

République Algérienne Démocratique Et Populaire

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen

Faculté de Technologie

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE POUR L'OBTENTION DU

DIPLOME DE MASTER

Spécialité : *Réseau Electrique Et Réseau Electrique Intelligent*

Préparé au Département de Génie Electrique et Electronique

Présenté par

AMARA Asma & BENGANA Adil Yassine

Intitulé du Mémoire

**Etude et simulation d'un circuit de commande pour un filtre actif de puissance
parallèle à deux bras à point milieu pour un réseau électrique à trois fils**

Soutenu publiquement le 25 Juin 2015 devant la commission d'examen composée de :

S.M. MELIANI	Président	M.C.A	U.A.B - Tlemcen
M.A.BRIKCI NIGASSA	Encadreur	M.A.A	U.A.B - Tlemcen
B. BENYAHIA	Examineur	M.C.B	U.A.B - Tlemcen
M. CHABANE	Examineur	M.A.A	U.A.B - Tlemcen

Année Universitaire : 2014 : 2015

Dédicace :

*Je rends grâce à Dieu tous puissant de m'avoir
accordé la force nécessaire pour la réalisation de ce
travail que je dédie chaleureusement :*

A mes chers parents, à qui je dois tant.

A mes deux aimables frères

*A mes deux sœurs qui m'ont toujours soutenu dans
les moments durs.*

*A tous mes amis (es) et à tous ceux qui m'ont
encouragé.*

AMARA Asma

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma Cher Maman, pour son soutien inconditionnel.

A mon Père, pour ses encouragements.

A ma chère sœur Amira

A mon frère, Abd El Illah

A la mémoire de Mes grands-parents.

A mes Tantes.

A Mr Chebabhi Ali

*A mon Binôme Asma Amara avec qui j'ai eu beaucoup de plaisir à
travailler*

A mes Amis et mes Collègues étudiant de la promotion RERE?

A tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin

BENJANA Adil Yassine

Remerciement

On tient à remercier notre Directeur de Projet de Fin d'Etude Monsieur M. A.BRIKCI NIGASSA pour le soutien technique et moral qu'il nous accordé tout au long de notre mémoire. On le remercie et lui témoigne de notre gratitude pour ses conseils et ses remarques constrictives, sa grande disponibilité, sa gentillesse, et ses encouragements dans les moments difficiles.

On remercie aussi tous l'encadrement du département de génie électrique et en particulier nos enseignants qui ont assuré notre formation Réseau Electrique et Réseau Electrique Intelligent.

On tient à remercier Monsieur M. MELIANI de présider le jury de notre mémoire.

Nous tenons également à adresser nos remerciements à Mr BENYAHIA et Mr CHABANE d'avoir accepté de faire partie de notre jury de mémoire.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : <i>Qualité de l'Energie Electrique</i>	
1.1. Qualité de l'énergie :	4
1.2. Distorsions	5
1.2.1 Distorsions harmoniques	5
1.2.2 Distorsions Inter-Harmoniques	6
1.3. Caractérisation des harmoniques.....	6
1.3.1 Taux de Distorsions Harmoniques (THD)	6
1.3.1 Facteur de puissance.....	7
1.4. Origines des Harmoniques	8
1.5. Conséquences	8
1.5.1 Effets instantanés.....	8
1.5.1.1 Défauts de fonctionnement	8
1.5.1.2 vibration et bruits	9
1.5.2 Effets à terme.....	9
1.6. Normes et réglementation	9
1.6.1 Normes d'appareillage	9
1.6.2 Normes qualité réseaux.....	11
1.7. Solutions de dépollution du réseau électrique	11
1.7.1. Solutions traditionnelles de dépollution.....	11
1.7.2 Solutions modernes de dépollution	14
1.7.2.1 Principe de fonctionnement :.....	14
1.7.2.2 Classification des filtres actifs :.....	14
1.7.3 Comparatif et choix d'un FAP	17

1.8 Récapitulation

.....
18

1.9. Conclusion : 19

Chapitre 2: *Topologies et Stratégies de Commande d'un Filtre Actif Parallèle*
Introduction

.....21

2.1. Structure d'un FAP à Structure Tension21

2.2. Topologies de filtres actifs parallèles22

2.2.1 Onduleur de tension à trois bras avec condensateur à point milieu22

2.2.2 Onduleur de tension à deux bras :23

2.3. Système de stockage de l'énergie26

2.4. Filtre de sortie.....26

2.5. Stratégies de contrôle d'un filtre actif parallèle à structure tension27

2.5.1 Identification des courants de références :27

2.5.1.1 Stratégie de commande directe :27

2.5.2 Extraction des puissances et des courants harmoniques :32

2.5.3 Poursuite des courants de référence35

2.5.3.1 Commande par hystérésis :35

2.5.3.2 Commande par hystérésis modulée35

2.5.4 Régulation de la tension :36

2.5.4.1 Régulateur de type PI :36

2.6. Conclusion :37

Chapitre 3: *Résultats de simulation en régime équilibré*

3.1. Présentation du système à simuler :39

3.2. Simulation de l'ensemble charge non linéaire- filtre actif de puissance41

3.2.1 La méthode directe des puissances instantanées :41

3.2.2 Méthode indirecte des puissances instantanées :43

3.2.3. Extraction par filtre passe-bas :44

3.2.4. Extraction par filtre Multi- variable :45

3.2.5. Extraction par un filtre Adaline47

3.3. Etude du comportement du système lors d'une variation de l'angle α 48

3.3.1 Commande directe basée sur les puissances instantanées :48

3.3.2	Méthode indirecte des puissances instantanées par un filtre passe -bas	49
3.3.3	Méthode directe des puissances instantanées par Filtre Multi-variable	50
3.3.4	Méthode des puissances instantanées par un filtre Adaline	51
3.4.	Conclusion :	52
Chapitre 4: <i>Résultats de simulation en régime déséquilibré</i>		
4.1.	Introduction.....	54
4.2.	Simulation pour le cas d'une charge déséquilibrée	56
4.2.1	Méthode directe des puissances instantanées	56
4.2.2	Méthode indirecte des puissances instantanées $p-q$ par un filtre passe-bas	61
4.2.3	Méthode indirecte des puissances instantanées par Filtre Adaline :	66
4.2.4	Méthode des puissances $p-q$ instantanées modifiée :.....	72
4.3.	Simulation numérique pour le cas d'un défaut monophasé :.....	79
4.3.1.	Méthode indirecte des puissances instantanée par un filtre passe-bas	84
4.3.2.	Méthode indirecte des puissances instantanées par un filtre Adaline :	84
4.4.	Conclusion :	90

Bibliographie

Annexes

Resumé

Liste des figures

Chapitre I :

<i>Figure 1-1: Signal de courant harmonique $i(t)$ et de son spectre $I(f)$</i>	<i>6</i>
<i>Figure 1- 2: Filtre actif série.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 1- 3 : Filtre hybride série.....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 1- 4: Filtre actif parallèle.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 1- 5: Filtre hybride parallèle.....</i>	<i>16</i>
<i>Figure 1- 6: Conditionneur universel de puissance.....</i>	<i>17</i>

Chapitre II :

<i>Figure 2- 1: Structure d'un FAP à Structure Tension.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 2- 2: Onduleur du filtre actif de puissance parallèle à trois bras avec condensateur à point milieu pour un réseau triphasé à quatre fils.....</i>	<i>22</i>
<i>Figure 2- 3 : Onduleur de tension à deux bras employé dans FAP à structure tension relié à un réseau à trois fils</i>	<i>24</i>
<i>Figure 2- 4: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension à deux bras</i>	<i>26</i>
<i>Figure 2- 5: Commande directe d'un filtre actif parallèle</i>	<i>27</i>
<i>Figure 2- 6 : Commande indirecte d'un filtre actif parallèle</i>	<i>30</i>
<i>Figure 2- 7: Extraction par des filtres classiques.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure 2- 8: Schéma de détection à base d'Adaline.....</i>	<i>33</i>
<i>Figure 2- 9: Structure d'un filtre multi-variable (FMV)</i>	<i>34</i>
<i>Figure 2- 10: Schéma de commande par hystérésis.....</i>	<i>35</i>
<i>Figure 2- 11: Commande par hystérésis modulée.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure 2- 12: Régulation de V_{dc}</i>	<i>37</i>

Chapitre III :

<i>Figure 3- 1: Schémas du réseau avec FAP étudié</i>	<i>39</i>
<i>Figure 3- 2: Schémas de charge non-linéaire alimentant une charge r-l connecté au réseau triphasé à trois fils.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 3- 3: Représentation des caractéristiques : (a) courants de source i_{s1}, (b) FFT du courant de charge THD.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure 3- 4: Commande directe d'un filtre actif de puissance appliquant la méthode des puissances instantanées.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure 3- 5: La méthode directe p-q en régime équilibré pour angle d'amorçage $\alpha=30^\circ$.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure 3- 6: Représentation de l'évolution des paramètres</i>	<i>43</i>

<i>Figure 3- 7: Commande indirecte d'un filtre actif de puissance appliquant la méthode p-q</i>	43
<i>Figure 3- 8 : Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode indirecte p-q en régime équilibré avec filtre passe-bas</i>	44
<i>Figure 3- 9: Représentation des caractéristiques (a) tension au borne du condensateur,(b) FFT du cournt de source après filtrage</i>	45
<i>Figure 3- 10: Lois de commande indirecte d'un filtre actif de puissance appliquant la méthode des puissances instantanées utilisant un FMV</i>	45
<i>Figure 3- 11: Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode directe p-q en régime équilibré avec Filtre multi-variable</i>	46
<i>Figure 3- 12: Représentation des caractéristiques (a) tension au borne du condensateur, (b) FFT du courant de source après filtrage THD</i>	46
<i>Figure 3- 13: Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode indirecte p-q en régime équilibré avec filtre Adaline</i> ...	47
<i>Figure 3-14: Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode directe p-q en régime équilibré avec angle d'amorçage 30°</i>	48
<i>Figure 3- 15: Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la :méthode indirecte p-q en régime équilibré avec Filtre passe-bas pour $\alpha=30^\circ$</i>	49
<i>Figure 3- 16: Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode directe p-q en régime équilibré avec Filtre Multi-variable pour $\alpha=30^\circ$</i>	50
<i>Figure 3- 17: Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode indirecte p-q en régime équilibré avec Filtre Adaline pour $\alpha=30^\circ$</i>	51

Chapitre IV :

<i>Figure 4-1 : Modèle de simulation constitué par (Source + FAP + Charge déséquilibrée)</i>	54
<i>Figure 4- 2: Résultats de simulation par la méthode directe des puissances Instantanées p-q suivant le régime déséquilibré</i>	55
<i>Figure 4-3: Résultats de simulation pour la première phase</i>	56
<i>Figure 4-4: Résultats de simulation pour la deuxième phase</i>	57
<i>Figure 4- 5: Résultats de simulation pour la troisième phase</i>	58
<i>Figure 4- 6: Représentation des FFT de courant pour la méthode p-q directe en cas d'un système déséquilibré</i>	59
<i>Figure 4- 7: Tension de condensateur V_{dc}</i>	60

<i>Figure 4- 8: Résultats de simulation par la méthode indirecte p-q avec emploi d'un FPB suivant le régime déséquilibré</i>	<i>61</i>
<i>Figure 4-9: Résultats de simulation pour la première phase</i>	<i>62</i>
<i>Figure 4- 10: Résultats de simulation pour la deuxième phase.....</i>	<i>63</i>
<i>Figure 4-11: Résultats de simulation pour la troisième phase.....</i>	<i>64</i>
<i>Figure 4- 12 : Représentation des FFT de courant pour la méthode p-q indirecte par un FPB en cas d'un système déséquilibré Avant filtrage , (b) après filtrage.....</i>	<i>65</i>
<i>Figure 4-13 : Résultats de simulation par la méthode indirecte p-q avec filtre Adaline pour le régime déséquilibré de charge</i>	<i>66</i>
<i>Figure 4- 14 : Résultats de simulation pour première phase</i>	<i>67</i>
<i>Figure 4- 15 : Résultats de simulation pour deuxième phase</i>	<i>68</i>
<i>Figure 4-16: Fi résultats de simulation pour la troisième phase.....</i>	<i>69</i>
<i>Figure 4- 17 :Représentation des THD de la méthode p-q indirecte par un filtre Adaline pour un système déséquilibré(a) Avant filtrage, (b) après filtrage</i>	<i>70</i>
<i>Figure 4-18 : tension aux bornes du condensateur V_{dc}</i>	<i>71</i>
<i>Figure 4- 19 : Résultats de simulation par la méthode directe p-q modifiée en régime déséquilibré</i>	<i>72</i>
<i>Figure 4-20 : Résultats de simulation pour la première phase.....</i>	<i>73</i>
<i>Figure 4- 21 : Résultats de simulation pour la deuxième phase.....</i>	<i>74</i>
<i>Figure 4- 22 : Résultats de simulation pour la troisième phase.....</i>	<i>75</i>
<i>Figure 4- 23 : Représentation des THD de la méthode p-q indirecte modifiée pour un système déséquilibré ; (a) Avant filtrage, (b) après filtrage</i>	<i>76</i>
<i>Figure 4- 24 : Modèle d'un réseau électrique déséquilibré dû à un défaut monophasé coté charge.....</i>	<i>78</i>
<i>Figure 4- 25: Résultats de simulation par la méthode indirecte p-q avec FPB avec défaut monophasé</i>	<i>79</i>
<i>Figure 4- 26 : Résultats de simulation pour la première phase.....</i>	<i>80</i>
<i>Figure 4- 27 : résultats de simulation pour la deuxième phase</i>	<i>81</i>
<i>Figure 4- 28 : Résultats de simulation pour la troisième phase.....</i>	<i>82</i>
<i>Figure 4- 29 : Représentation des THD obtenue par p-q indirecte avec un filtre passe bas</i>	<i>83</i>
<i>Figure 4- 30 : Résultats de simulation par la méthode directe des puissances Instantanées par un filtre Adaline suivant le régime déséquilibré.....</i>	<i>84</i>
<i>Figure 4- 31 : Résultats de simulation pour la première phase.....</i>	<i>85</i>
<i>Figure 4- 32 : Résultats de simulation pour la deuxième phase.....</i>	<i>86</i>
<i>Figure 4- 33 : résultats de simulation pour la troisième phase.....</i>	<i>87</i>
<i>Figure 4-34 : Représentation des THD obtenue par p-q indirecte avec un filtre Adaline</i>	<i>88</i>

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau 1- 1 Limites des composants harmoniques en courant.....	10
Tableau 1- 2 Limites des émissions de courants harmoniques	10
Tableau 1- 3 récapitulatif de l'état d'évolution des topologies de filtres actifs et leurs domaines d'application	18

Chapitre II :

Tableau 2- 1 Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras à condensateur point milieu.....	23
Tableau 2-2 Tensions générées par l'onduleur de tensions à deux bras.....	25
Tableau 2-3 Modes de compensation de la commande des puissances instantanées.....	30

Chapitre III :

Tableau 3- 1 : Paramètres système simulé.....	40
Tableau 3- 2 : Paramètres du FAP.....	41

Chapitre IV :

Tableau 4-1 : Paramètres de simulation	54
Tableau 4- 2 : THD par pahse	59
Tableau 4- 3 : THD par phase	65
Tableau 4- 4 : THD par phase pour la méthode pq indirecte appliquant un filtre Adaline.....	71
Tableau 4-5 : Tableau récapitulatif des THDs des courants de source pour les quatre méthodes d'identification	77
Tableau 4-6 : Tableau récapitulatif des deux méthodes d'identification pour.....	89

Glossaire

I_n	: Valeur efficace de l'harmonique de rang n
f_0	: Fréquence du signal sinusoïdal de fréquence 50 Hz (fondamentale),
φ_n	: Déphasage de la composante harmonique de rang n .
THD	: Le taux de distorsion harmonique
TDH_n	: Le taux de distorsion harmonique individuel de rang n
I_0	: L'amplitude de la fondamentale
S	: La puissance apparente
P	: La puissance active
Q	: La puissance réactive
D	: La puissance déformante
F_p	: Facteur de puissance
CEI	: Commission Electrotechnique Internationale
CENELEC	: Comité européen de normalisation en électronique et en électrotechnique
L	: Inductance
C	: Capacité
R	: Résistance
f_r	: Fréquence de résonance
Q	: Facteur de qualité
UPQC	: Unified power quality conditioner
FAP	: Filtre actif parallèle
PLL	: Phase-Locked Loop (Boucle de verrouillage de phase)
i_s	: Courant de source
i_c	: Courant de charge
i_f	: Courant de filtre
C_{dc}	: Capacité du condensateur
P_{cc}	: Point de raccordement
V_{dc}	: Tension aux bornes du condensateur
S_{123}	: Etats des interrupteurs de l'onduleur.
r_f	: Inductance du filtre
r_f	: Résistance du filtre
L_s	: Inductance du réseau.
\bar{p}	: Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension

\tilde{p}, \tilde{q}	: Puissances oscillatoires correspondantes à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension
$i_{\alpha\beta}$: Courants du réseau électrique dans le repère stationnaire.
$v_{\alpha\beta}$: Tensions estimées du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire
P^*_{dc}	: Puissance obtenue à la sortie du régulateur de la tension continue.
r_s	: Résistance du réseau.
\bar{q}	: Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension
i_f^{ref}	: Courants de référence du réseau électrique dans le repère stationnaire.
FPB	: Filtre passe bas
FPH	: Filtre passe haut
FMV	: Filtre multi-variable
PI	: Régulateur proportionnel
K	: L'indice de temps de l'itération
w_k	: Poids d'Adaline
x_k	: Variable d'entrée de l'Adaline
\hat{y}_k	: La sortie estimée
y_k	: L'entrée mesurée
η	: Le taux d'apprentissage de l'Adaline (facteur de réduction)
K_c	: Gain du régulateur
τ_c	: Constante de temps du filtre du premier
ξ	: Coefficient d'amortissement
kp	: Gains du régulateur PI

Introduction générale

Ces dernières années, les différents développements dans les modèles de composants, la conception assistée par les ordinateurs (CAO) et les semi-conducteurs ont contribué largement à l'amélioration des performances des convertisseurs statiques.

Néanmoins, ces convertisseurs absorbent des courants non sinusoïdaux du réseau, ils se comportent alors comme des générateurs de courants harmoniques, ce qui causent des problèmes pour l'utilisateur (échauffement dans les machines, dysfonctionnement des équipements électriques, détérioration du rendement ...), ainsi que pour le distributeur d'énergie (dégradation de facteur de puissance, création des pertes supplémentaires dans les lignes de transport ...).

Pour faire face à ces problèmes, les ingénieurs et les chercheurs dans le domaine des réseaux électriques s'efforcent de trouver des solutions efficaces qui permettent de minimiser les courants harmoniques circulants dans ces derniers.

Parmi les solutions classiques, l'utilisation des filtres passifs et la plus répandue, en pratique, sauf qu'elle présente deux inconvénients majeurs.

Le premier est lié au phénomène de résonance avec le réseau, le deuxième est la dépendance des performances du filtre passif aux caractéristiques du réseau sur lequel il est connecté.

L'apparition de nouveaux dispositifs reposant sur l'utilisation de l'électronique de puissance et le progrès incessant dans les semi-conducteurs a conduit à la conception de nouvelles structures de filtrages permettant de pallier les inconvénients des filtres passifs.

L'efficacité et la souplesse de ces nouveaux dispositifs de filtrage appelés les filtres actifs sont démontrées par nombreuses recherches.

Les filtres actifs se distinguent, soit par leur mode de connexion sur le réseau (série ou parallèle) soit par leur commande (générateur de courant ou de tension) soit par leur structure électronique (onduleur de tension ou de courant).

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle destiné à compenser les harmoniques basses tensions dans un réseau électrique.

Le premier chapitre est consacré à la description des perturbations induites dans les réseaux de distribution par les convertisseurs statiques. On étudie les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.

Le deuxième chapitre nous citons les différentes topologies du filtre actif parallèle à point milieu ainsi que les stratégies de commande, cette dernière est basée sur la méthode des puissances réelles et imaginaires.

Le troisième chapitre est consacré aux résultats de simulation en cas d'un système équilibré, puis en variant l'angle d'amorçage des thyristors.

Le quatrième chapitre présente les résultats de compensation obtenus par simulation en cas d'un système déséquilibré ou en présence d'un défaut monophasé.

Chapitre 1

Qualité de l'Energie Electrique

Introduction :

On se propose de présenter les différents phénomènes électriques qui affectent la qualité de l'énergie électrique, principalement les défauts de nature tension et courant, ainsi que leurs conséquences. Il s'en suivra la citation des normes et réglementations qui les régissent.

1.1. Qualité de l'énergie :

L'énergie électrique fournie par un producteur/distributeur à l'ensemble de ses clients doit être une énergie de qualité triphasée conformément à des normes prédéfinie (tolérance admissible sur la tension, fréquence, ...).

Actuellement les récepteurs domestiques ou industriels sont en majorité des charges non-linéaires. Une charge est dite "non-linéaire" si le courant absorbé n'est pas sinusoïdal lorsqu'elle est alimentée par une tension sinusoïdale.

Outre les altérations subies par cette énergie électrique durant son transport, les charges non-linéaires à la réception génèrent des courants harmoniques (signaux sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers du signal fondamental à 50Hz) et par conséquent déforment les signaux électriques du courant (tension) qui au départ étaient sinusoïdaux.

Ces charges génèrent des distorsions harmoniques dans l'ensemble du réseau électrique et peuvent perturber et engendrer des défauts de fonctionnement normal de certains équipements électriques. Les perturbations obtenues par cette pollution sont de deux types : celles liées aux perturbations tension et courant qui proviennent généralement des charges non-linéaires :

- Déséquilibres des tensions et courants : les amplitudes des trois tensions (courants) du système triphasé sont différentes et/ou les déphasages sont de 120 degrés.

- Les perturbations de tensions causées par des tensions perturbatrices comme les tensions harmoniques, les creux de tension et coupures brèves, surtensions, fluctuations rapides de tension (Flicker)....

Par conséquent, il est indispensable de comprendre l'origine de ces perturbations et d'appliquer les solutions adéquates pour les supprimer afin d'éviter le dysfonctionnement ou la destruction des composants du réseau électrique et des récepteurs terminaux.

Dans ce qui suit, nous présentons la définition et l'origine des harmoniques, leurs effets ainsi que la réglementation et normes en vigueur.

1.2. Distorsions

1.2.1. Distorsions harmoniques

Les charges non linéaires altèrent la forme de l'onde sinusoïdale du courant. Cette onde périodique non sinusoïdale peut être décomposée en une somme de sinusoïdes de fréquences multiples entières ($n \in N$) de la fondamentale f_0 (50 Hz) ($n=1$), fréquence du signal. Pour les nombres entiers supérieurs à un ($n > 1$) les sinusoïdes sont dites harmoniques d'ordre supérieur.

Un signal déformé, représentant un courant absorbé par une charge non-linéaire, résultante de la superposition des différents rangs d'harmoniques est exprimé comme suit:

$$i(t) = I_c + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sqrt{2} \sin(2\pi n f_0 t + \varphi_n), \quad (1.1)$$

I_c (A) : Valeur de la composante continue du courant (considérée comme nulle),

I_n (A) : Valeur efficace de l'harmonique de rang n ,

f_0 (Hz) : Fréquence du signal sinusoïdal de fréquence 50 Hz (fondamentale),

φ_n (rad) : Déphasage de la composante harmonique de rang n .

