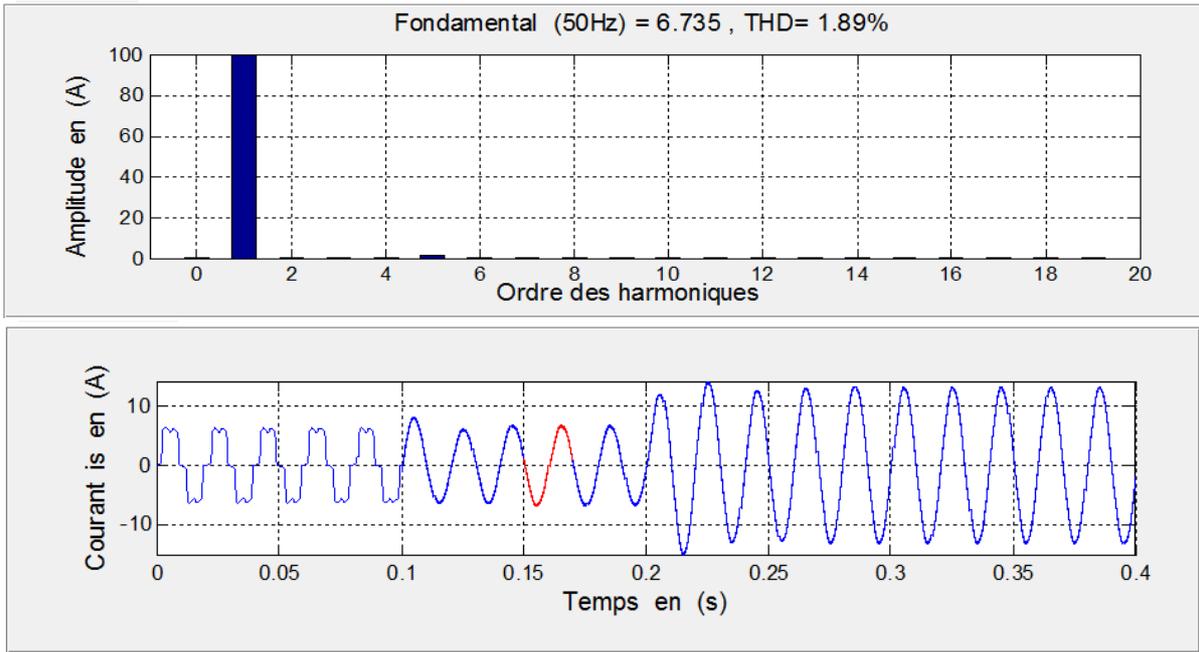
a)



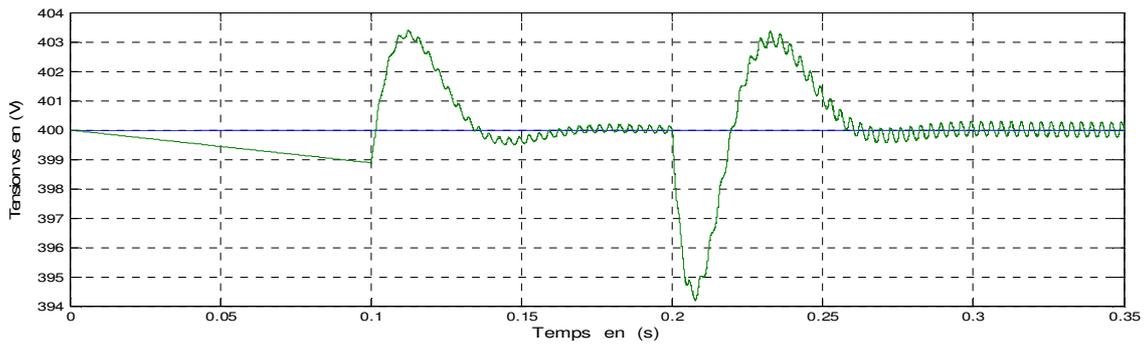
b)



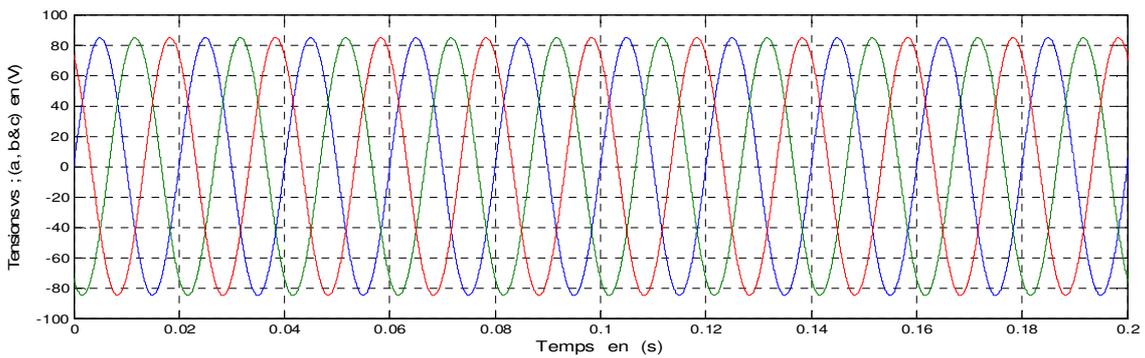
c)



d)



e)



f)

Figure (3.25) : Réponse de F.A.P cas de perturbation dans le repère triphasé.