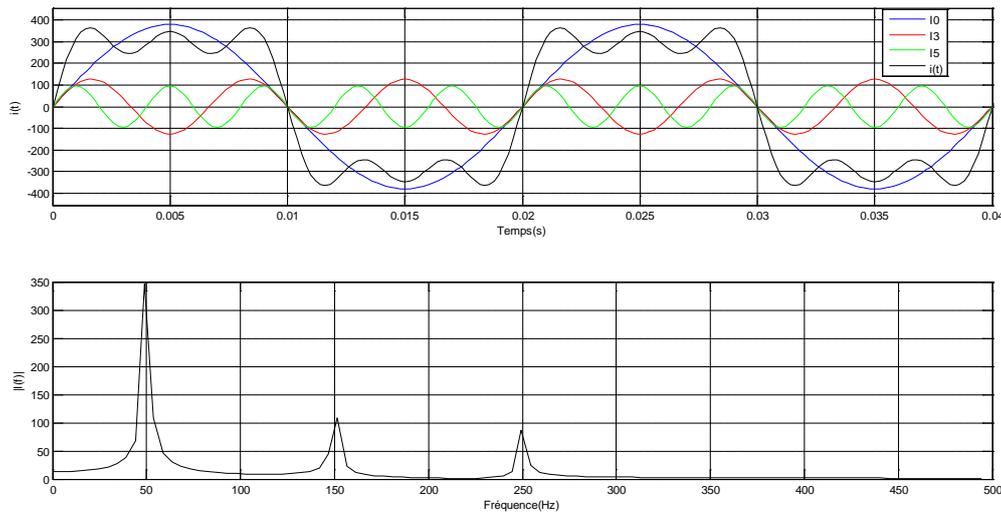


Figure 1-1 : Signal de courant harmonique $i(t)$ et de son spectre $|I(f)|$

La figure 1-1 montre l'allure d'un courant avec harmonique $i(t)$ composé de la superposition du signal sinusoïdale de fréquence 50 Hz (fondamentale) et des signaux harmoniques d'ordre 3 et 5 ainsi que son spectre d'amplitude $|I(f)|$ associé faisant ressortir les harmoniques 150 Hz ($n=3$) et 250 Hz ($n=5$).

1.2.2. Distorsions Inter-Harmoniques [CEI-90] [CH-89][GH-05] [MO-08]

Outre les distorsions harmoniques, il existe une autre perturbation appelée inter-harmoniques qui sont des signaux dont les fréquences ne sont pas des multiples entiers de la fréquence du signal fondamental. Ces distorsions peuvent être observées en présence des variateurs de vitesses pour machines asynchrones, des fours à arc. L'existence de ces signaux harmoniques se traduit par une dégradation de facteur de puissance.

1.3. Caractérisation des harmoniques

1.3.1. Taux de Distorsions Harmoniques (THD)

Les taux de Distorsions Harmoniques sont des indicateurs significatifs de la pollution d'un réseau. Le calcul de ces taux en pourcent permet de déceler la présence

ou l'absence d'harmoniques dans le réseau (l'absence d'harmoniques est caractérisée par un THD nul) :

- Taux de Distorsion Harmonique Individuel TDH_n : Le taux de distorsion harmonique individuel de rang n est le rapport de la valeur efficace I_n de l'amplitude de l'harmonique n à celle du fondamental I_0 :

$$TDH_n = 100 \frac{I_n}{I_0} \quad (1.2)$$

- Taux de Distorsions Harmoniques : le taux de distorsions harmoniques global caractérise la déformation globale et se calcule des deux façons suivantes :

- Le Taux de Distorsion Harmonique Totale par rapport au fondamental TDH_f est exprimé comme suit :

$$TDH_f = 100 \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \dots + I_n^2}}{I_0} \quad (1.3)$$

- Tandis que le Taux de Distorsion Harmonique Totale noté TDH_s relatif à la valeur efficace est comme suit :

$$TDH_s = 100 \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{\sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}, \quad (1.4)$$

Le TDH_s est rarement utilisée, sauf indication contraire, on applique en général la relation du TDH_f .

1.3.2. Le facteur de puissance :

En présence de des harmoniques, la puissance apparente S est composée d'une puissance : active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante : [OUL-05]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.5)$$

Dans le cas d'un signal sinusoïdal, le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (1.6)$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1.

1.4. Origines des Harmoniques [RA-86] [SE-84]

Les origines des harmoniques proviennent de l'utilisation dans les milieux industriels et domestiques de récepteurs non-linéaires de différents types dont nous pouvons citer à titre d'exemples :

- Redresseur monophasé à diodes avec filtrage,
- Redresseur triphasé à diodes avec filtrage,
- Convertisseurs statiques,
- Variateur de vitesse des moteurs asynchrones,
- Gradateur monophasé (Régulation de puissance de fours à résistances),
- Modulation de puissance des lampes halogènes,
- Redresseur triphasé à thyristors (Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones, Electrolyseurs),
- Moteur asynchrone (Machines-outils, Appareils électroménagers, Ascenseurs, ...)
- Alimentation à découpage (Micro-informatique, ...)

1.5. Conséquences

Les perturbations harmoniques des courants et des tensions ont des effets néfastes sur tous les récepteurs terminaux raccordés au réseau. Les effets engendrés par les harmoniques sont généralement de deux types : les effets instantanés et les effets à terme

.

1.5.1. Effets instantanés

1.5.1.1. Défauts de fonctionnement [AK-83] [AL-02]

Divers équipements sont sensibles à cette problématique, qui en présence d'harmoniques, des changements de signe répété dans une demi-période peuvent

détériorer le bon fonctionnement de certains appareils, tel que : les convertisseurs de courant, les automates programmables et certains appareils électroniques domestiques.

1.5.1.2. Vibrations et bruits [MO-08] [SU-90]

Les courants harmoniques engendrent des vibrations et des bruits, surtout au niveau des transformateurs et machines tournantes.

1.5.2. Effets à terme

L'effet à terme le plus important est de nature thermique, il se traduit par l'échauffement. Il provoque une destruction lente du matériel. On cite :

- Echauffement et vieillissement des condensateurs, des câbles et des équipements ;
- Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines, des transformateurs et des câbles.

1.6. Normes et réglementation [DE-97]

Pour assurer une qualité de l'énergie satisfaisante 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. Ces normes peuvent être d'origines divers, à titre d'exemple : International CEI), Européen par le (CENELEC) et nationaux Français (UTE et le CEF).

1.6.1. Normes d'appareillage

La norme CEI 61000-3-2 ou EN 61000-3-2 est appliquée pour les appareils basse tension avec un courant inférieur à 16A. Le tableau ci-dessous montre les normes de limitation de courant.

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

Tableau 1-1 : Limites des composants harmoniques en courant.

La norme CEI 61000-3-4 ou EN 61000-3-4 spécifie les limites d'émissions de courants harmoniques des équipements individuels d'intensité comprise entre 16 à 75A. Ces limites s'appliquent aux réseaux basse tension.

Rang	Courant harmonique en % du 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
Paire	≤ 0.6 ou $0.158/h$

Tableau 1-2 : Limites des émissions de courants harmoniques

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 : (Généralité, Environnement, Limite, Techniques d'essais et de mesures, Guide d'installation et l'atténuation, Normes génériques).

1.6.2. Normes et qualité réseaux

- La norme EN 50160 précise les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics basse tension.

- La norme IEEE 519 (Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric power Systems - USA) œuvre à limiter l'impact des charges non linéaires à la fois entre le distributeur d'énergie et le client (engagement mutuel pour limiter les harmoniques).

1.7. Solutions de dépollution du réseau électrique [GO-97]

On peut regrouper les solutions visant à réduire les perturbations harmoniques en deux groupes : les solutions traditionnelles et les solutions modernes. La première consiste à utiliser des convertisseurs statiques moins ou peu polluants, tandis que la seconde consiste en la mise en œuvre d'un filtrage des composantes harmoniques et à compenser les courants ou les tensions harmoniques.

1.7.1. Solutions traditionnelles de dépollution [BO-00]

Ce sont des techniques qui apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation.

Agir sur la structure de l'installation : il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur indépendant afin de le séparer d'un récepteur sensible. [OUL-05].

Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique : on procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur l'harmonique qui ne subit aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes liés à la pollution électrique soumis aux harmoniques est utilisée dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcôt de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation.

Rééquilibrage des courants du réseau électrique : c'est une solution qui permet de répartir les charges d'une manière identique sur les trois phases. En effet, les charges monophasées et biphasées mal réparties engendrent des courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension [ALA-02].

Filtrage passif : le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur les harmoniques à rejeter. Ainsi, pour filtrer un courant à une fréquence particulière. Deux types de filtres passifs sont généralement utilisés, le filtre résonant et le filtre amorti :

Filtre passif résonant : ou filtre shunt est composé d'une inductance L en série avec un condensateur C . La valeur d'inductance L et de la capacité C sont calculées à

la fréquence de résonance correspondant à la fréquence de l'harmonique à éliminer. Lorsqu'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres ou chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer.

Les caractéristiques principales de ce filtre sont :

- La fréquence de résonance f_r :

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.7)$$

- Le facteur de qualité Q

$$Q = 2\pi f_r \frac{L}{R} \quad (1.8)$$



1.7.2. Solutions modernes de dépollution

De nouvelles structures de filtrage plus efficaces ont été conçues et appelées filtres actifs de puissance en réponse aux inconvénients des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux électriques, en plus de l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT qui offrent de nouvelles possibilités. Le but de ces filtres est de générer des courants ou tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation des performances des équipements et installations électriques.

1.7.2.1. Principe de fonctionnement

Les filtres actifs sont constitués de convertisseurs statiques à base de semi-conducteurs de puissance commandés par un système de contrôle approprié. Ils peuvent être une source de courant ou de tension qui compensent en temps réel les harmoniques en injectant au niveau du point de raccordement un courant ou une tension en opposition de phase par rapport aux perturbations harmoniques existantes,

afin que le courant/tension de ligne reste purement sinusoïdal et égale au fondamental du courant de charge.

Le filtre actif peut être connecté en série ou en parallèle au réseau électrique, selon le type de compensation voulue.

1.7.2.2. Classification des filtres actifs :

On se propose de présenter une classification selon leurs topologies. On peut citer trois topologies. [SI-99]

a) Filtre actif série

Le filtre actif série est connecté en série sur le réseau. Il se comporte comme une source de tension qui engendre des tensions harmoniques dont la somme avec la tension réseau est une onde sinusoïdale.

Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau.

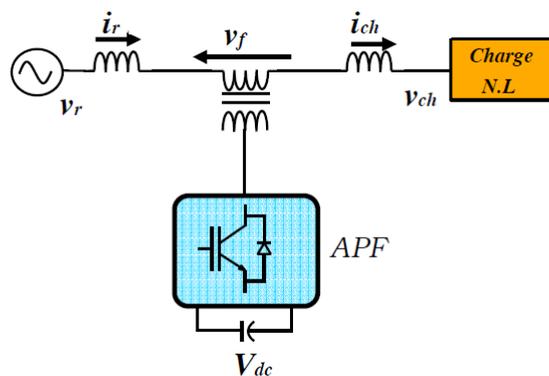


Figure 1-2 : Filtre actif série

Il peut y avoir une autre topologie de filtre actif série en l'associant avec filtre passif parallèle que l'on appelle filtre hybride série. On utilise cette association afin d'améliorer les performances de compensation.

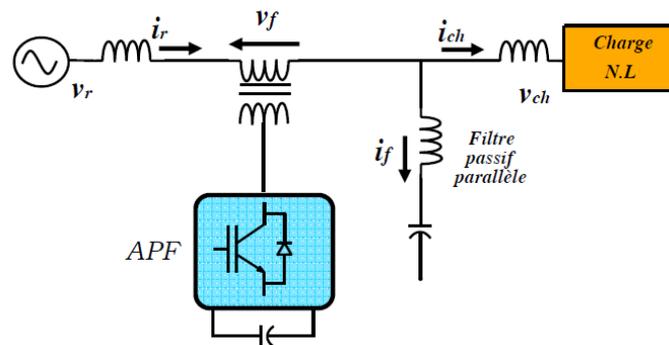


Figure 1-3 : Filtre hybride série

b) Filtre actif parallèle :

Le filtre actif parallèle ou compensateur shunt, est connecté en parallèle sur le réseau électrique entre la source de tension et la charge non-linéaire. Il injecte dans le réseau le courant nécessaire afin de compenser les harmoniques de la charge polluante. Il est souvent commandé comme générateur de courant réglable [XU-04] [NI-96] [BE-98] [AK-90] [AL-00] [SI-99] [PE-99] [PE-98] [MO-02].

Ainsi, l'objectif du filtre actif parallèle est conçu pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive engendrés par la charge non linéaire, tout en s'adaptant aux évolutions du récepteur.

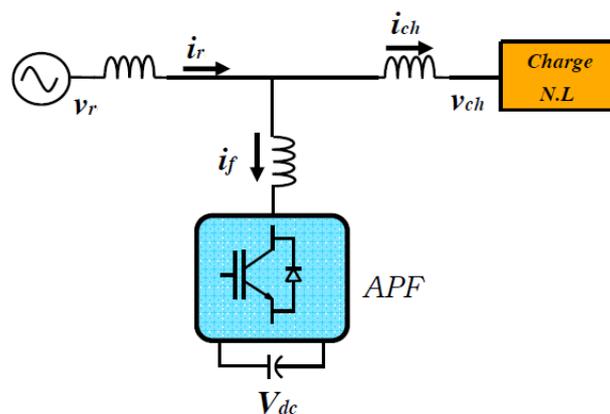


Figure 1-4 : Filtre actif parallèle

Il se trouve une autre topologie de FAP, en associant un FAP et un filtre passif série.

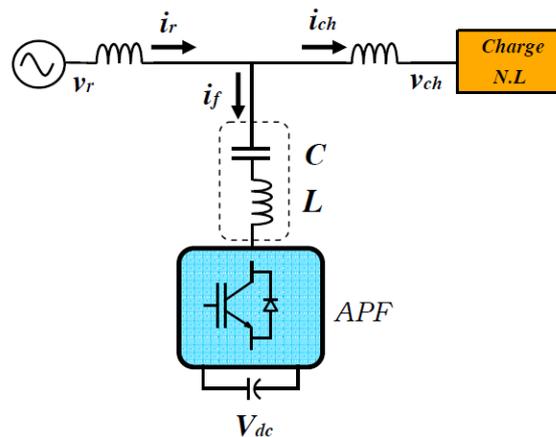


Figure 1-5 : Filtre hybride parallèle

c) Combinaison parallèle-série actifs :

C'est une solution de compensation universelle basée sur le fonctionnement simultané des filtres actifs parallèle et série et possède leurs avantages cumulés.

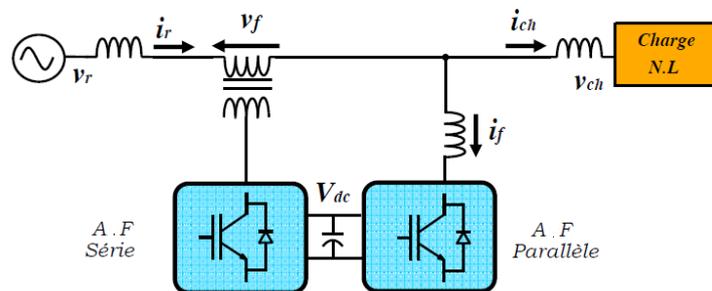


Figure 1-6 : Conditionneur universel de puissance

1.7.3. Comparatif et choix d'un FAP

Le Tableau 1-5 montre un récapitulatif des avantages et des inconvénients de cinq schémas de dépollution : renforcement de la puissance de court-circuit, filtrage passif, filtrage actif série, filtrage actif parallèle et le filtrage parallèle-série actifs.

En raison de la législation des normes de qualité de l'énergie (plutôt portée sur la compensation des harmoniques de courant) et les bonnes performances obtenues par le FAP, nous avons retenu cette topologie de compensation pour notre stratégie de dépollution des perturbations harmoniques.

Le bon fonctionnement du FAP est directement lié aux choix des techniques à utiliser dans la partie contrôle-commande.

1.8 Récapitulation :

Année	L'auteur	Evolution	Avantages et inconvénients
1976	GY	1 ^{ère} famille des FAPs conçue à partir d'onduleur à thyristor commandé en MLI	- Eliminer les harmoniques générées dans le réseau HVDC
1977	MO	1 ^{er} prototype de FAP avec thyristor à commutation naturelle pour compensation de courant harmonique.	- Génération des composants non désirée injectée à la fréquence de commutation.
1982	[AK-95]	1 ^{er} filtre actif parallèle de 800 KVA, composé d'un commutateur de courant à MLI et à thyristors GTO.	- Haute fréquence de commutation.
1996	[AK-05]	500 FAPs installé avec des puissances de 50 KVA-2MVA	-
1997	LA	Développement des FAP pour la compensation à la fois la puissance réactive, et/ou les harmoniques et les déséquilibres de courants dans les sites commerciaux et/ou industriels	-
1997	AU	1 ^{er} filtre multi-niveaux à plus de deux composants semi-conducteurs par bras.	- limitation des contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance - limitation des contraintes en tension subies par les interrupteurs de puissance
1998	S. Round et al.	FAP trois niveaux susceptible de délivrer les harmoniques dans des sites commerciaux et industriels	- permet l'utilisation d'une inductance de sortie de plus petite valeur en comparaison à la topologie deux niveaux.
2001	SN	Filtre multi-niveaux a capacité flottante avec commutation douce.	-
2001	-	1 ^{er} FAP connecté à un réseau moyen tension	-
2003	TA	Connexion d'un FAP monophasé à l'extrémité d'une ligne de traction de 25KV	- diminuer les harmoniques de tension 3,5 et 7 au point de connexion - fournir de la puissance réactive pour maintenir la tension sur la ligne.
2004	MI	Convertisseur en cascade asymétrique	-
2006	OR	Mise en cascade quatre onduleurs de tension monophasés en pont, à base d'interrupteurs à trois états différents permet de mettre en œuvre un filtre actif 81 niveaux	- de faible fréquence de commutation des composants - l'obtention de meilleures formes d'onde tension/courant - inconvénient du surcout
2005 et 2009 2003 et 2008	WU-NE AB- CH	Application des filtres actifs aux systèmes solaires Application aux aérogénérateurs	-
2010	RA	FAP à structure de tension avec sept niveaux d'onduleurs monophasés à pont complet montés en cascade.	- Obtention les courants de compensation adéquats par MLI multi-porteuse.

Tableau 1-3: récapitulatif de l'état d'évolution des topologies de filtres actifs et leurs domaines d'application

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les définitions relatives à la qualité de l'énergie électrique en citant leurs natures et origines (les différentes sources de perturbation) avec les critères d'évaluations de performances à l'image de la détermination du taux de distorsion d'harmoniques. Sans oublier d'énuméré certains effets néfastes sur les différents équipements connectés au réseau électrique.

Il s'en est suivi, la présentation des différentes solutions de dépollution du réseau électriques, les premières étant considéré comme solutions classiques tels les filtres passifs. Ces derniers ne sont pas très efficaces du fait qu'ils ne s'adaptent pas à l'évolution des réseaux électriques et des charges polluantes. Par contre, les secondes considérées comme des solutions modernes, à l'image des structures de filtre actif (série, parallèle), conditionneur de puissance. Ces topologie sont pour but de compenser les perturbations harmoniques, les déséquilibres ainsi dans certains cas, la puissance réactive de sorte à rendre les signaux tension ou le courant de réseau électrique sinusoïdaux.

Dans le chapitre suivant, nous allons présenter les méthodes d'identification des courants de références, les méthodes d'extraction des courants et des puissances, ainsi que la technique de génération des signaux de commande par hystérésis.

Chapitre 2
Topologies et
Stratégies de Commande
d'un Filtre Actif Parallèle

Introduction

L'insertion des filtres actifs parallèles (FAPs) dans le réseau électrique est une des solutions de dépollution des courants harmoniques produite principalement par les charges non-linéaire et circulant à travers les réseaux électriques. Nous nous limitons dans ce chapitre à la description de la topologie ainsi qu'à la présentation des stratégies de commande d'un filtre actif parallèle à structure de tension.

2.1. Structure d'un FAP à Structure Tension

La structure des filtres actifs se compose essentiellement d'une partie puissance et d'une partie commande.

- La partie puissance se compose d'un :
 - onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance (IGBT, MOSFET...) avec diodes en antiparallèle ;
 - d'un filtre de découplage et d'un condensateur lui servant de source de stockage d'énergie [NI-96].

- La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments semi-conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance. Elle est constituée d'un :
 - circuit d'identification des courants perturbés,
 - système à base PLL (boucle de verrouillage de phase) dépendant du choix de la méthode,
 - régulateur de la tension aux bornes de l'élément de stockage,
 - régulateur de courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.

Le schéma de principe d'un FAP à structure tension est donné par la figure 2-1:

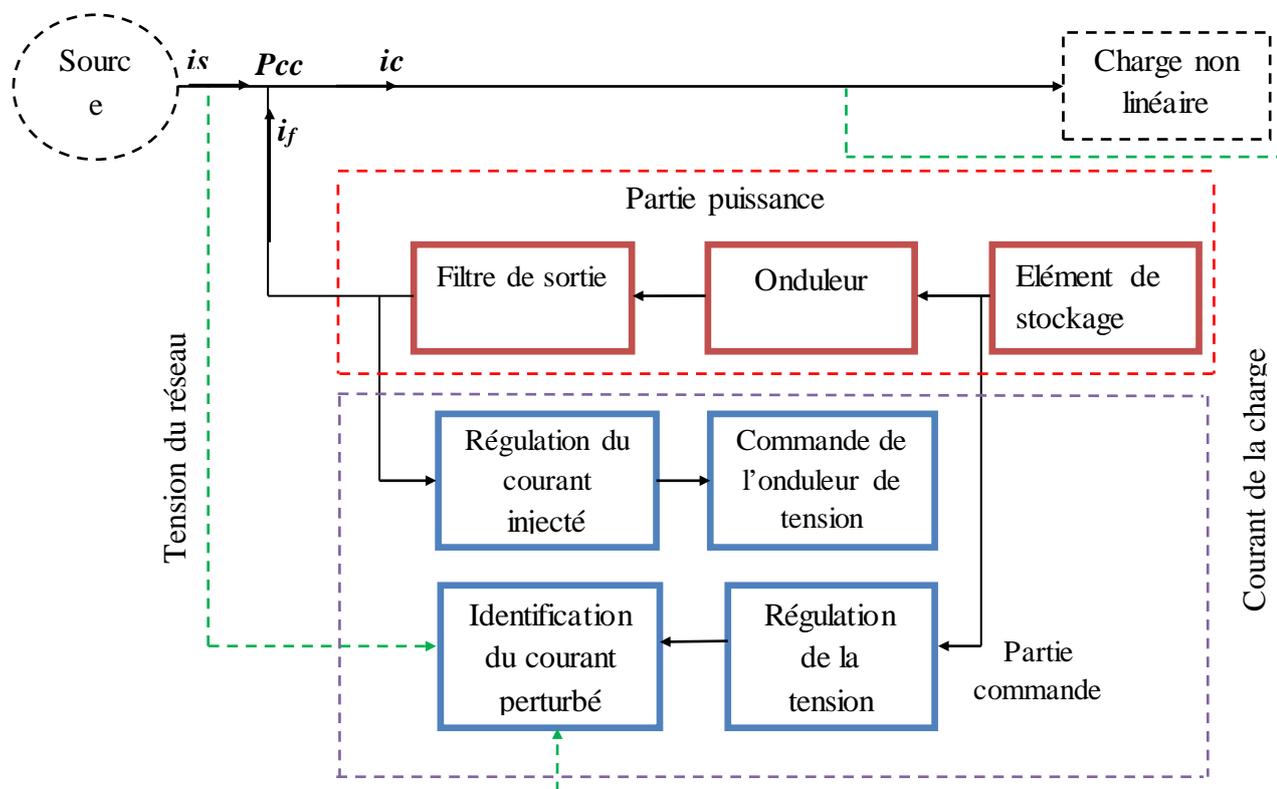


Figure 2-1 : Structure d'un FAP à Structure Tension

2.2. Topologies de filtres actifs parallèles

2.2.1. Onduleur de tension à trois bras avec condensateur à point milieu

Cette topologie de filtre actif de puissance est constituée de six interrupteurs réversibles en courant commandés à la fermeture et à l'ouverture (transistor bipolaire, IGBT, thyristors ou GTO) en antiparallèle avec une diode, formant les trois bras. Le quatrième bras est constitué de deux condensateurs dont le point milieu est relié au neutre du réseau électrique.

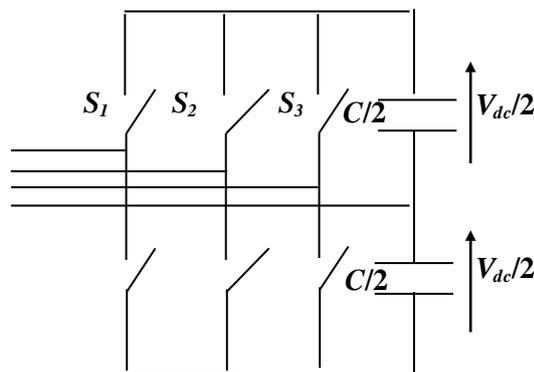


Figure 2-2 : Onduleur du filtre actif de puissance parallèle à trois bras avec condensateur à point milieu pour un réseau triphasé à quatre fils

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau 2-1 :

K	S_3	S_2	S_1	v_{f1}	v_{f2}	v_{f3}
0	0	0	0	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
1	0	0	1	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
2	0	1	0	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
3	0	1	1	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
4	1	0	0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
5	1	0	1	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$
6	1	1	0	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$
7	1	1	1	$V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$

Tableau 2-1 : Tensions générées par l'onduleur de tension à trois bras à condensateur à point milieu

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

$$v_{f1} = T_1 \frac{V_{dc}}{2} - (1 - T_1) \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.1)$$

$$v_{f2} = T_2 \frac{V_{dc}}{2} - (1 - T_2) \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.2)$$

$$v_{f3} = T_3 \frac{V_{dc}}{2} - (1 - T_3) \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.3)$$

$$\text{Avec } \begin{cases} S_i = 1 & \text{si } S_i \text{ est fermé} \\ S_i = 0 & \text{si } S_i + 3 \text{ est fermé} \\ & i: 1 \text{ à } 3 \end{cases}$$

2.2.2 Onduleur de tension à deux bras

La seconde topologie d'onduleur qui peut être utilisée dans un FAP à structure tension est l'onduleur de tension à deux bras. Son onduleur est constitué de :

- Quatre interrupteurs bidirectionnels en courant formant les deux bras. Ces composants sont également des semi-conducteurs commandés à la fermeture et à l'ouverture, comportant chacun une diode en antiparallèle.

- Le troisième bras est remplacé par deux condensateurs reliés par leur point milieu à la troisième phase du réseau électrique. Chacune des deux capacités C_{dc} joue le rôle d'une source de tension continue. La tension à leurs bornes est de $V_{dc}/2$, qui est également régulée suivant une valeur de consigne positive. [BE-04][RA-03] [AB-08]

La figure 2-3 représente schéma de principe de cette topologie. :

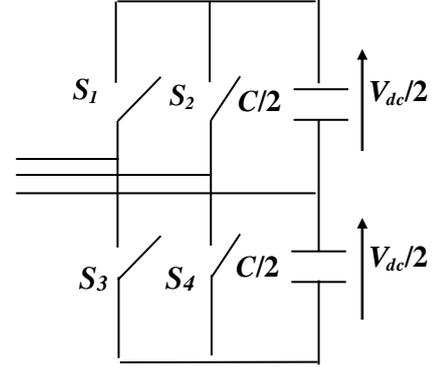


Figure 2-3 : Onduleur de tension à deux bras employé dans FAP à structure tension relié à un réseau électrique à trois fils.

Pour cette topologie, les signaux de commande (T_1, T_2) sont ainsi définis :

$$T_1 = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ fermé et } S_3 \text{ ouvert} \\ 0 & S_1 \text{ ouvert et } S_3 \text{ fermé} \end{cases} \quad (2.4)$$

$$T_2 = \begin{cases} 1 & S_2 \text{ fermé et } S_4 \text{ ouvert} \\ 0 & S_2 \text{ ouvert et } S_4 \text{ fermé} \end{cases} \quad (2.5)$$

Les tensions du réseau étant supposées équilibrées et sachant que la somme des courants injectés par l'onduleur est nulle, on peut écrire :

$$\begin{cases} v_{s1} + v_{s2} + v_{s3} = 0 \\ i_{f1} + i_{f2} + i_{f3} = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$v_{f1} = v_{sk} + L_f \frac{di_{fk}}{dt} + R_f i_{fk} \quad (2.7)$$

On peut déduire de (2.6) et (2.7) la relation suivante :

$$v_{f1} + v_{f2} + v_{f3} = 0 \quad (2.8)$$

Les tensions de sortie de l'onduleur sont définies par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} v_{f1} = v_{f1o} + f_{on} \\ v_{f2} = v_{f2o} + v_{on} \\ v_{f3} = v_{on} \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} v_{f1o} \\ v_{f2o} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2T_1 - 1 \\ 2T_2 - 1 \end{bmatrix} \frac{V_{dc}}{2} \quad (2.10)$$

En sommant les trois équations de (2.9) et en tenant compte des équations (2.6), nous obtenons :

$$v_{on} = -\frac{v_{f1o} + v_{f2o}}{3} \quad (2.11)$$

En substituant l'expression (2.11) dans (2.9), nous obtenons :

$$\begin{bmatrix} v_{f1} \\ v_{f2} \\ v_{f3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \\ \frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{f1o} \\ v_{f2o} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Puisque les variables T_1 et T_2 prennent chacune deux valeurs, on distingue pour cette topologie quatre commandes possibles, présentées dans le tableau 2-2 [HA-99].

Les tensions v_{f1} , v_{f2} et v_{f3} génèrent selon l'équation (2.7) les courants de sortie du filtre actif. Ces tensions peuvent également être représentées sous la forme d'un vecteur \vec{v}_f suivant les axes $\alpha\beta$. Les quatre vecteurs tensions correspondantes aux quatre possibilités de commande sont représentés à la figure 2-4.

M	T_1	T_2	v_{f1}	v_{f2}	v_{f3}	$\vec{v}_f(m)$
0	0	0	$-V_{dc}/6$	$-V_{dc}/6$	$V_{dc}/3$	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{6}} e^{-j\frac{2\pi}{3}}$
1	1	0	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	0	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} e^{-j\frac{2\pi}{6}}$
2	0	1	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/2$	0	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} e^{j\frac{2\pi}{3}}$
3	1	1	$V_{dc}/6$	$V_{dc}/6$	$-V_{dc}/3$	$\frac{V_{dc}}{\sqrt{6}} e^{j\frac{\pi}{3}}$

Tableau 2-2 Tensions générées par l'onduleur de tensions à deux bras

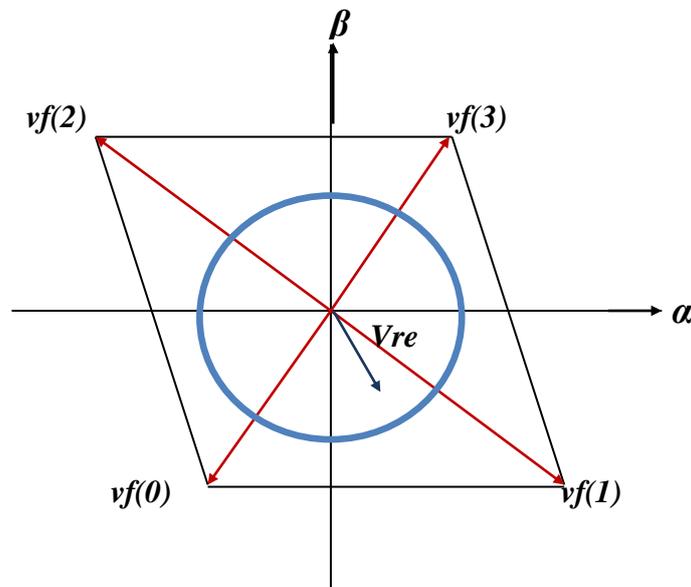


Figure 2-4 Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur de tension à deux bras

2.3. Système de stockage de l'énergie

Le système de stockage d'énergie dans un onduleur de tension est un condensateur (C_{dc}), qui joue le rôle d'une source de tension continue (V_{dc}). Ce condensateur doit emmagasiner une quantité d'énergie, mais à cause des pertes dans les interrupteurs, elle reçoit son énergie du réseau à travers l'onduleur. Pour son fonctionnement, la tension V_{dc} est maintenue constante afin de remédier aux fluctuations qui peuvent affecter la qualité du filtrage [EP-10].

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 seules les premières harmoniques sont prises en compte dans le choix des paramètres du système de stockage.

2.4. Filtre de sortie

Le rôle du filtre de sortie est d'assurer la connexion de l'onduleur de tension au réseau électrique qui est considéré comme un générateur de courant harmonique. Il doit empêcher la propagation, dans le réseau électrique, des composantes dues aux commutations des semi-conducteurs (filtre).

En général, dans les FAP, un filtre de sortie du premier ordre est utilisé, composé d'une inductance L_f et de résistance interne R_f . Une valeur relativement faible de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP.

2.5. Stratégies de contrôle d'un filtre actif parallèle à structure tension

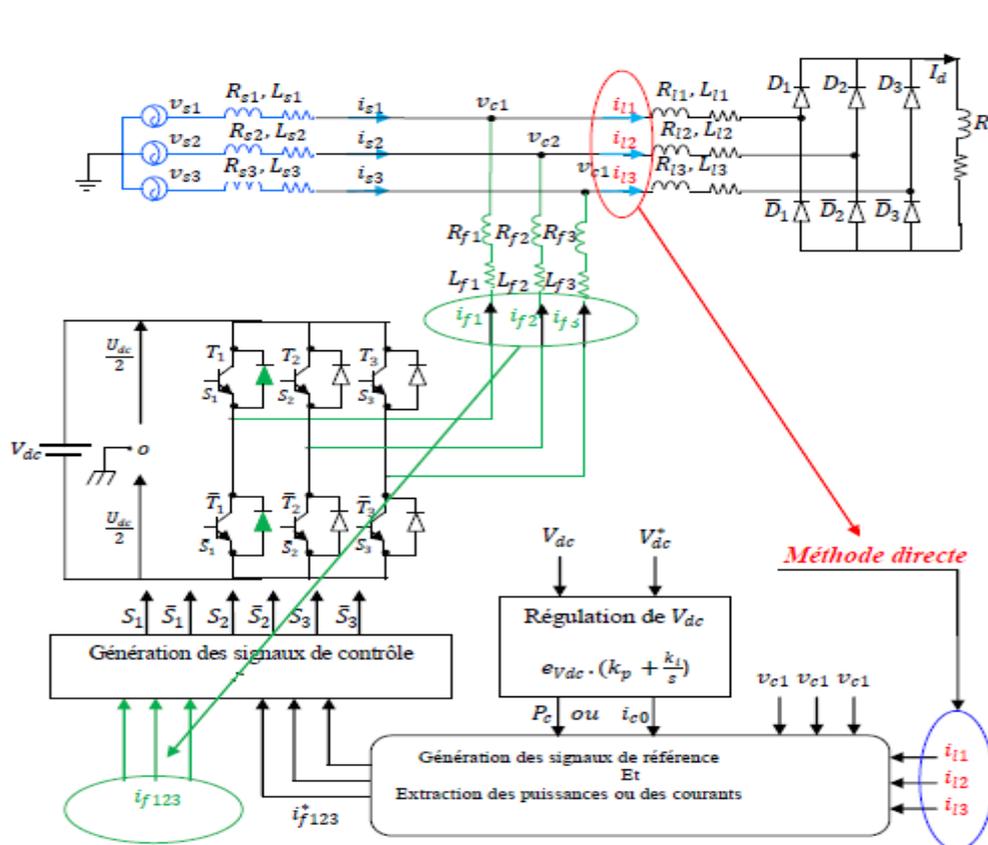
La partie contrôle d'un FAP réalise trois fonctions principales :

- L'identification des courants de référence,
- La poursuite des courants de référence,
- La régulation de la tension continue.

2.5.1. Identification des courants de références :

2.5.1.1. Stratégie de commande directe :

La commande dite directe, est basée sur la comparaison du courant de référence $i_{ref}(t)$ obtenu par une méthode appropriée à partir de la mesure du courant de la charge polluante $i_c(t)$, au courant injecté par le filtre actif de puissance $i_f(t)$, comme le montre



la figure

2-5.

[BE-04]

[NI-96]

Figure 2-5 Commande directe d'un filtre actif parallèle

• **Méthode des puissances active et réactive instantanées p-q**

Cette méthode d'identification des courants harmoniques a été introduite par H.AKAGI qui consiste à identifier la composante continue des puissances active et réactive instantanées. Elle exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer ses puissances instantanées. La composante fondamentale est transformée en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes oscillatoires.

Son principe est énoncé comme suit : on note respectivement les tensions simples de source par $v_{s1}(t)$, $v_{s2}(t)$, $v_{s3}(t)$ et les courants de ligne par $i_{c1}(t)$, $i_{c2}(t)$, $i_{c3}(t)$ d'un système triphasé équilibré :

$$[v_s] = \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$[i_c] = \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La transformation de Concordia permet de ramener le système triphasé à un système diphasé dont les axes sont en quadrature, comme le montre les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c1} \\ i_{c2} \\ i_{c3} \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Les puissances instantanées réelle et imaginaire notées respectivement p et q , sont exprimés par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés, on trouve :

$$p = v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta} = v_{s1}i_{c1} + v_{s2}i_{c2} + v_{s3}i_{c3} \quad (2.21)$$

$$q = v_{\alpha}i_{\beta} - v_{\beta}i_{\alpha} = -\frac{1}{\sqrt{3}}[(v_{s1} - v_{s2})i_{c3} + (v_{s2} - v_{s3})i_{c1} + (v_{s3} - v_{s1})i_{c2}] \quad (2.22)$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

Avec : \bar{p}, \bar{q} : les composantes continues de p et q,

\tilde{p}, \tilde{q} : les composantes oscillatoires de p et q.

De l'équation (2.20), nous pouvons déduire les composantes de courant correspondantes :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

En introduisant (2.22) dans (2.23), les courants dans les axes α - β deviennent :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Suivant la fonction que nous donnons au filtre actif de puissance, nous pouvons compenser soit les harmoniques de courant et l'énergie réactive ou uniquement l'un des deux. Le tableau suivant résume les modes de compensations possibles.

Compensations			
Paramètre de contrôle	Harmoniques de courants	Energie réactive	harmoniques de courant et de l'énergie réactive
	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$	$p_f = 0$ et $q_f = \bar{q}$	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = q$

Tableau 2-3 : Modes de compensation de la commande des puissances instantanées

Si nous voulons par exemple compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive en même temps, l'équation (2.25) devient :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Les courants harmoniques triphasés i_{fk}^{ref} ($k = 1, 2, 3$) sont obtenus à partir des courants diphasés $i_{f\alpha}^{ref}$ et $i_{f\beta}^{ref}$ par la transformation inverse de Concordia soit :

$$\begin{bmatrix} i_{f1}^{ref} \\ i_{f2}^{ref} \\ i_{f3}^{ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^{ref} \\ i_{f\beta}^{ref} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Stratégie de commandes indirecte

La commande dite indirecte, à la différence de la précédente, compare les courants de références $i_{ref}(t)$ produits par une méthode appropriée, avec le courant de source $i_s(t)$, comme le montre la figure 2-5. [BE-04] [NI-96]

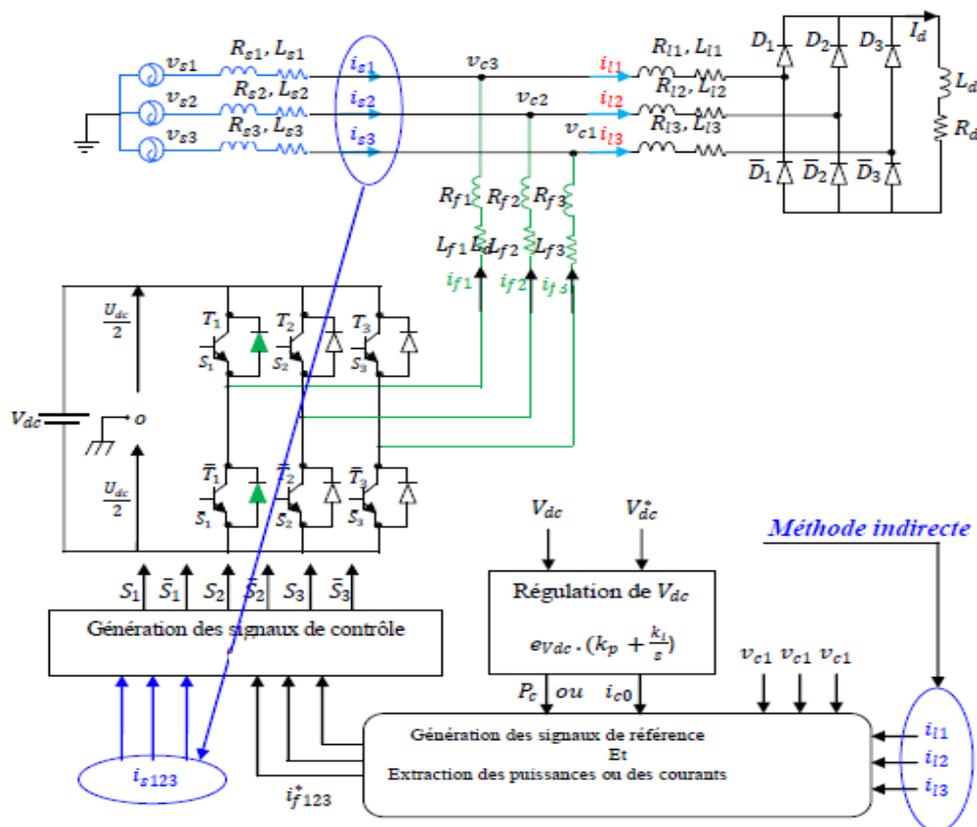


Figure 2-6 Commande directe d'un filtre actif parallèle.

- **Méthode des puissances active et réactive instantanées p-q**

Son principe est énoncé comme suit :

Les puissances instantanées réelle et imaginaire notées respectivement p et q , sont exprimés par la relation suivante :

$$p = v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta} \quad (2.28)$$

La puissance réelle instantanée peut être exprimée comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2.29)$$

Avec \bar{p} la composante continue et \tilde{p} la composante oscillatoire. Les composantes de courant en $\alpha - \beta$ sont données par les expressions suivantes :

$$i_{\alpha} = \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p \quad (2.30)$$

$$i_{\beta} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p \quad (2.31)$$

En introduisant (2.29) dans (2.30) et (2.31) on aura :

$$i_{\alpha} = \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \bar{p} + \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \tilde{p} \quad (2.32)$$

$$i_{\beta} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \bar{p} + \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \tilde{p} \quad (2.33)$$

Dans ce cas précis, on peut faire uniquement la compensation simultanée de l'énergie réactive et des courants harmoniques, lorsque $p_f = \bar{p}$. Ainsi, nous obtenons :

$$i_{s\alpha}^{ref} = \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p_f \quad (2.34)$$

$$i_{s\beta}^{ref} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} p_f \quad (2.35)$$

Par cette méthode nous pouvons compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive.

Les courants harmoniques triphasés i_{fk}^{ref} ($k = 1, 2, 3$) sont obtenus à partir des courants diphasés $i_{f\alpha}^{ref}$ et $i_{f\beta}^{ref}$ par la transformation inverse de Concordia équation (2.27).

2.5.2. Extraction des puissances et des courants harmoniques

Le choix de la méthode utilisée pour l'extraction du courant harmonique du courant ou de la puissance de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique...) [ALA-02] [ESP-96] [AMA-09]

Extraction par un filtre passe bas :

L'utilisation d'un filtre passe-bas ou passe-haut pour l'extraction des composantes harmoniques, permet d'obtenir une élimination plus ou moins suffisante de la composante continue.

Nous avons utilisé dans notre étude un filtre passe-bas du deuxième ordre.

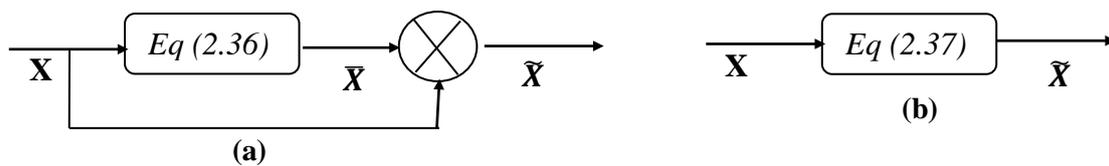


Figure 2-7 Extraction par des filtres classiques

a) Filtre passe- bas (FPB)

b) Filtre passe-haut (FPH)

La fonction de transfert d'un filtre passe- bas de deuxième ordre, est définie par :

$$H_{FPB} = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (2.36)$$

Pour la fonction de transfert d'un filtre passe-haut de deuxième ordre, elle est définie par :

$$H_{FPH} = \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (2.37)$$

$$\xi: 0.707 \quad ; \quad f_c = 40\text{Hz}$$

• **Extraction par un filtre ADALINE :**

Le réseau de neurones adaptatif dit Adaline (ADaptive LINear Element/ ADaptive LInear NEuron) appartient à la famille des perceptrons. Il possède un seul neurone à fonction d'activation linéaire et une entrée sous forme d'un vecteur (pouvant avoir plusieurs éléments).

Il a été proposé et développé par Widrow (Widrow et Walach, 1996). Ses principales applications se trouvent dans le filtrage adaptatif et dans la prédiction des signaux.

Le procédé de filtrage par le réseau neuronal Adaline, pour une simple application de l'estimation de valeur constante, un apprentissage par la loi des moindres carrés (LMS) est utilisé pour simplifier le calcul. Par conséquent, le filtre utilisé peut être présentée par les équations suivantes :

$$w_{k+1} = w_k + \eta e_k x_k \tag{2.38}$$

$$\hat{y}_k = w_k x_k \tag{2.39}$$

$$e_k = \hat{y}_k - y_k \tag{2.40}$$

Avec : k : l'indice de temps de l'itération, w_k : poids d'Adaline , x_k : Variable d'entrée de l'Adaline, \hat{y}_k : La sortie estimée, y_k : L'entrée mesurée , η : Le taux d'apprentissage de l'Adaline (facteur de réduction).

La figure suivante illustre la structure du système de détection basé sur Adaline

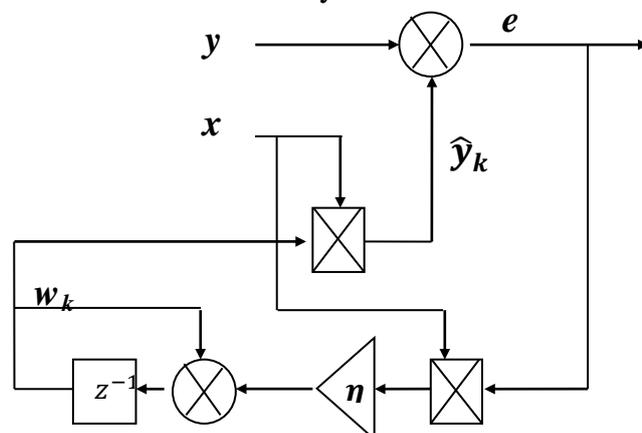


Figure 2-8 Schéma de détection à base d'Adaline

• **Extraction par un filtre multi-variable (FMV)**

Le filtre multi-variable est très important pour construire une méthode d'extraction insensible dans le cas de déséquilibre de la tension d'alimentation, soit pour le calcul des puissances instantanées ou pour l'utilisation d'un circuit à PLL. Song Hong Scok a présenté dans ces travaux, la manière de recouvrir la fonction de transfert équivalente d'une intégration dans la référence synchrone exprimée par :

$$V_{xy} = e^{j\omega t} \int e^{-j\omega t} U_{xy}(t) dt \quad (2.41)$$

Les résultats de ses travaux lui ont permis d'aboutir à une fonction de transfert de la forme :

$$H(s) = \frac{V_{xy}(s)}{U_{xy}(s)} = \frac{s + j\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (2.42)$$

Avec cette fonction de transfert, il a démontré que le signal de sortie est en phase avec le signal d'entrée, avec l'effet de l'intégration sur son amplitude. Si nous ajoutons des constantes k_1 et k_2 dans cette fonction de transfert, nous aurons la fonction de transfert suivante :

$$H(s) = \frac{V_{xy}(s)}{U_{xy}(s)} = k_2 \frac{(s + k_1) + j\omega}{(s + k_1) + \omega^2} \quad (2.43)$$

Le schéma de ce filtre est représenté par la figure 3.1 :

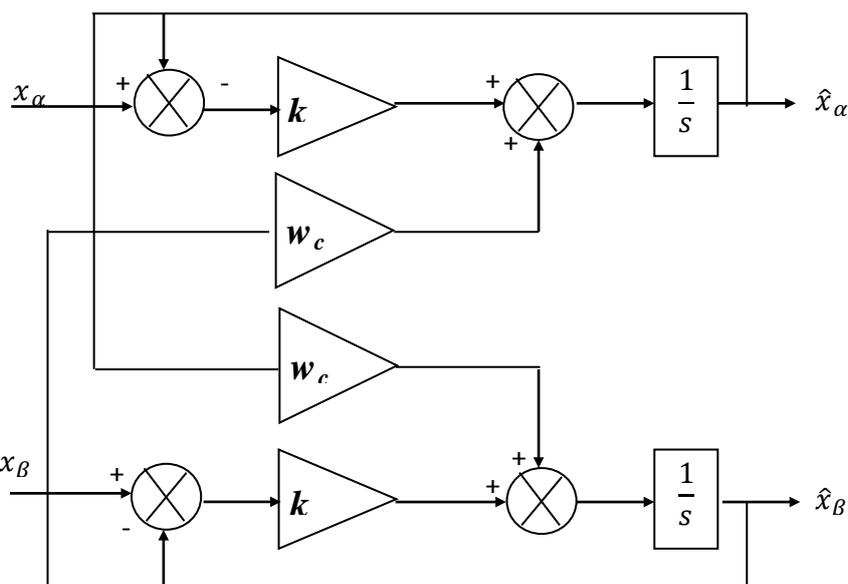


Figure 2-9 Structure d'un filtre multi-variable (FMV)

2.5.3. Poursuite des courants de référence

Après la détermination des courants de référence un contrôle des courants de sortie du FAP s'effectue de sorte qu'ils suivent au plus près leurs références. Le contrôle peut se faire par deux principales méthodes, à savoir :

- Contrôle par hystérésis.
- Contrôle par hystérésis modulé

2.5.3.1. Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire. Son principe consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur qui est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. Représenté par la figure (2-10).