- a) Courant de la charge - b) Courant injecté - c) Courant de la source
- d) Spectre d'harmoniques - e) Tension aux bornes du condensateur
- f) Tensions du réseau.

- **Interprétations des résultats:**

Les figures; (3.25. a, b, c) présentent le courant de ; (charge , source et injecté), nous remarquons quand on injecte le courant harmoniques dans le réseau , le courant de la source prend la forme sinusoïdale, figure;(3.25.c), quand vari la charge, on remarque l'appelle du courant, ainsi que l'augmentation du courant injecté par le filtre , cette réaction explique le bon fonctionnement du système et meilleur suivi des impulsions du courant de la référence par le courant injecté.

La figure; (3.25.c) présente le courant filtré de la source, lors de variation de la charge, le courant de la source passe par un transitoire environ de; ($t=0.05$ s) après il prennent sa forme en régime permanent. Le spectre harmoniques du courant de la source présenté par la figure; (3.25.d) montre que le (F.A.P) commandé par régulateurs "P.I" offre un THD de 1.89% et la tension suit parfaitement sa référence sans de dépassement, figure; (3.25.f).

3. 10 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté les structures des commandes du filtre actif parallèle, dans le but de découvrir une meilleure méthode de commande, pour une meilleure compensation du courant harmoniques dans le réseau électrique.

Les résultats de simulation montrent que la modulation de M.L.I sinusoïdale par la méthode de référentiel synchrone, donne des bons résultats en termes de qualité de filtrage soit ;(THD de 1.29%), en plus la fréquence de commutation est contrôlable, par contre la modulation de M.L.I sinusoïdale par la méthode de puissance instantanée, donne des résultats de filtrage inacceptables , avec un THD élevé de 2.4%, par apport les quatre commandes étudiées auparavant .

Dans notre travail, la modulation par hystérésis à bande fixe a été classée en 2^{ème} position , mais elle évoque une fréquence de commutation variable et cela est l'inconvénient majeur du système de commande .

Les résultats trouvés de l'ensemble modulations, montrent la faisabilité topologie de la commande du filtre actif parallèle par les régulateurs linéaires, dans différentes méthodes d'identification des harmoniques.

Conclusion générale

Après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, on a présenté les solutions traditionnelles, dans le cadre de diminution de ces perturbations, le filtrage actif est une solution moderne pour la dépollution d'harmoniques.

L'étude bibliographique montre que les filtres actifs parallèles représentent une solution efficace, pour la compensation des harmoniques, engendrés par les courants harmoniques.

Un filtre actif on peut le connecté sur le réseau en série ou en parallèle et ce, pour obtenir les deux structures électrotechniques différentes ;(tension ou courant). En raison de simplifier la commande, presque la totalité des filtres dans le monde sont des structures de tension, c'est pour cette raison principale qu'on a retenu cette structure.

Dans cette perspective, notre travail a été consacré à l'étude des différentes stratégies destinées à la commande du filtre actif parallèle. Les performances du filtre actif dépendent non seulement du dimensionnement de son circuit de puissance, mais aussi le type de commande utilisé, pour le contrôle de ses courants. L'extraction des courants harmoniques a été principalement basé sur la méthode des puissances active, réactive instantanées et la méthode de référentiel synchrone.

Dans notre travail, les résultats de simulation montrent que la modulation de M.L.I sinusoïdale par la méthode de référentiel synchrone, donne des bons résultats en termes de qualité de filtrage, aussi la fréquence de commutation est contrôlable. La modulation par hystérésis à bande fixe a été classée dans notre études en 2^{ème} position, malheureusement elle évoque une fréquence de commutation variable.

Les résultats de simulation obtenus, montrent la possibilité topologie de la commande du filtre actif parallèle, par les régulateurs linéaires dans les différentes méthodes d'identification des harmoniques.

Bibliographie

- [1] Mr Mohamed Muftah Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales", thèse de Doctorat, Nancy-I, Génie Electrique du 29 mai 2008.
- [2] Mr ZAITER Rida & Mr ZANBOUA Chaâbane , mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Electrotechnique, option: Electromécanique, thème: filtrage actif parallèles des harmoniques du courant généré par un pont redresseur triphasé non commande; (Année 2008).
- [3] Mr BOUDACHE Abdelkrim et Mr GALOUL Fayçal, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Electrotechnique, option: "Électrotechnique", thème: Etude par simulation d'un Filtre Actif Parallèle ; Année (2006).
- [4] Mr HAMRAOUI Farid et Mr MEKATI Abdelaziz, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de Master en Electrotechnique, option: "Commande et Electronique Industrielle", thème: Commande d'un filtre actif parallèle; Année (2011).
- [5] Mr GHADBANE Ismail, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme de Magister en Électrotechnique, option: " Electricité Industrielle " ,thème: Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs; Année (2010).
- [6] Mr KAMIL Mohammed et Mr NOUIRI Salih, mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme d'Ingénieur d'Etat en Génie Electrotechnique, option: "Electromécanique ",thème: Commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle ; Année (2009).