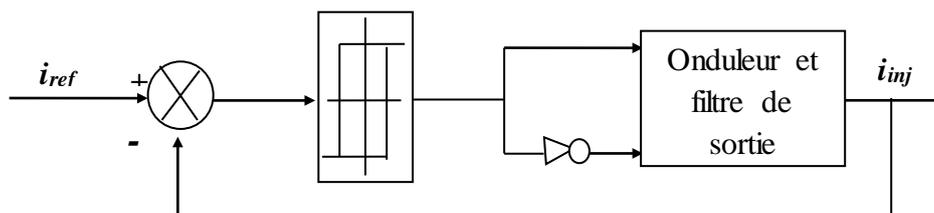


Figure 2-10 Schéma de la commande par hystérésis.

2.5.3.2. Commande par hystérésis modulée

La commande par hystérésis modulée permet de fixer la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Cette commande consiste à ajouter au signal d'erreur ε ($\varepsilon = i_{fref} - i_f$) un signal triangulaire (S_{tr}), de fréquence f_{tr} et d'amplitude A_{tr} . La fréquence f_{tr} doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis de largeur de bande $2Bh$ dont la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance. La figure (2-11) montre le principe de cette commande.

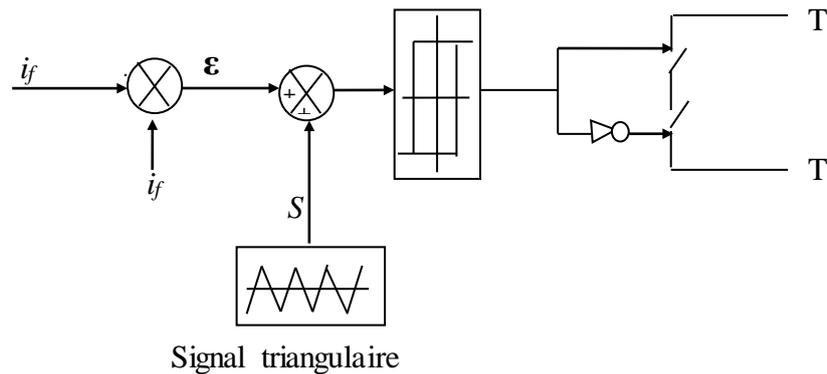


Figure 2-11 Commande par hystérésis modulée

2.5.4. Régulation de la tension :

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

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

2.5.4.1. Régulateur de type PI :

La variation de la tension V_{dc} aux bornes du condensateur de stockage dépend principalement de la valeur de la capacité C_{dc} . Le but principal de la régulation de la tension est de limiter les variations de la tension. Pour cela, un régulateur proportionnel (PI) est nécessaire, pour réguler la tension du condensateur à sa valeur de consigne V_{dc}^* :

$$V_{dc}(t) = \frac{1}{C} \int i_{dc} \cdot dt \quad (2.44)$$

Avec i_{dc} : courant circulant à travers le condensateur.

$$p_f = V_{dc} \cdot i_{dc} \Rightarrow p_f = \frac{1}{2} \cdot C_{dc} \cdot \frac{dV_{dc}^2}{dt} \quad (2.45)$$

Les schémas de cette régulation est illustré sur la figure suivante:

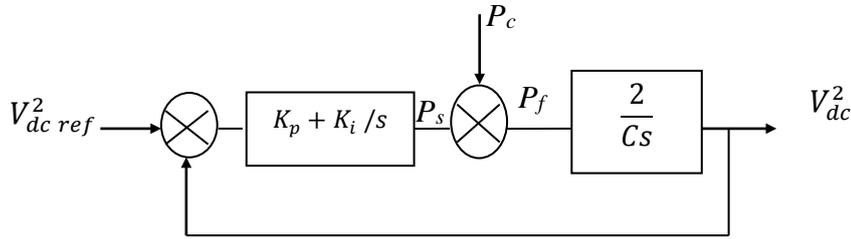


Figure 2-12 Régulation de V_{dc}

Sa fonction de transfert en boucle fermée est donnée par l'expression :

$$G(s) = \frac{\omega_c^2(1 + ks)}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (2.46)$$

Avec :

$$k = \frac{k_p}{k_i} \text{ et } k_i = \frac{k_{dc}\omega_c^2}{2}, k_p = \xi C_{dc}\omega_c \quad (\xi \text{ comprise entre } 0.5 \text{ et } 0.707)$$

Les paramètres k_p et k_i sont fonctions de ξ et ω_c d'où un choix judicieux de ces paramètres (amortissement, dépassement, temps de réponse)

2.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté en premier lieu les deux topologies des Filtres actif parallèles à condensateur point milieu à structure tension ainsi que leur modélisation.

Ensuite, on a présenté la théorie des quatre méthodes d'identifications, et les méthodes d'extraction ainsi que le contrôle des courants de références que nous allons utiliser dans la suite dans notre simulation.

A la fin, on a présenté les méthodes de contrôle des courants de références.

Chapitre 3
Résultats de simulation
en régime équilibré

Introduction

Dans ce présent chapitre, on va présenter les résultats de simulation obtenus pour un système équilibrés utilisant un Filtre actif parallèle a deux bras avec condensateur point milieu. Pour cela, on a appliqué quatre méthodes d'identification ainsi que deux angles d'amorçage des thyristors.

3.1. Présentation du système à simuler

Dans notre étude, on a défini le model ci-dessous de la figure 3-1 comme système d'étude où y est intégré une source triphasé équilibré alimentant une charge non-linéaire en plus de notre filtre actif de puissance parallèle.

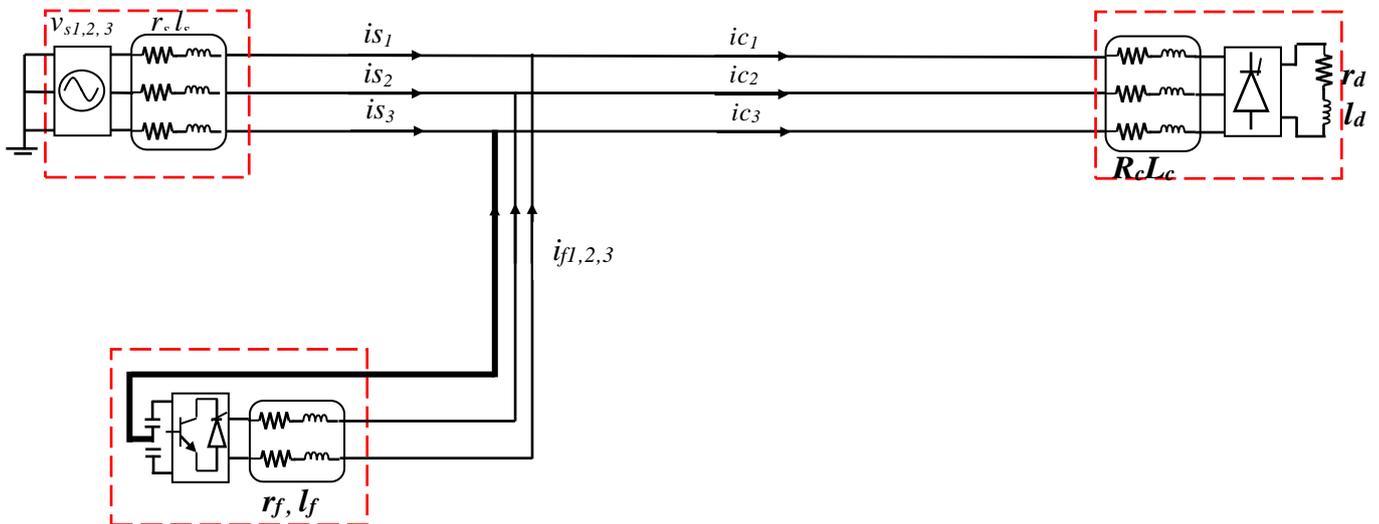


Figure 3-1 : Schémas du réseau avec FAP étudié

Dans un premier temps, nous nous proposons de mettre en évidence l'impact de la connexion d'une charge non-linéaire sur les caractéristiques électrique d'un réseau initialement équilibré. Pour cela, nous avons effectué une simulation sous environnement Matlab/Simulink SimPower, de sorte qu'un réseau électrique triphasé d'une puissance apparente S_n égale à 400KVA alimentant une charge non linéaire constitué par un pont redresseur à diode débitant sur une charge r - l , représentée par la figure ci-dessous.

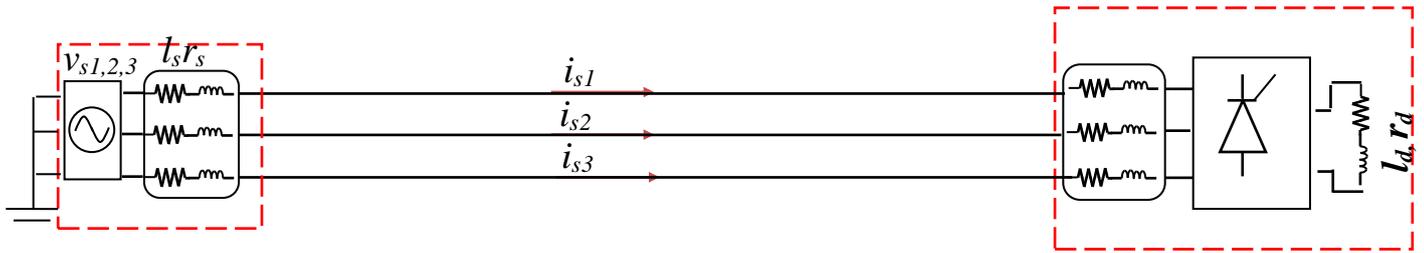


Figure 3-2 : Schémas de charge non-linéaire alimentant une charge r-l connecté au réseau triphasé à trois fils.

Les paramètres de simulation sont définis dans le tableau 3-1 :

V_s [V]	f [Hz]	r_s [m Ω]	l_s [μ H]	r_c [m Ω]	l_c [μ H]	r_d [Ω]	l_d [μ H]
240	50	1.59	45.56	2.73	23.19	0.79	2.6

Tableau 3-1 : Paramètres système simulé.

Vu que nous travaillons avec un régime équilibré, on se limitera à présenter les résultats de simulation pour une seule phase, en l'occurrence la phase 1.

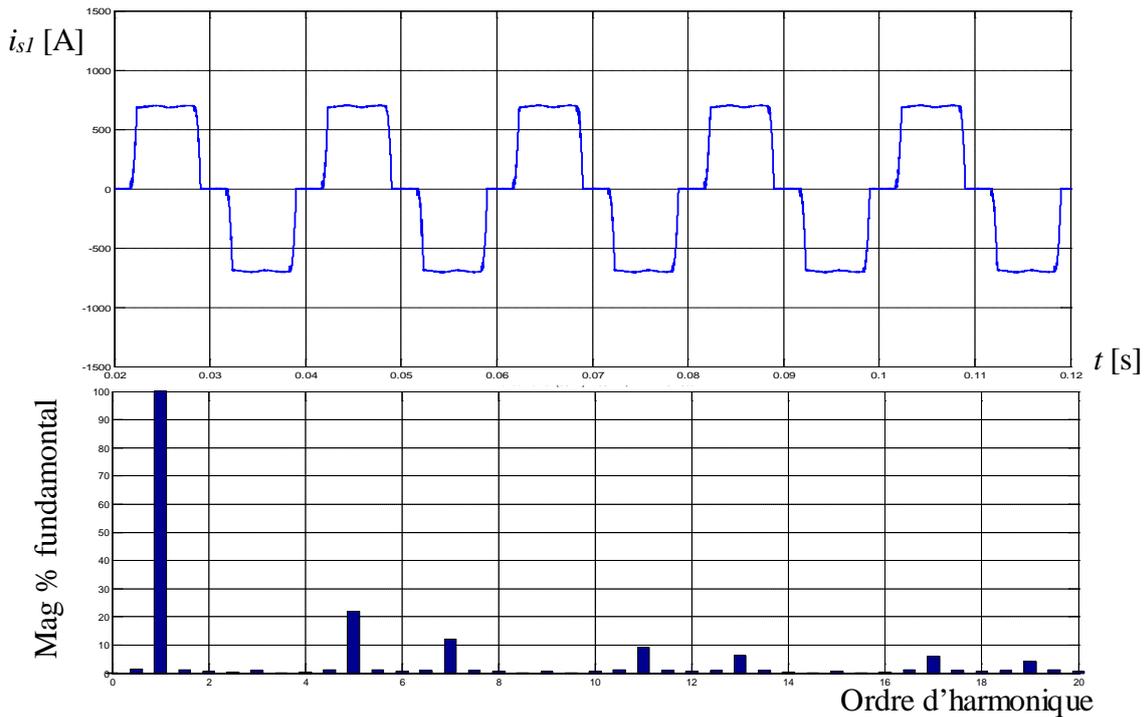


Figure 3-3 : Représentation des caractéristiques : (a) courants de source $i_{s1}=f(t)$ (b) FFT du courant de charge THD.

La figure 3-3 présente le courant de la charge non linéaire i_{ll} de la première phase ainsi que son spectre d'harmonique. Le taux de distorsion harmonique pour cette charge THD est de 24.10 %.

Le but du filtrage actif est de ramener ce THD à une valeur inférieure à 5%, comme l'impose la norme CEI.

3.2. Simulation de l'ensemble charge non linéaire- filtre actif de puissance

Dans ce paragraphe, nous allons présenter les résultats de simulation de l'ensemble réseau triphasé / charge non-linéaire / filtre actif parallèle en utilisant les quatre méthodes basées sur la commande directe et indirecte des puissances instantanées.

Les paramètres du filtre utilisé tout le long de notre travail sont les suivants :

V_{dc} [V]	C_{dc} [mF]	r_f [m Ω]	l_f [μ H]
700	6	5	100

Tableau 3-2 : Paramètres du FAP

3.2.1. Méthode directe des puissances instantanées

La figure 3-4 illustre bien la technique d'identification des courants de références lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la méthode des puissances instantanées.

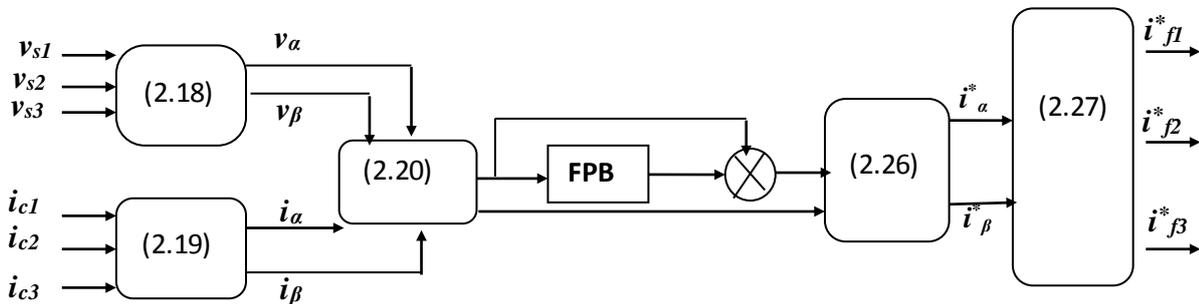


Figure 3-4 Commande directe d'un filtre actif de puissance appliquant la méthode des puissances instantanées

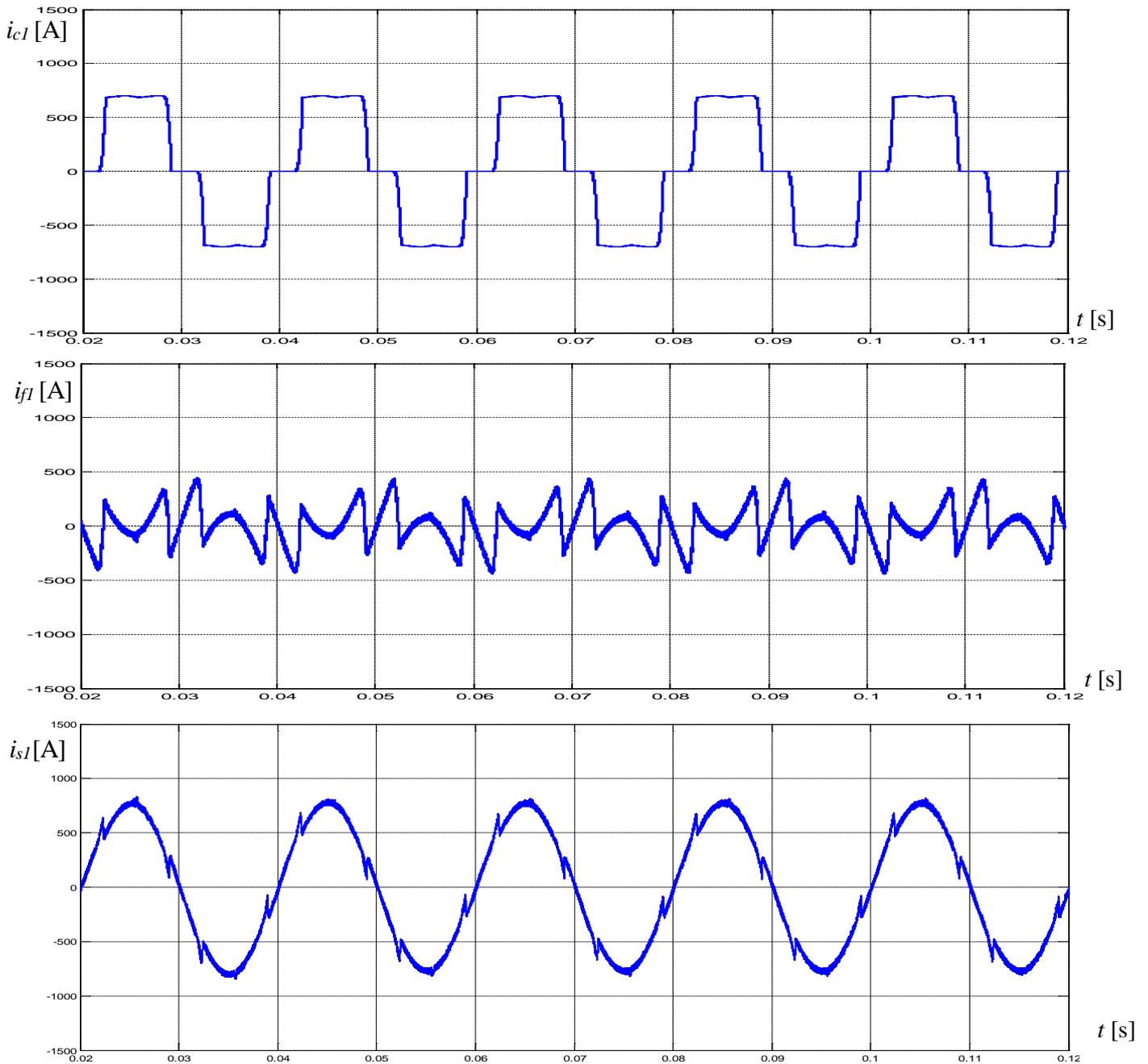


Figure 3-5 : Résultats de simulation de la méthode directe p-q en régime équilibré (a) i_{c1} : courant de charge de la 1^{ère} phase avant filtrage pour un angle d'amorçage des thyristors $\alpha=0^\circ$, (b) i_f : courant injecté par le filtre actif de puissance, (c) i_{s1} : courant de source de la 1^{ère} phase après filtrage.

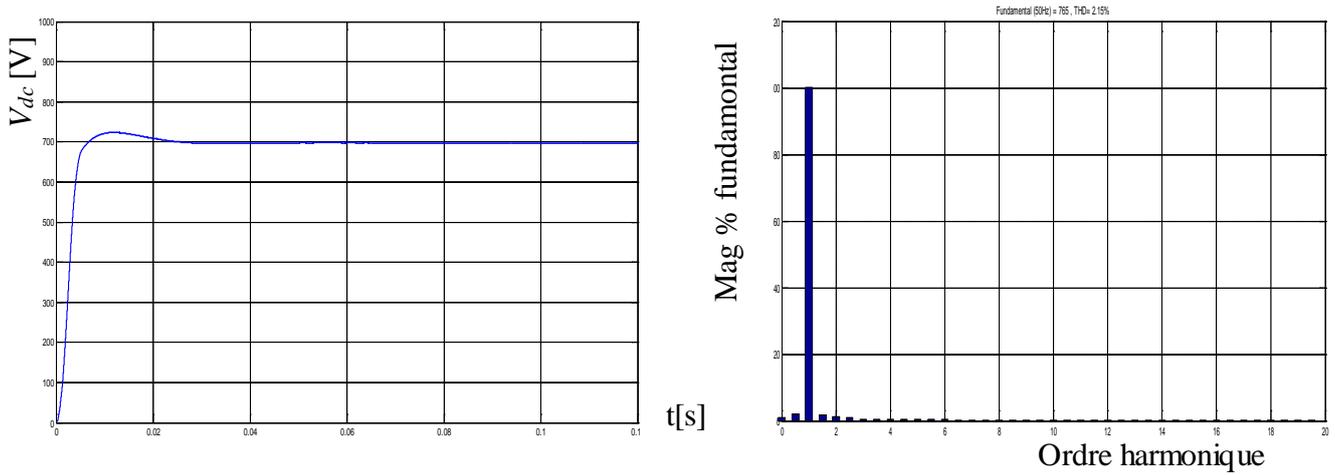


Figure 3-6 : Représentation de l'évolution des paramètres : (a) tension aux bornes du condensateur V_{dc} , (b) FFT du courant de source après filtrage

Le résultat obtenu lorsque nous utilisons la commande directe p-q, afin de commander un filtre actif de puissance à deux bras avec condensateur point milieu. Le THD après filtrage est égal à 2.19 %

3.2.2. Méthode indirecte des puissances instantanées :

La figure 3-7 illustre la méthode d'identification des courants de références lors de la compensation simultanée des courants harmoniques et de l'énergie réactive par la méthode des puissances instantanées.

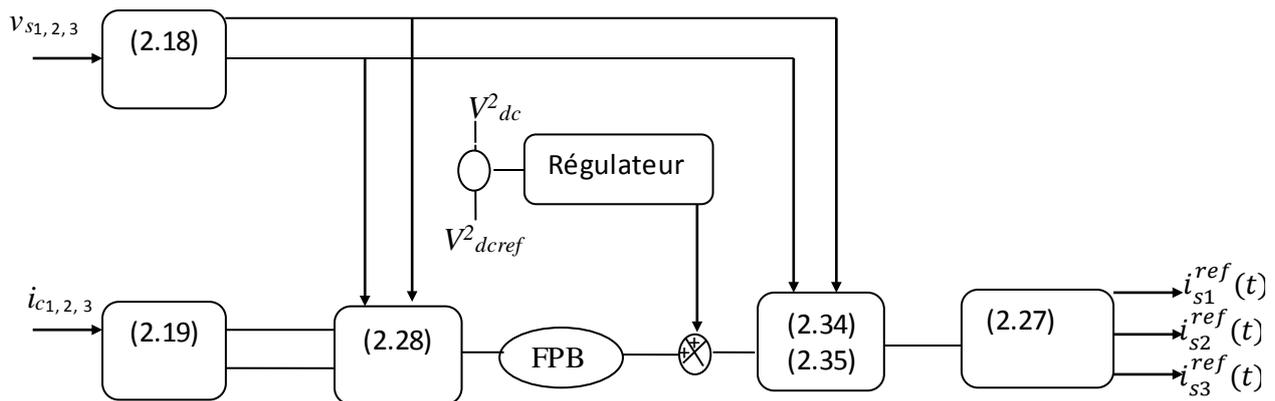


Figure 3-7 Commande indirecte d'un filtre actif de puissance appliquant la méthode des puissances instantanées.

Dans cette section, on présente les résultats obtenus lorsqu'on utilise une stratégie de commande indirecte pour un filtre actif parallèle à deux bras avec condensateur point milieu, en utilisant différents filtre (passe-bas, Adaline, FMV).

3.2.3. Méthode indirecte des puissances instantanées par un filtre passe-bas

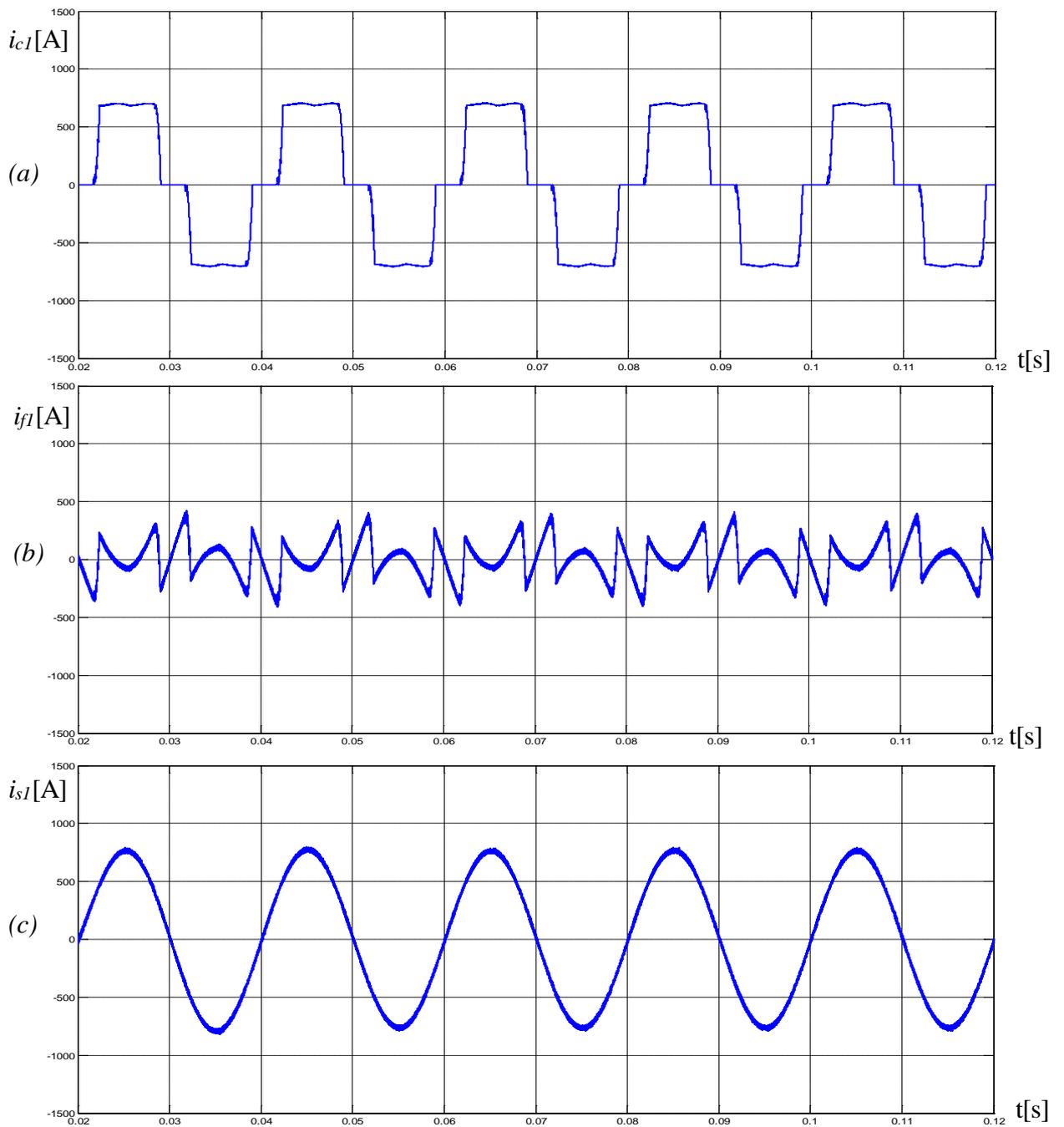


Figure 3-8 Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode indirecte p-q en régime équilibré avec filtre passe-bas
 (a) Courants de charges i_{c1} , (b) courants de filtre i_{f1} , (c) courants de source i_{s1}

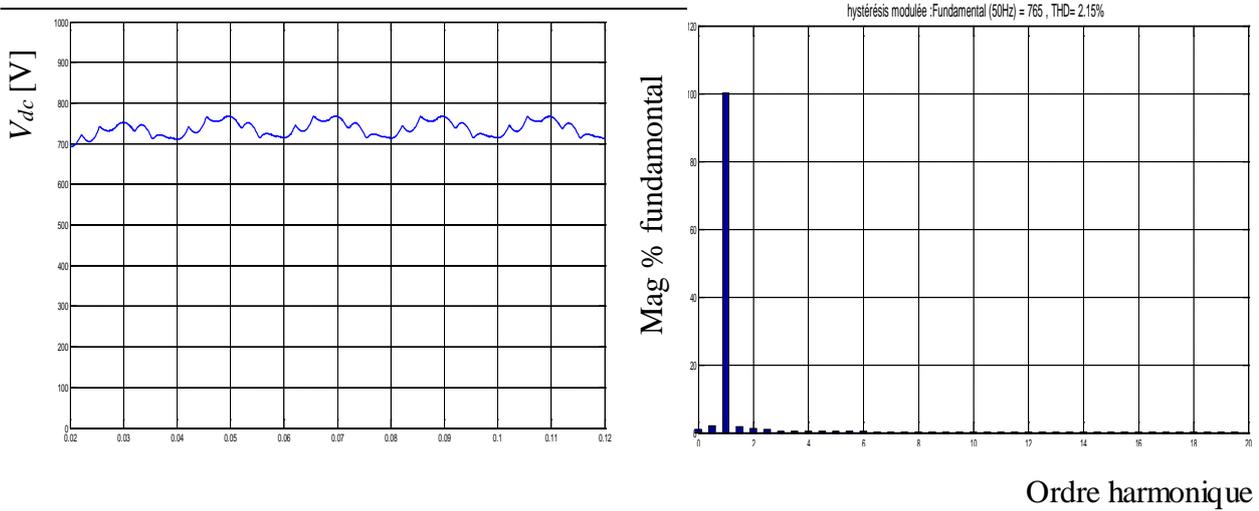


Figure 3-9 Représentation des caractéristiques (a) tension au borne du condensateur, (b) FFT du courant de source après filtrage THD

	hystérésis	hystérésis modulée
THD	4.76	2.15

3.2.4. Méthode des puissances instantanées modifiée :

Dans le cas d'utilisation d'un filtre FMV le schéma de commande devient comme le montre la figure 3-10 :

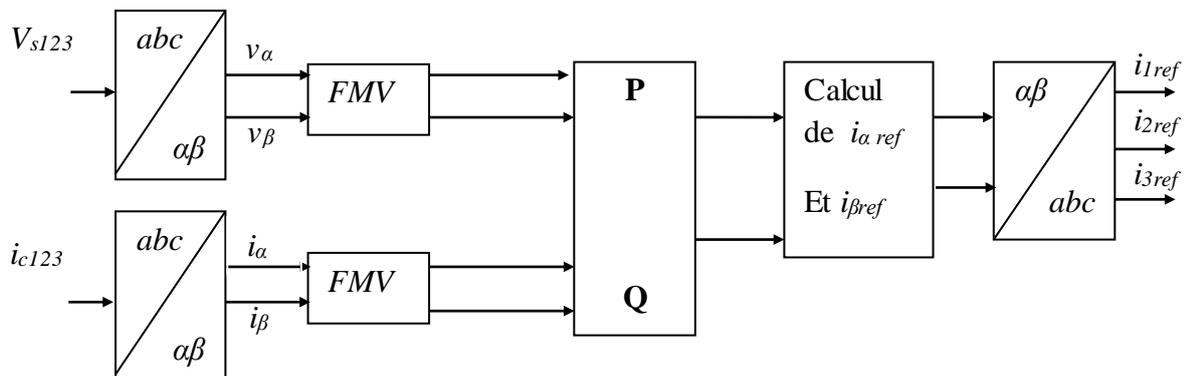


Figure 3-10 lois de commande directe d'un filtre actif de puissance appliquant la méthode des puissances instantanées utilisant un FMV

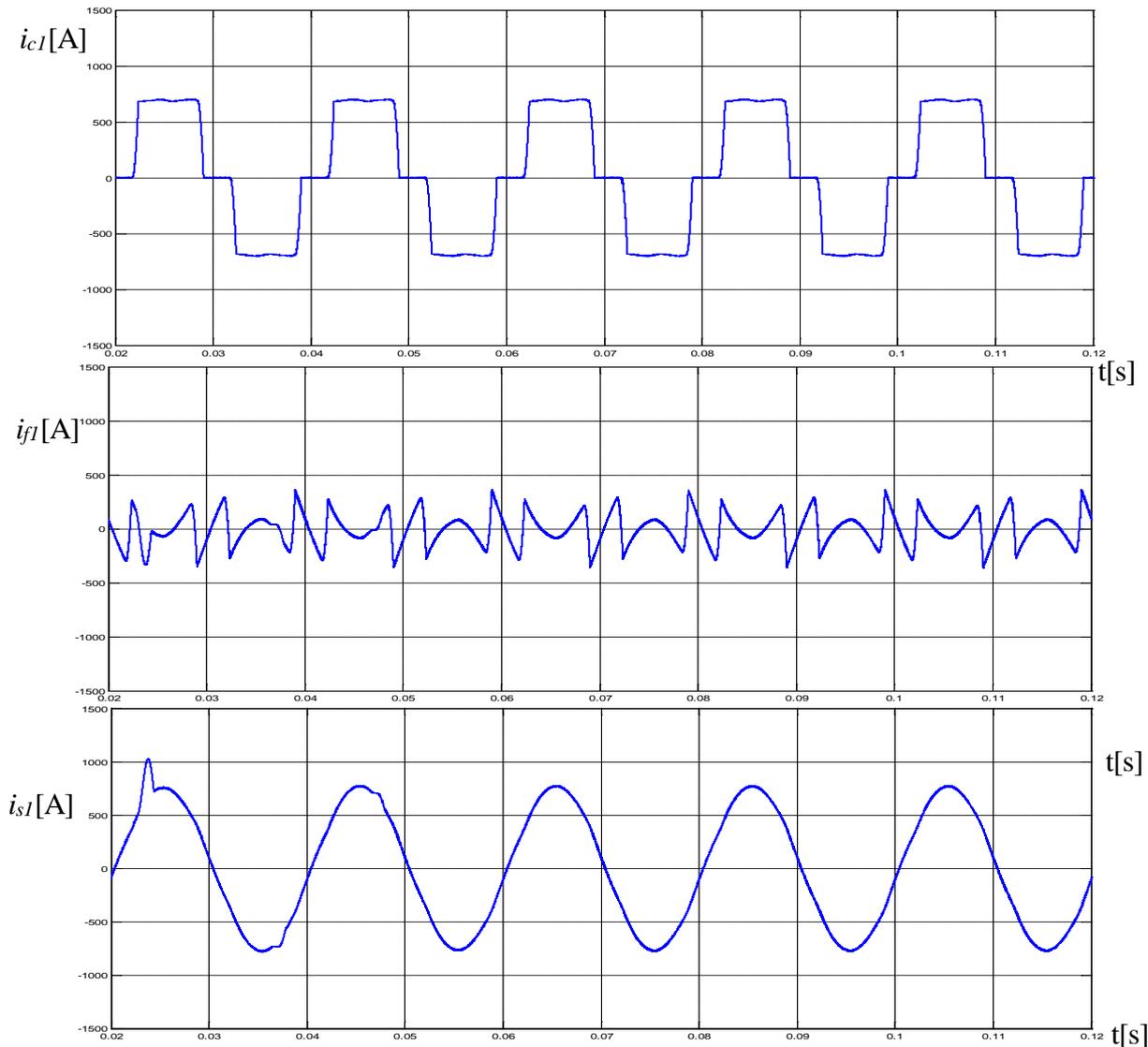


Figure 3-11 : Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode directe $p-q$ en régime équilibré avec Filtre multi-variable.
 (a) Courants de charge i_{cl} , (b) courants de filtre i_{fl} , (c) courants de source i_{sl}

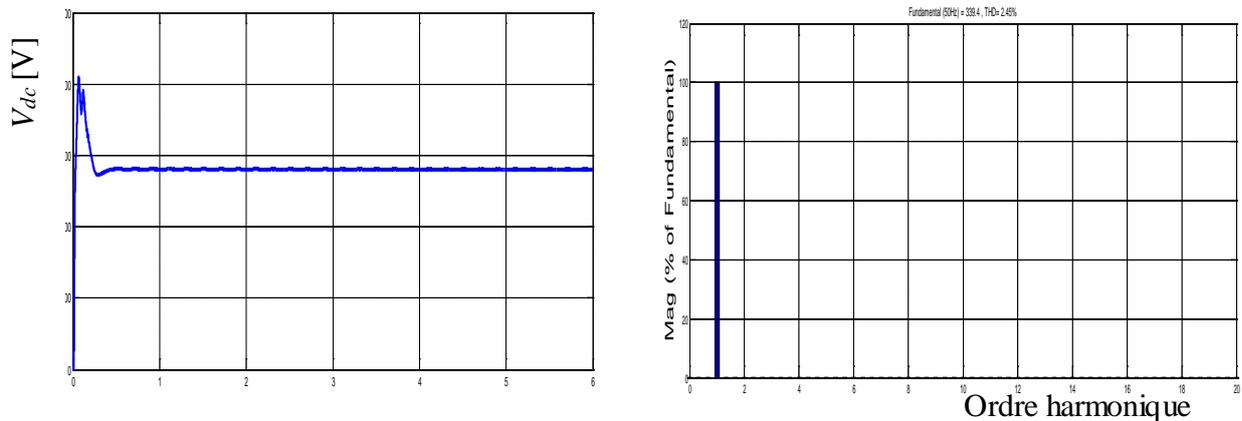


Figure 3-12 Représentation des caractéristiques (a) tension au borne du condensateur, (b) FFT du courant de source

Le THD obtenu par la méthode directe appliquant un filtre Multi-variable pour l'extraction des composantes harmoniques est de 2.45%

3.2.5. méthode indirecte des puissances instantanées par un filtre Adaline

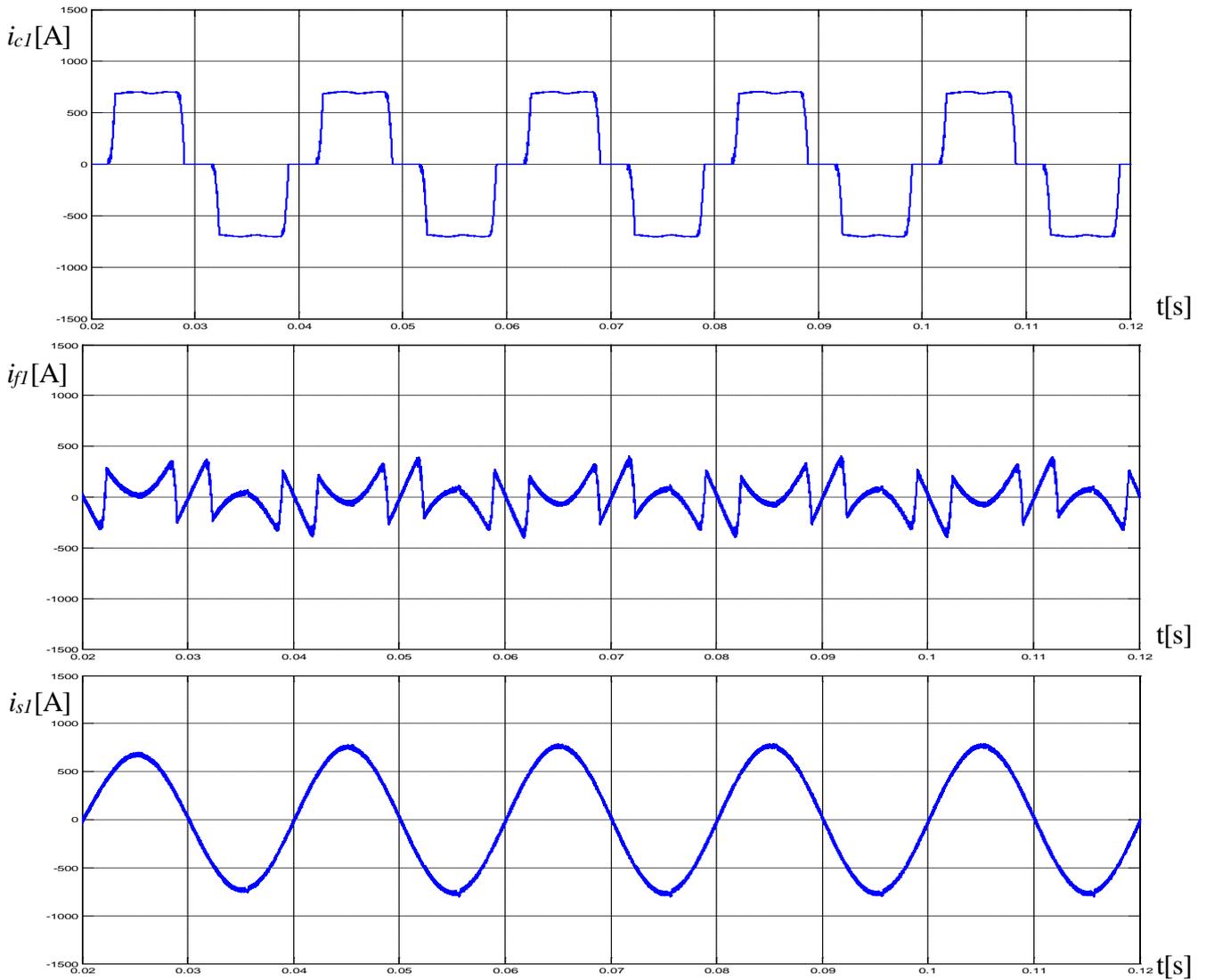


Figure 3-13 Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode indirecte p-q en régime équilibré avec filtre Adaline
 (a) Courants de charges i_{c1} , (b) courants de filtre i_{f1} , (c) courants de source i_{s1}

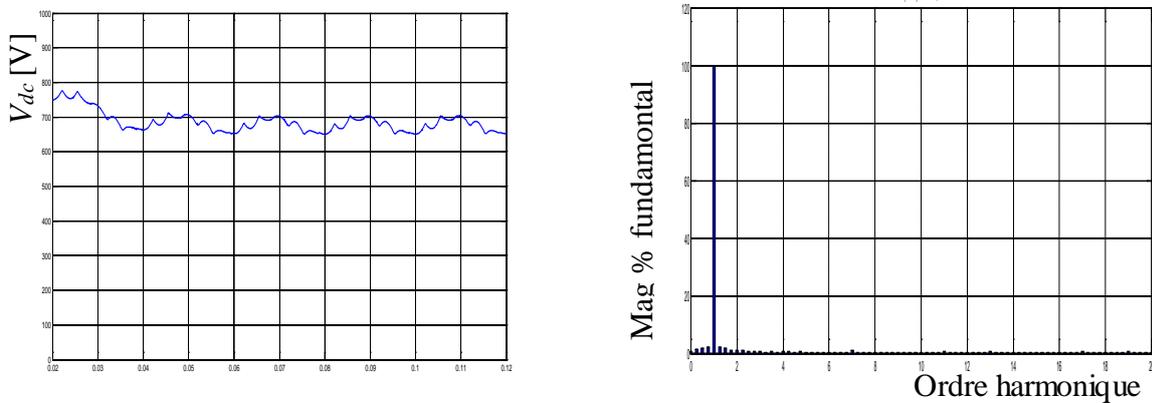


Figure 3-14 Représentation des caractéristiques (a) tension au borne du condensateur, (b) FFT du courant de source après filtrage THD

Le THD obtenu par la commande indirecte des puissances instantanées appliquant un filtre Adaline pour l'extraction des composantes harmoniques est 3.8%

3.3. Etude du comportement du système lors d'une variation de l'angle α

Dans la 2^{ème} partie, on change l'angle d'amorçage α de 0° à 30°

3.3.1. Commande directe basée sur les puissances instantanées :

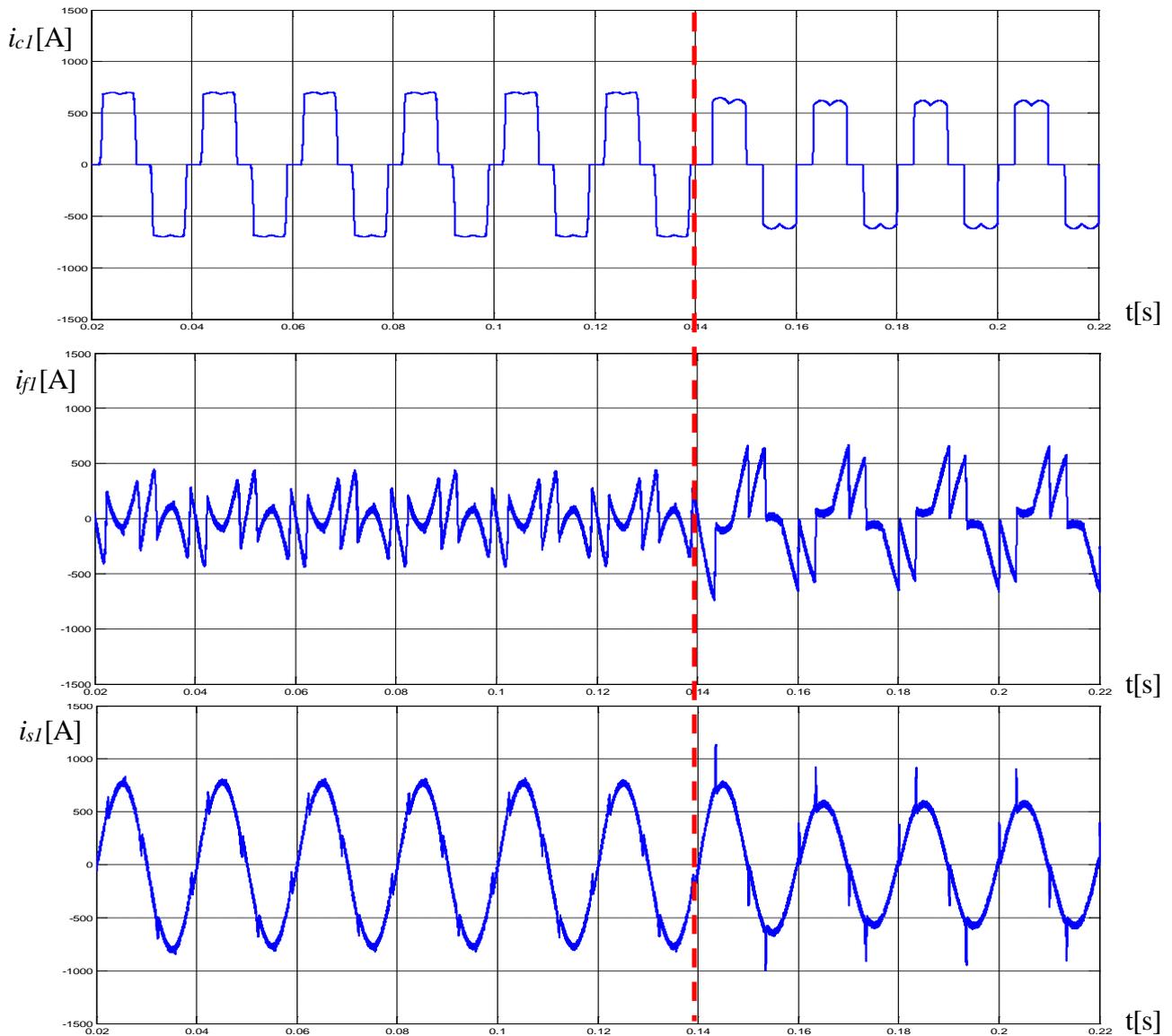


Figure 3-15 Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode directe p-q en régime équilibré avec angle d'amorçage 30°
 (a) Courants de charges i_{c1} , (b) courants de filtre i_{f1} , (c) courants de source i_{s1}

La figure 3-15 montre les résultats de simulation obtenus par la méthode directe des puissances instantanées suite à une variation de l'angle d'amorçage α de 0° à 30° .

3.3.2. Méthode indirecte des puissances instantanées par un filtre passe-bas

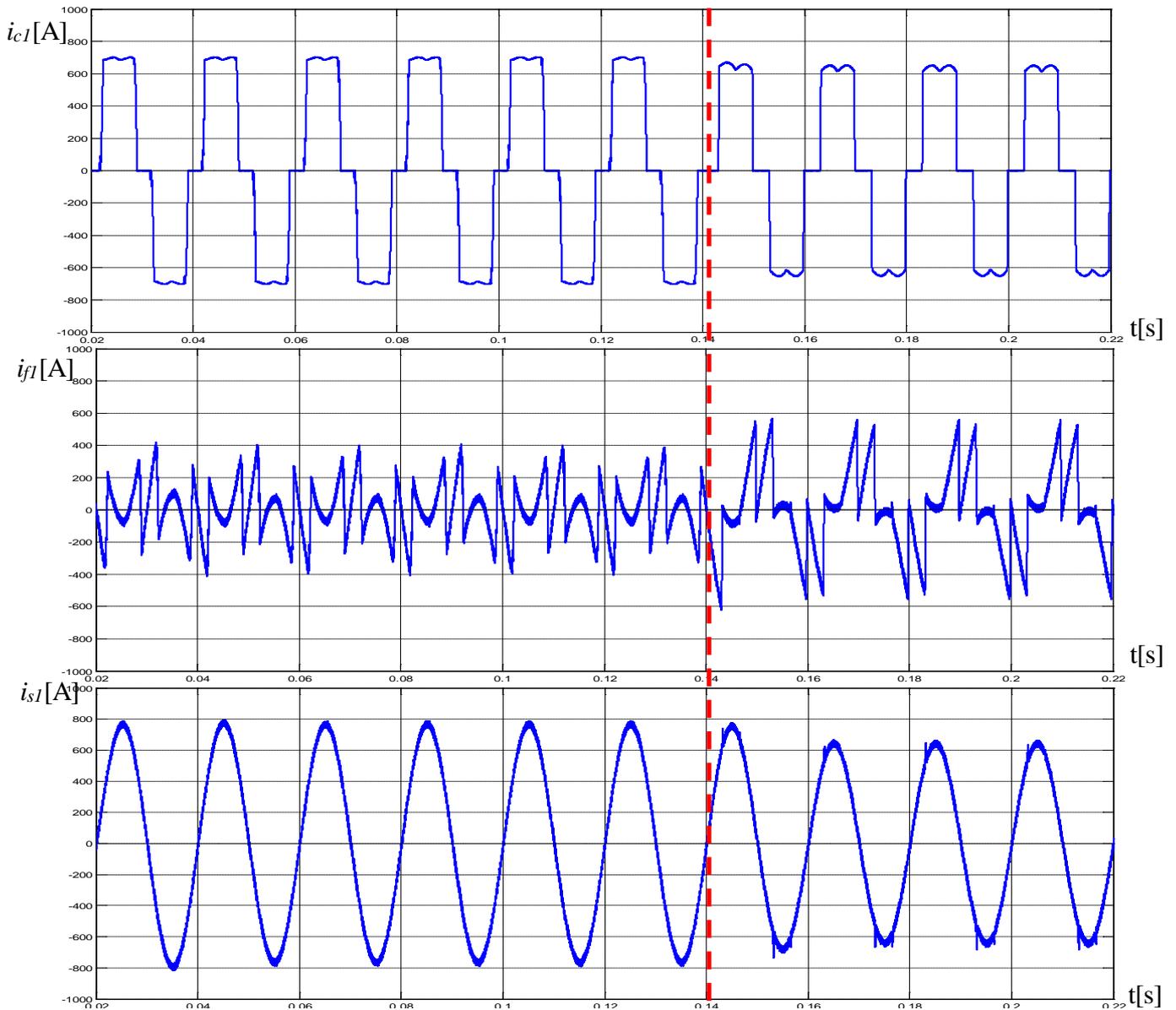


Figure 3-16 : Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode indirecte p-q en régime équilibré avec Filtre passe-bas pour $\alpha=30^\circ$.
 (a) Courants de charges i_{c1} , (b) courants de filtre i_{f1} , (c) courants de source i_{s1}

Après variation de l'angle d'amorçage des thyristors du pont redresseur de la charge, on remarque l'apparition d'un phénomène transitoire, au niveau des paramètres électriques du système. On remarque une diminution en amplitude des courants de charge ce qui est normal.

3.3.3. Méthode directe des puissances instantanées modifiée

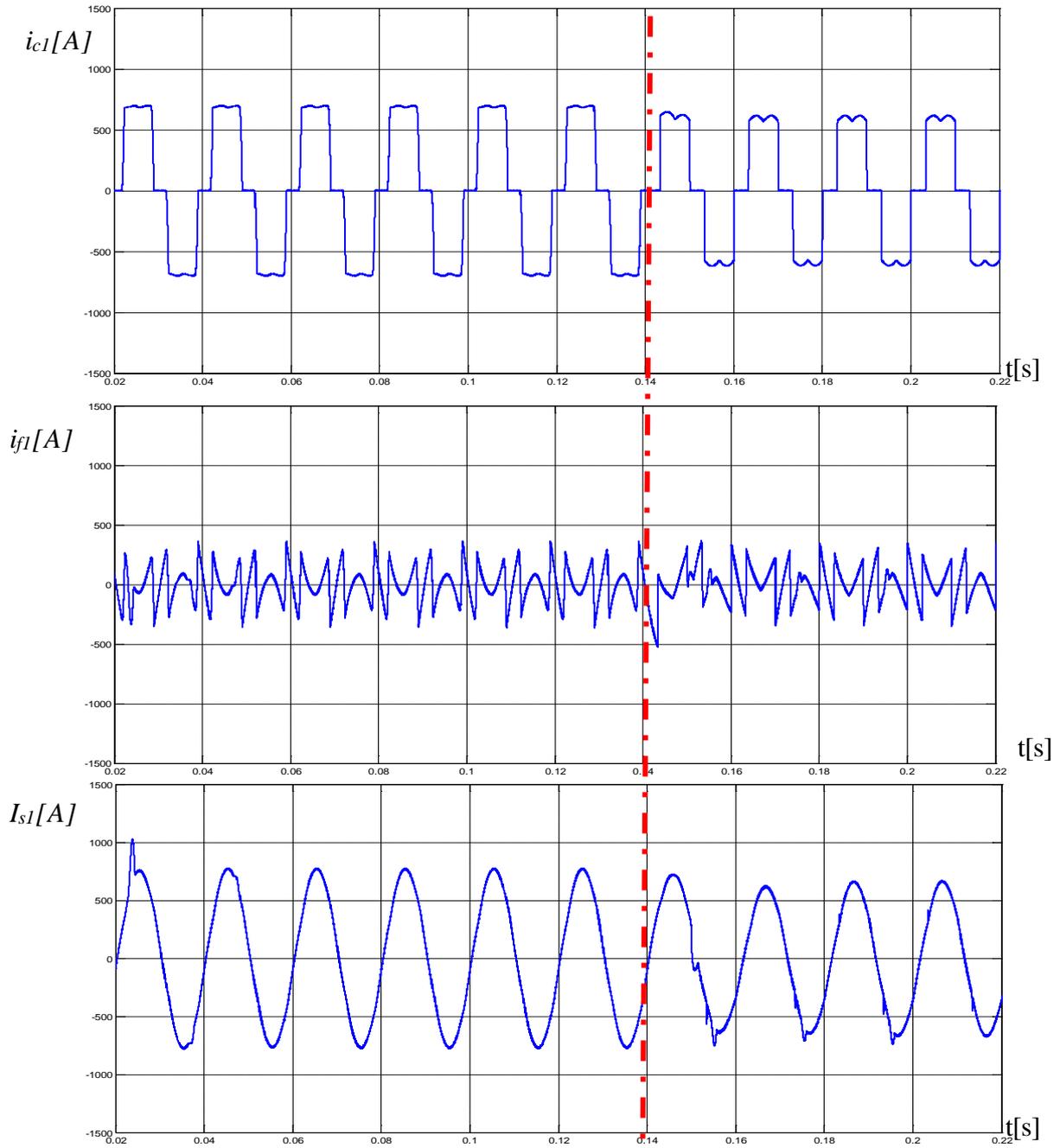


Figure 3-17 Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode directe p-q en régime équilibré avec Filtre Multi-variable pour $\alpha=30^\circ$.
 (a) Courants de charges i_{c1} , (b) courants de filtre i_{f1} , (c) courants de source i_{s1}

3.3.4. Méthode des puissances instantanées par un filtre Adaline

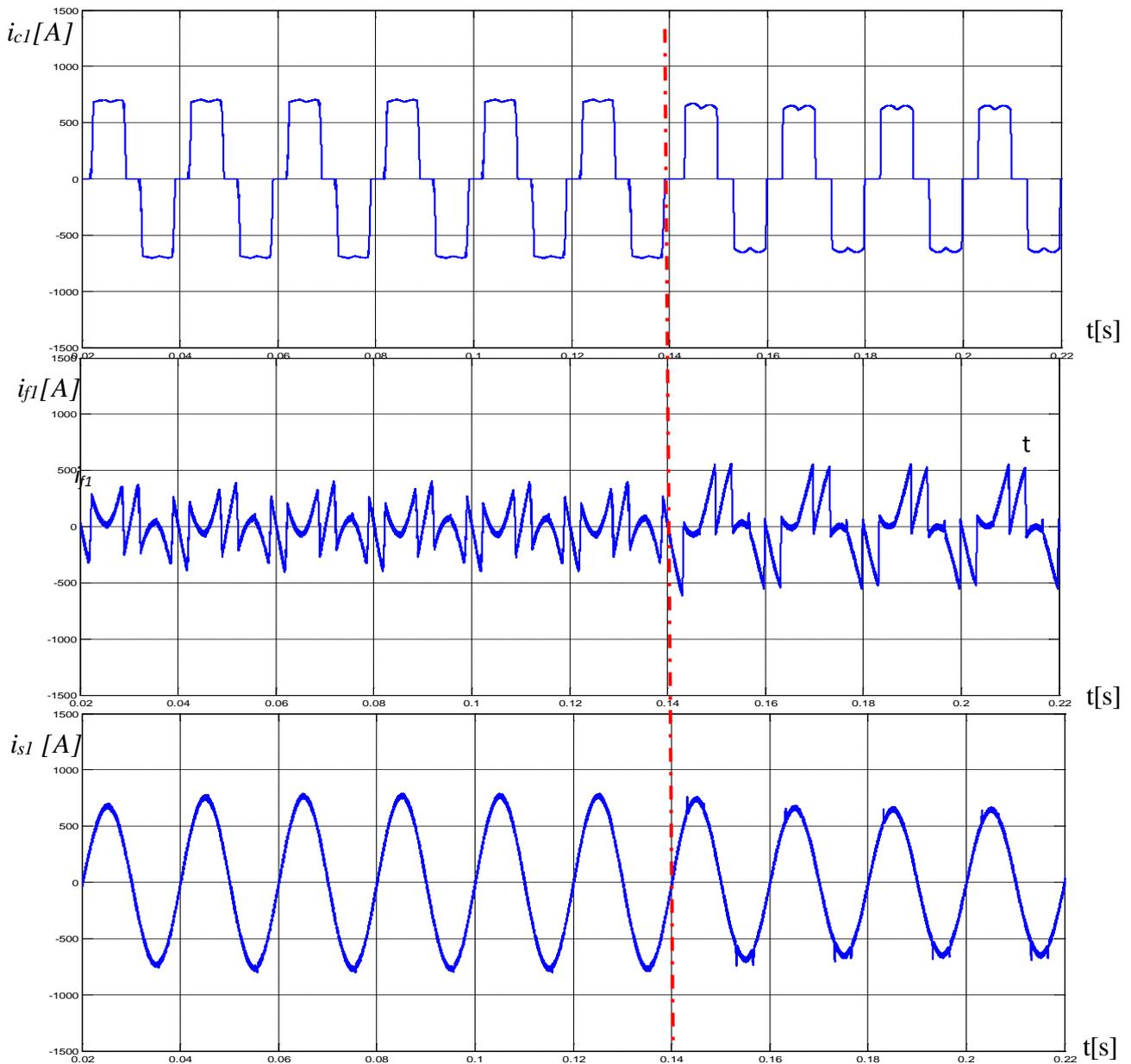


Figure 3-18 Résultats de simulation lors de compensations des courants harmoniques par la méthode indirecte $p-q$ en régime équilibré avec Filtre Adaline pour $\alpha=30^\circ$.
 (a) Courants de charges i_{c1} , (b) courants de filtre i_{f1} , (c) courants de source i_{s1}

Les différents résultats de simulation pour les quatre méthodes de génération des courants de référence montrent les formes des grandeurs simulées en régime permanent et lors de variation de charge. On remarque que les courants générés par le filtre suivent leurs références.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats obtenus par les différentes méthodes étudiées pour un régime équilibré, pour les deux cas d'angle d'amorçage $\alpha = 0^\circ$ et 30° .

L'ensemble des résultats de simulation obtenus montrent la commande du filtre actif parallèle avec des régulateurs PI basés sur les différentes méthodes d'identification des harmoniques.

A partir des résultats de simulation, on constate que la méthode indirecte des puissances instantanées avec un filtre passe-bas offre les meilleurs résultats de filtrage (THD=2.15%). Ensuite la commande directe des puissances instantanées modifiée (FVM) est classée en dernier en termes de THD de 2.45%.

Dans le chapitre suivant on va étudier notre système soumis à des contraintes telles que le déséquilibre de charge et le défaut monophasé.

Chapitre 4
Résultats de simulation
en régime déséquilibré

Introduction

On se propose d'étudier le même modèle qu'en régime équilibré, mais le déséquilibre est illustré par une charge résistive triphasée déséquilibrée connectée en parallèle avec notre charge non linéaire, il s'ensuivra une seconde simulation appliquée au même modèle mais avec un défaut monophasé. On considère que notre système de tension est sinusoïdal et équilibré. Pour déterminer les courants de référence, on a utilisé les mêmes algorithmes cités dans le cas d'un régime équilibré.

4.1. Simulation pour le cas d'une charge déséquilibrée

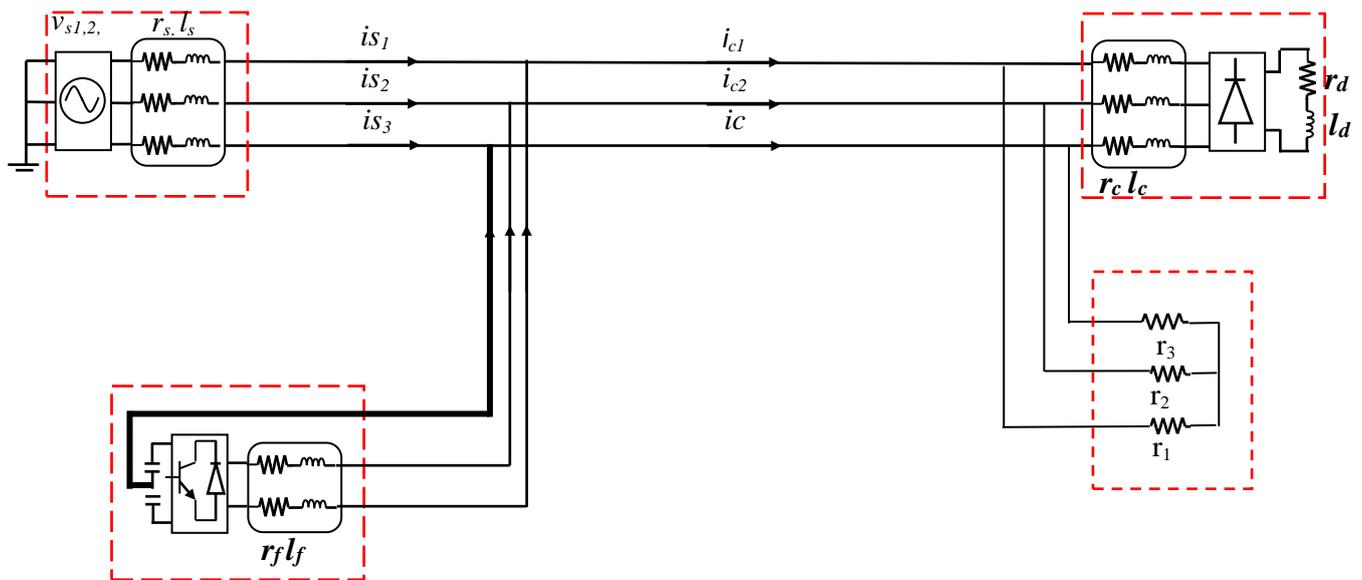


Figure 4-1 : Modèle de simulation constitué par (Source + FAP + Charge déséquilibrée)

La figure 4-1 montre la structure du système à simuler constitué d'un réseau triphasé et un filtre actif parallèle ainsi qu'une charge déséquilibrée, avec les paramètres cités dans le tableau ci-dessous :

$V_s \text{ eff}[V]$	$r_s [m\Omega]$	$l_s [\mu H]$	$r_c [m\Omega]$	$l_c [\mu H]$	$r_1 [\Omega]$	$r_2[\Omega]$	$r_3[\Omega]$
240	1.59	45.56	2.73	23.19	0.8	0.6	0.4

Tableau 4-1 : Paramètres de simulation

4.1.1. Méthode directe des puissances instantanées

Les résultats de simulation avec la commande p-q directe lors d'un déséquilibre de charge, nous a permis d'avoir les résultats de simulation suivantes avec (a) représentant les courant coté charge, (b) courants injecté par le FAP, (c) courants de sources après filtrage :

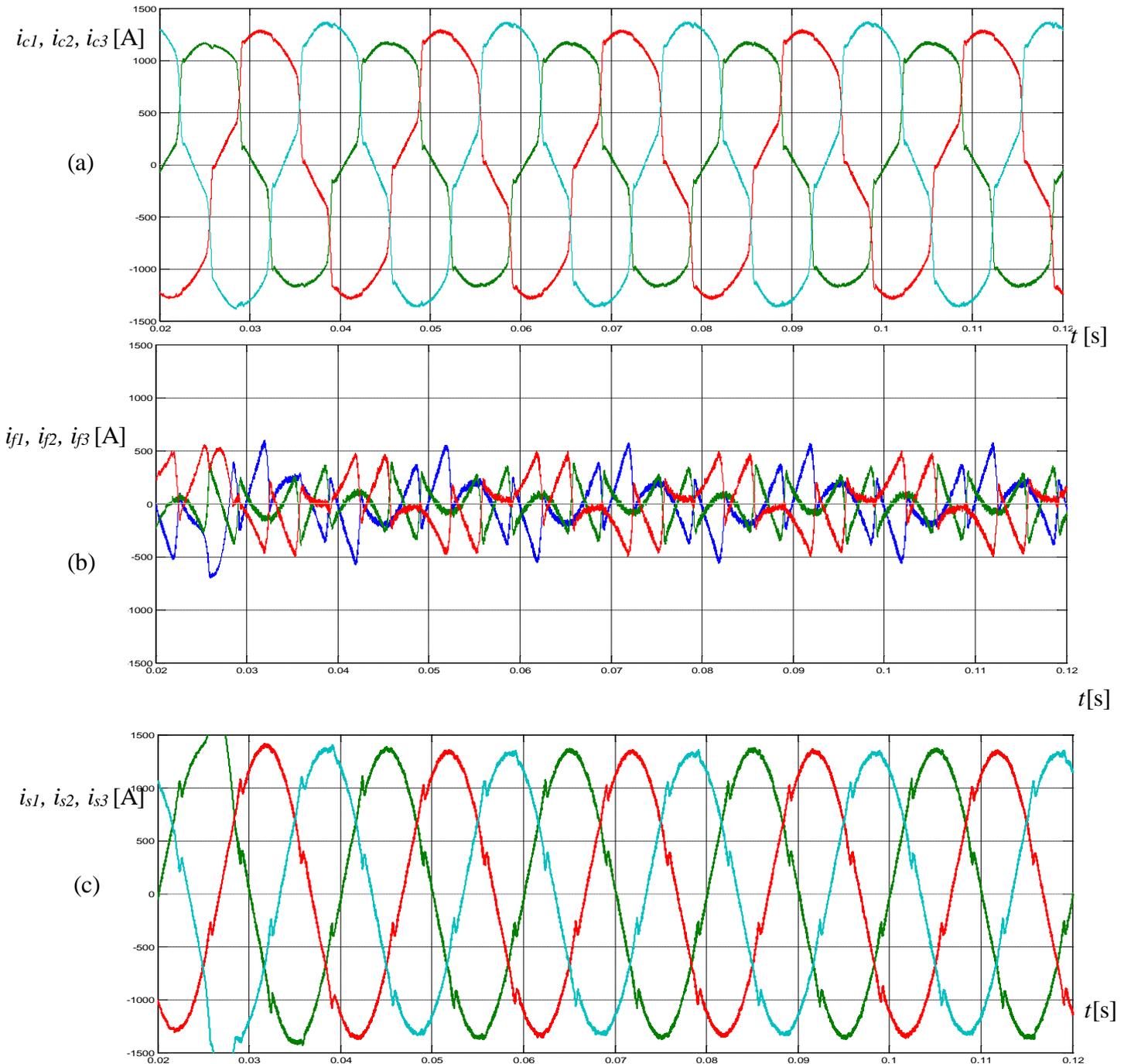


Figure 4-2 Résultats de simulation par la méthode directe des puissances Instantanées p-q suivant le régime déséquilibré (a) $i_{c123}=f(t)$; (b) $i_{f123}=f(t)$; (c) $i_{s123}=f(t)$

On remarque que les courants triphasé coté source sont quasiment sinusoïdaux, ce qui n'était pas le cas avant l'utilisation du filtre actif de puissance.

Dans ce qui suit, nous présentant l'évolution de nos signaux par phase vu que chacune des phases évolue différemment.

Phase 01 :

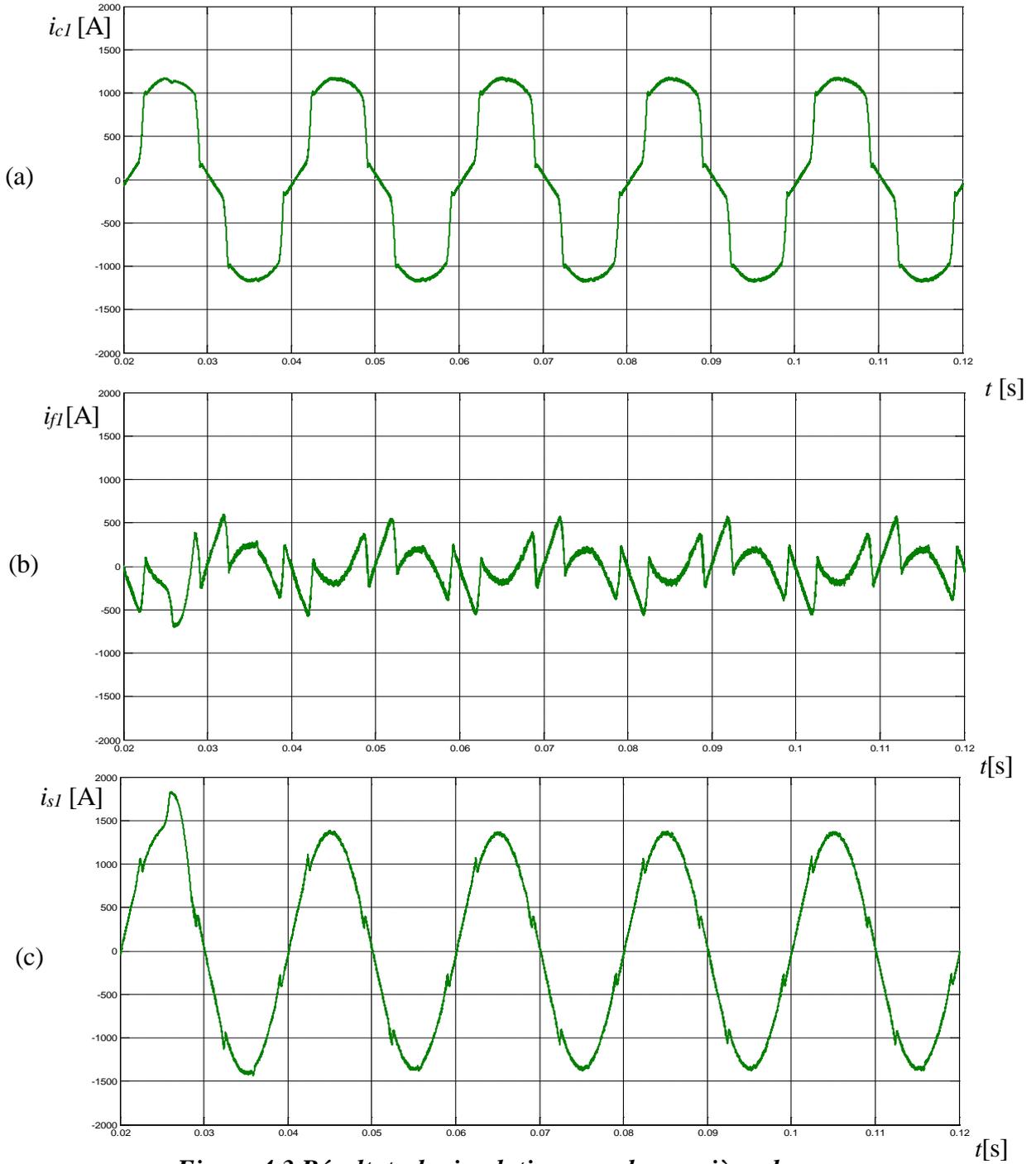


Figure 4-3 Résultats de simulation pour la première phase
 (a) $i_{c3}=f(t)$; (b) $i_{\beta}=f(t)$; (c) $i_{s3}=f(t)$

Phase 02 :

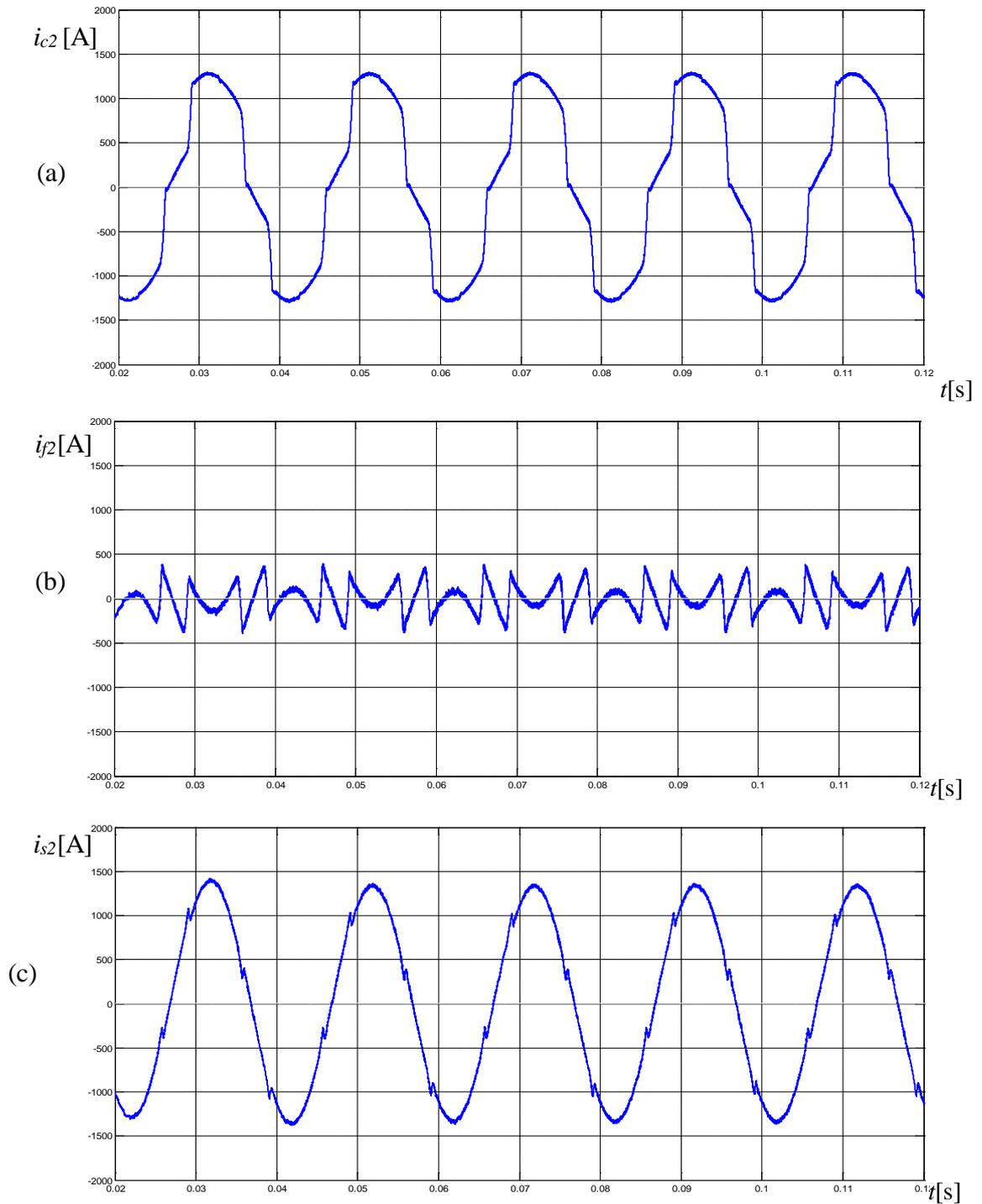


Figure 4-4 Résultats de simulation pour la deuxième phase
(a) $i_{c2}=f(t)$; (b) $i_{f2}=f(t)$; (c) $i_{s2}=f(t)$

Phase 03:

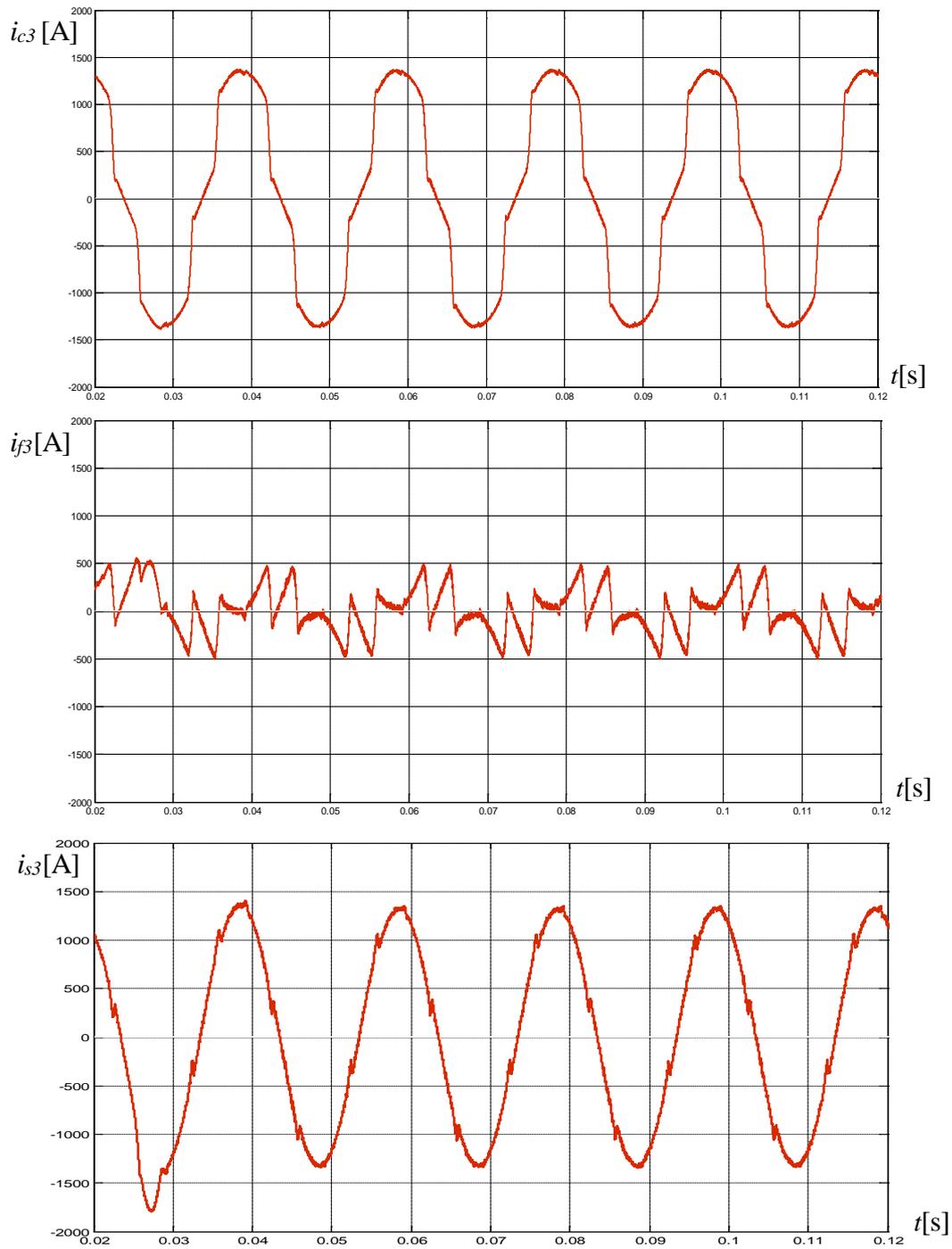


Figure 4-5 Résultats de simulation pour la troisième phase
 (a) $i_{c3}=f(t)$; (b) $i_{\beta}=f(t)$; (c) $i_{s3}=f(t)$

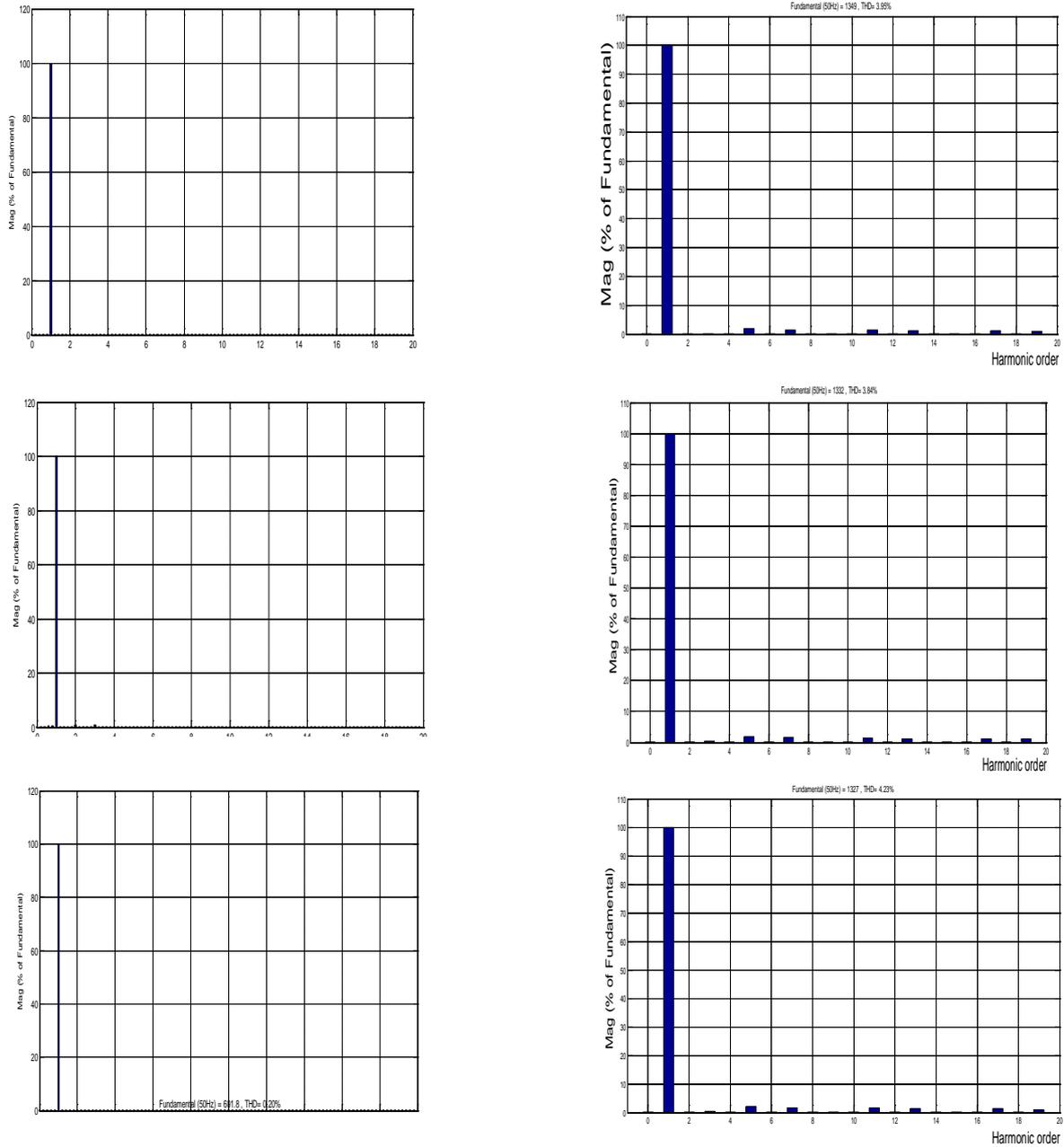


Figure 4- 6 Représentation des FFT de courant pour la méthode p-q directe en cas d'un système déséquilibré ; (a)Avant filtrage, (b) après filtrage

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
THD	3.95	3.84	4.23

Tableau 4-2 THD par phase

Interprétation des résultats de la première commande :

Afin d'évaluer les performances de la première méthode d'extraction des courants de références appliqué à notre système dans le cadre de notre régime déséquilibré, nous nous sommes intéressés aux caractéristiques de la FFT de notre courant de source avant et après filtrage et ce pour chacune des phases.

Les performances de notre filtre pour cette commande sont visibles à l'œil nu, on voit bien que les courants de sources sont quasiment sinusoïdaux et en phase avec les tensions de source ($\cos \varphi = 1$).

Pour ce qui est de la régulation de la tension aux bornes du condensateur, notre système a présenté de bonne performance du fait qu'il a pu suivre la consigne

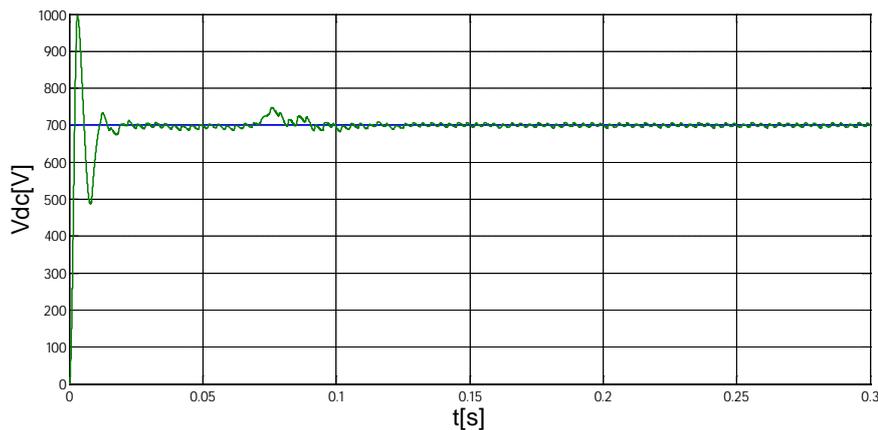


Figure 4-7 Tension de condensateur V_{dc}

On remarque que la tension aux bornes du condensateur est maintenue constante à 700V (elle suit la référence)

4.1.2. Méthode indirecte des puissances instantanées $p-q$ par un filtre passe-bas

De façon analogue que précédemment, nous nous proposons d'évaluer les performances de notre FAP en utilisant la méthode d'extraction $p-q$ indirecte avec emploi d'un filtre passe-bas pour séparer la composante continu et oscillatoire de notre puissance instantané active.

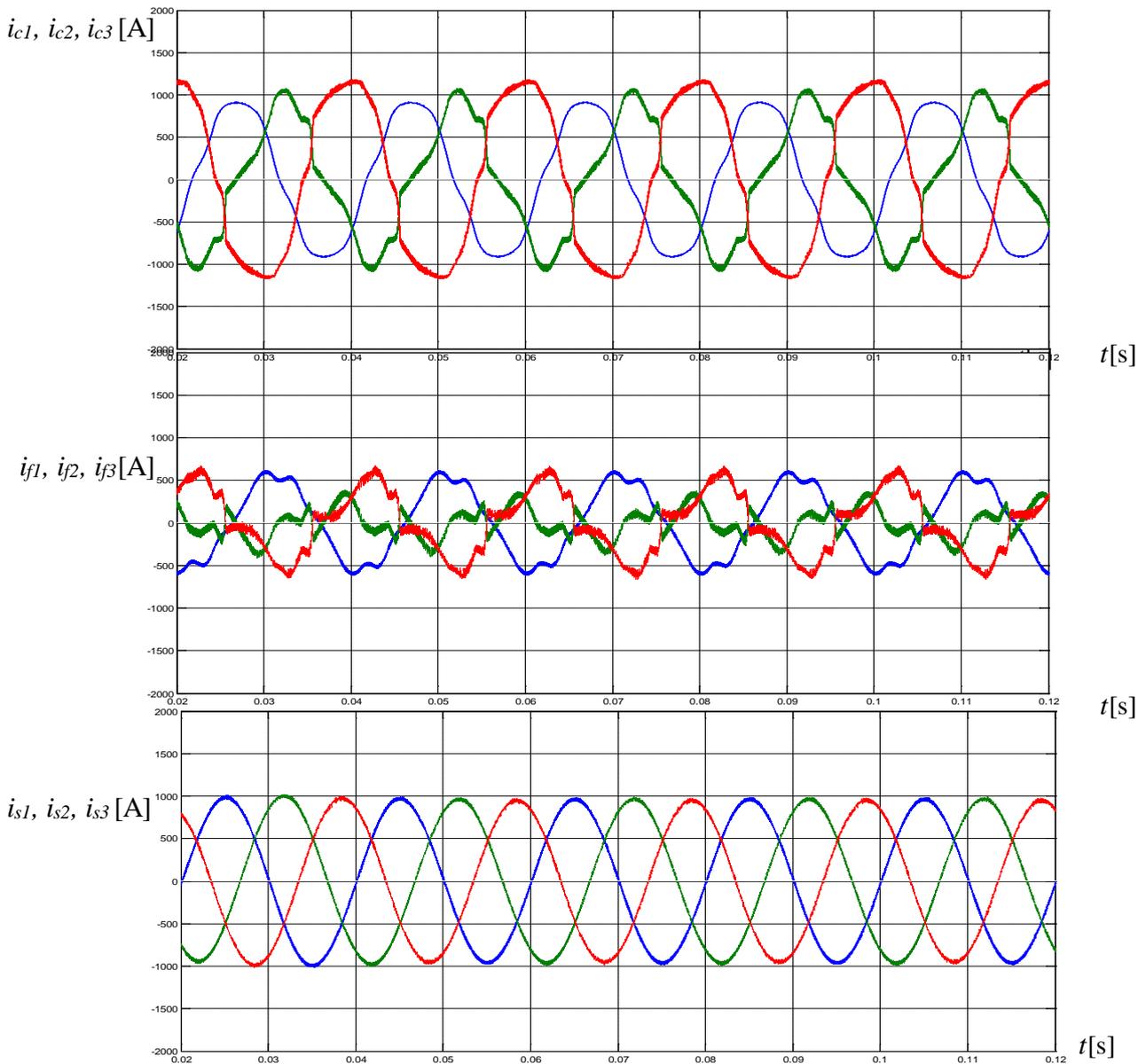


Figure 4-8 Résultats de simulation par la méthode indirecte $p-q$ avec emploi d'un FPB suivant le régime déséquilibré : (a) $i_{c123}=f(t)$, (b) $i_{f123}=f(t)$, (c) $i_{s123}=f(t)$

Nous remarquons que les courants triphasé de sources sont quasiment équilibré et sinusoïdaux après filtrage, et comme critère d'évaluation des performances nous terminerons ses résultats par une comparaison des THDs respectifs avant et après emploi du filtre.

Dans ce qui suit, nous présentant l'évolution de nos signaux par phase

Phase 01 :

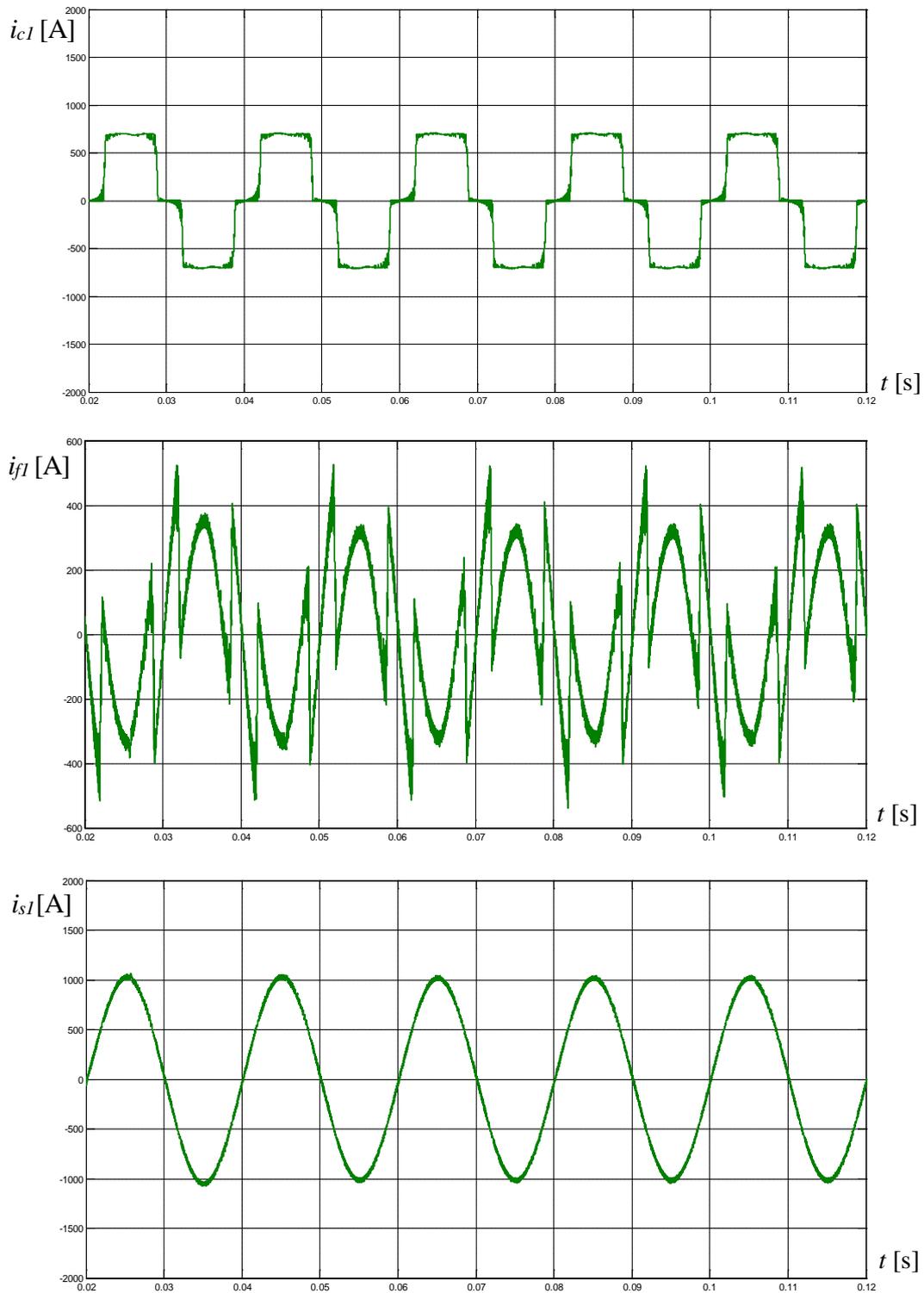


Figure 4-9 Résultats de simulation pour la première phase
 (a) $i_{c1}=f(t)$; (b) $i_{f1}=f(t)$; (c) $i_{s1}=f(t)$

Phase 02 :

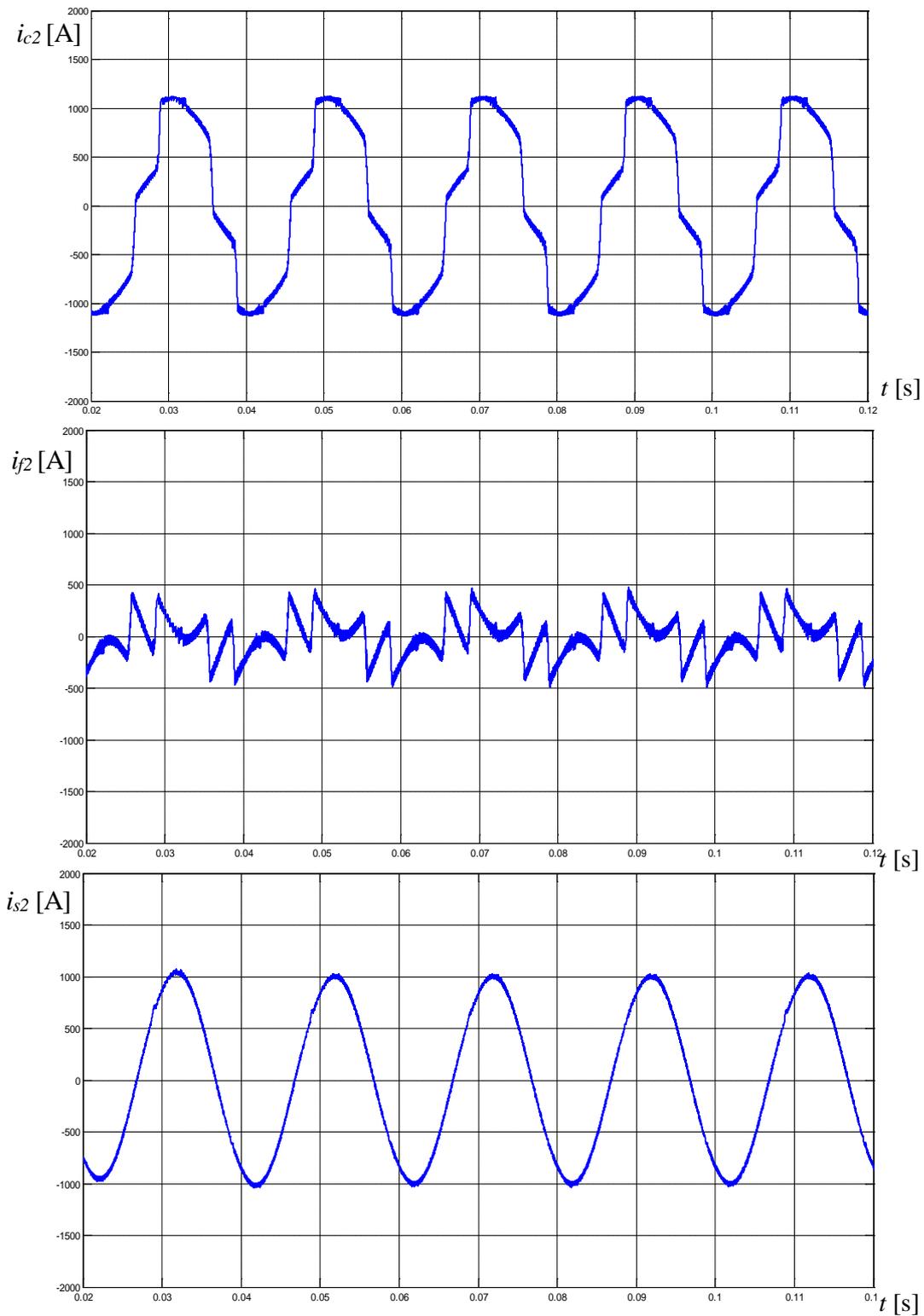


Figure 4-10 Résultats de simulation pour la deuxième phase
(a) $i_{c2}=f(t)$ (b) $i_{f2}=f(t)$; (c) $i_{s2}=f(t)$

Phase 03 :

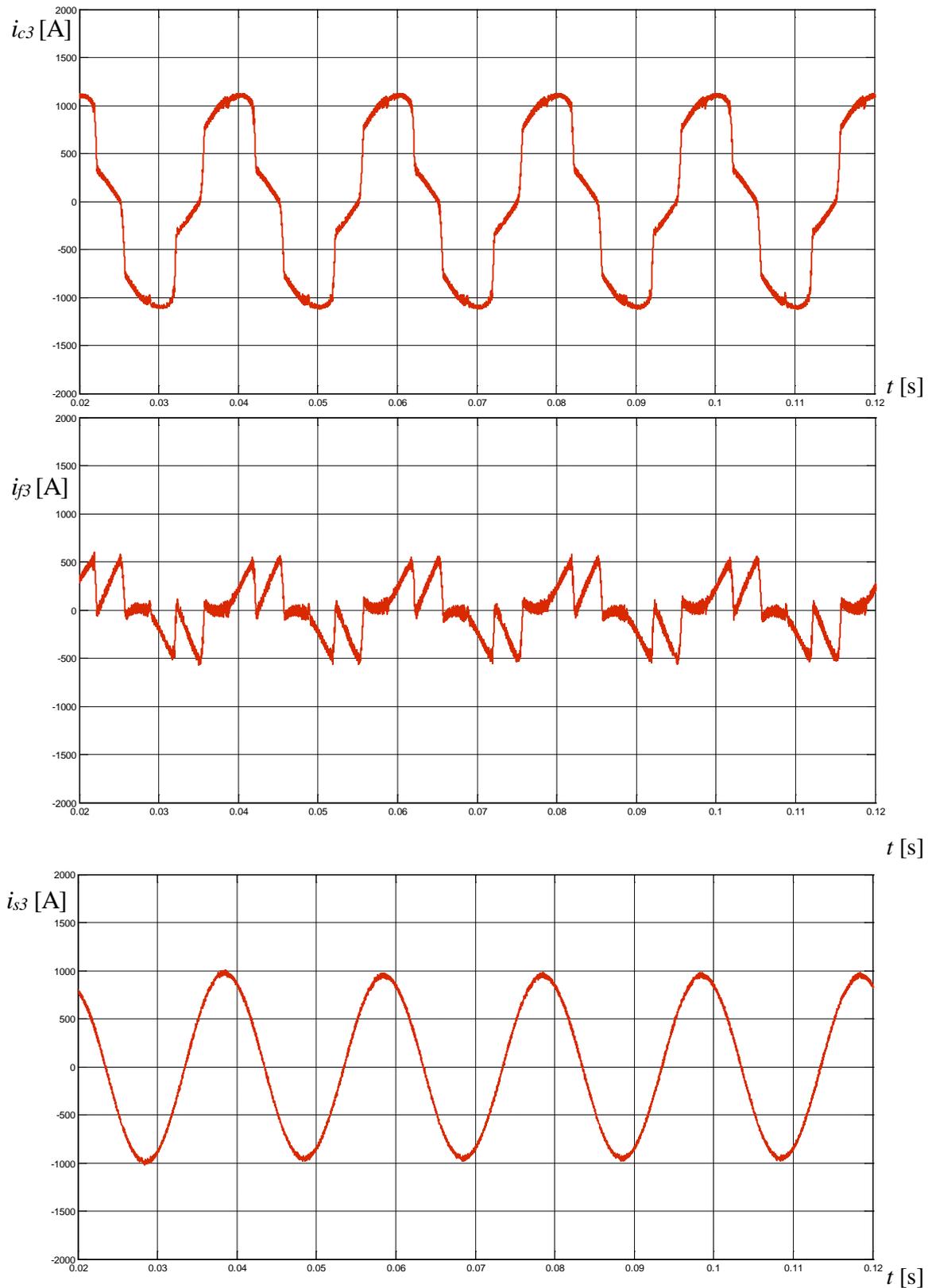


Figure 4- 11 Résultats de simulation pour la troisième phase

(a) $i_{c3}=f(t)$; (b) $i_{\beta}=f(t)$; (c) $i_{s3}=f(t)$

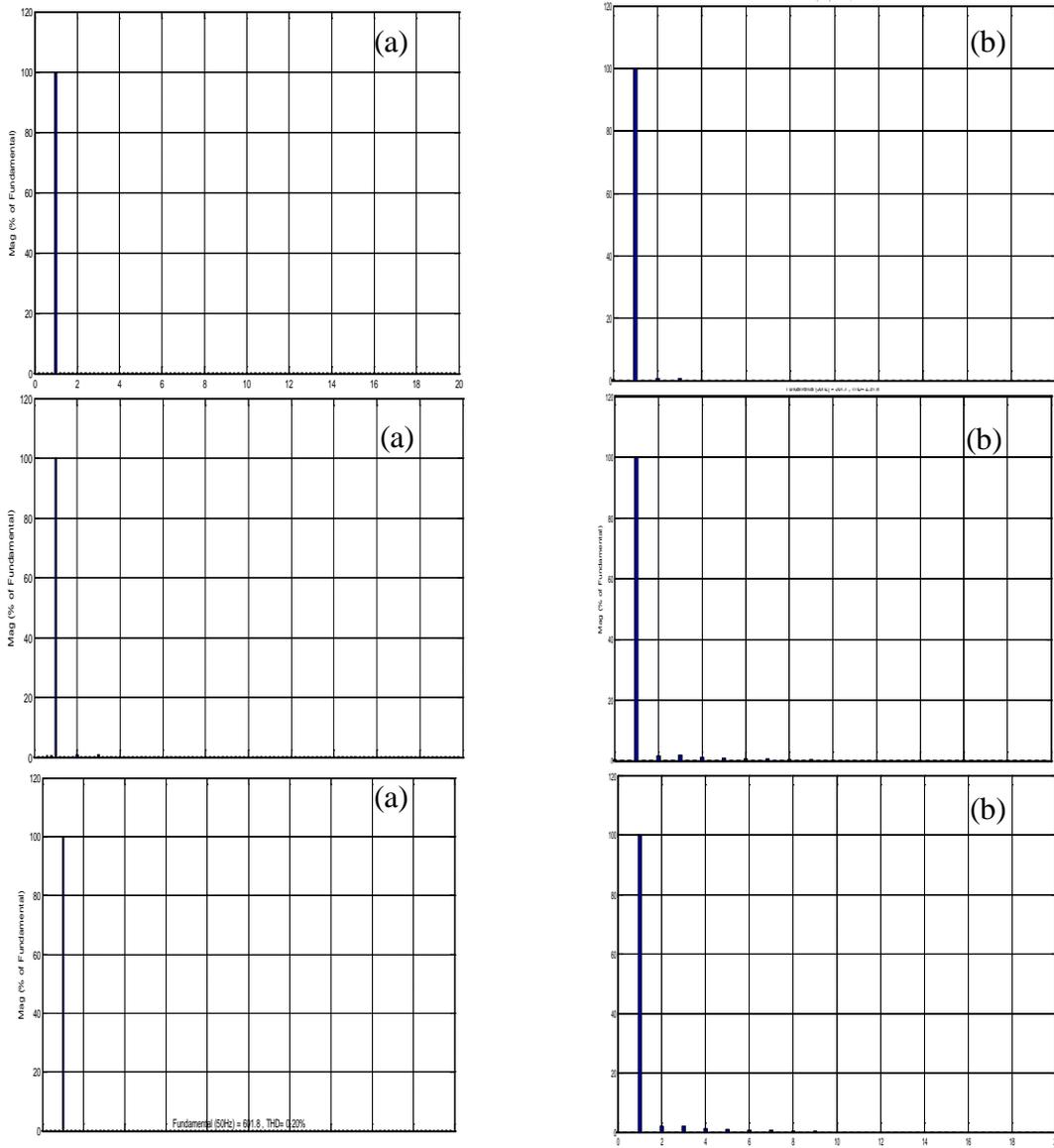


Figure 4- 12 : Représentation des FFT de courant pour la méthode p-q indirecte par un FPB en cas d'un système déséquilibré Avant filtrage , (b) après filtrage

Le THD pour chacune des phases est de

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
THD	1.04	2.91	3.39

Tableau 4-3 : THD par phase

4.1.3. Méthode indirecte des puissances instantanées par Filtre Adaline :

Nous abordant maintenant la 3^{ème} méthode avec l'emploi d'un filtre Adaline à la sortie de notre puissance instantanée « p » active, qui après simulation nous a permis d'obtenir les résultats suivant :

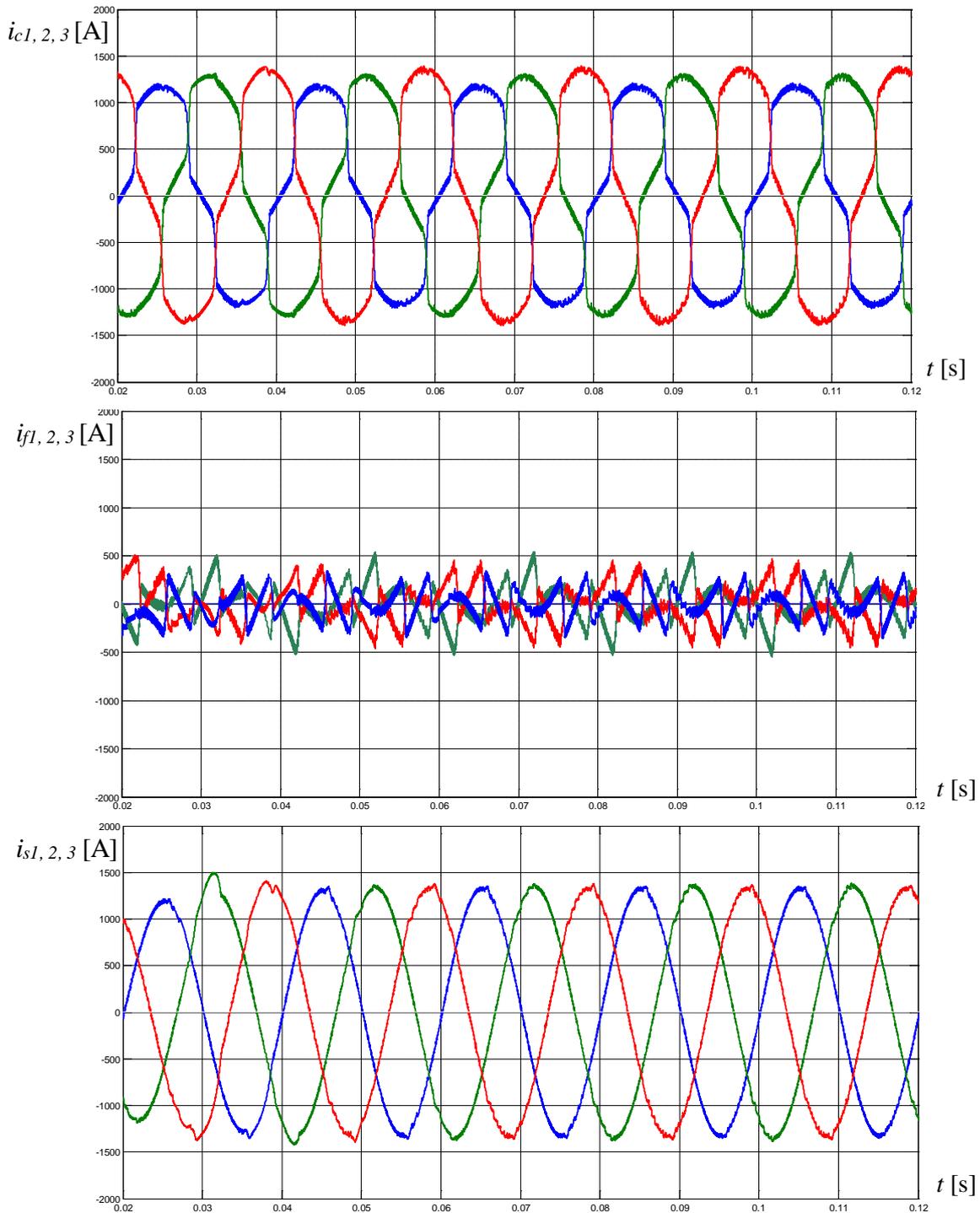


Figure 4-13 Résultats de simulation par la méthode indirecte p-q avec filtre Adaline pour le régime déséquilibré de charge : (a) $i_{c123}=f(t)$, (b) $i_{fl123}=f(t)$, (c) $i_{s123}=f(t)$

Il est clairement montré à travers les signaux des courants de sources qu'ils ont retrouvé un signal triphasé quasiment sinusoïdal en phase avec la tension de source. Dans ce qui suit nous présentant de façon détaillé chacune des phases formant notre système.

Phase 01 :

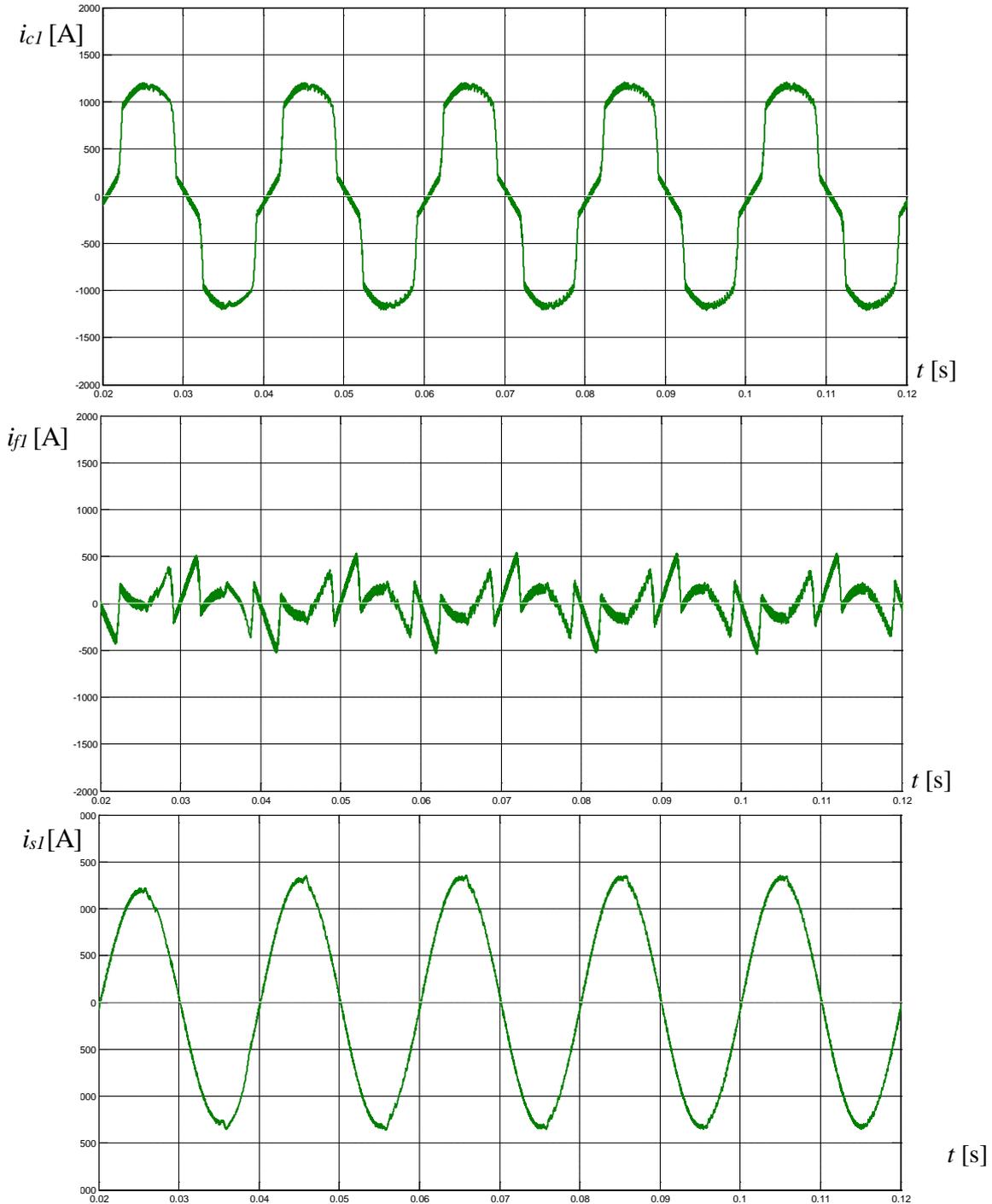


Figure 4-14 Résultats de simulation pour première phase
 (a) $i_{cl}=f(t)$; (b) $i_{fl}=f(t)$; (c) $i_{sl}=f(t)$

Phase 02 :

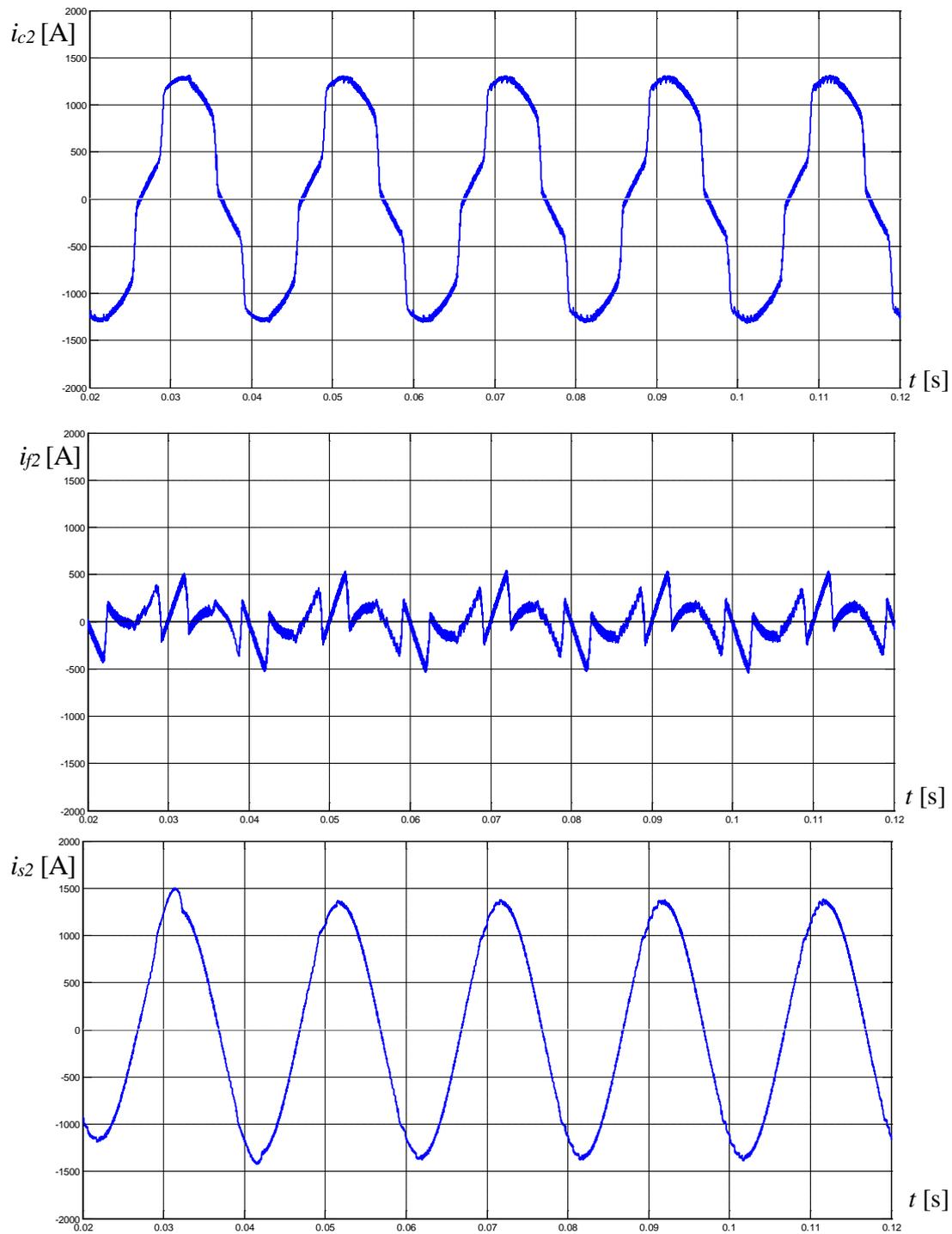


Figure 4-15 : Résultats de simulation pour deuxième phase
(a) $i_{c1}=f(t)$; (b) $i_{f1}=f(t)$; (c) $i_{s1}=f(t)$

Phase 03

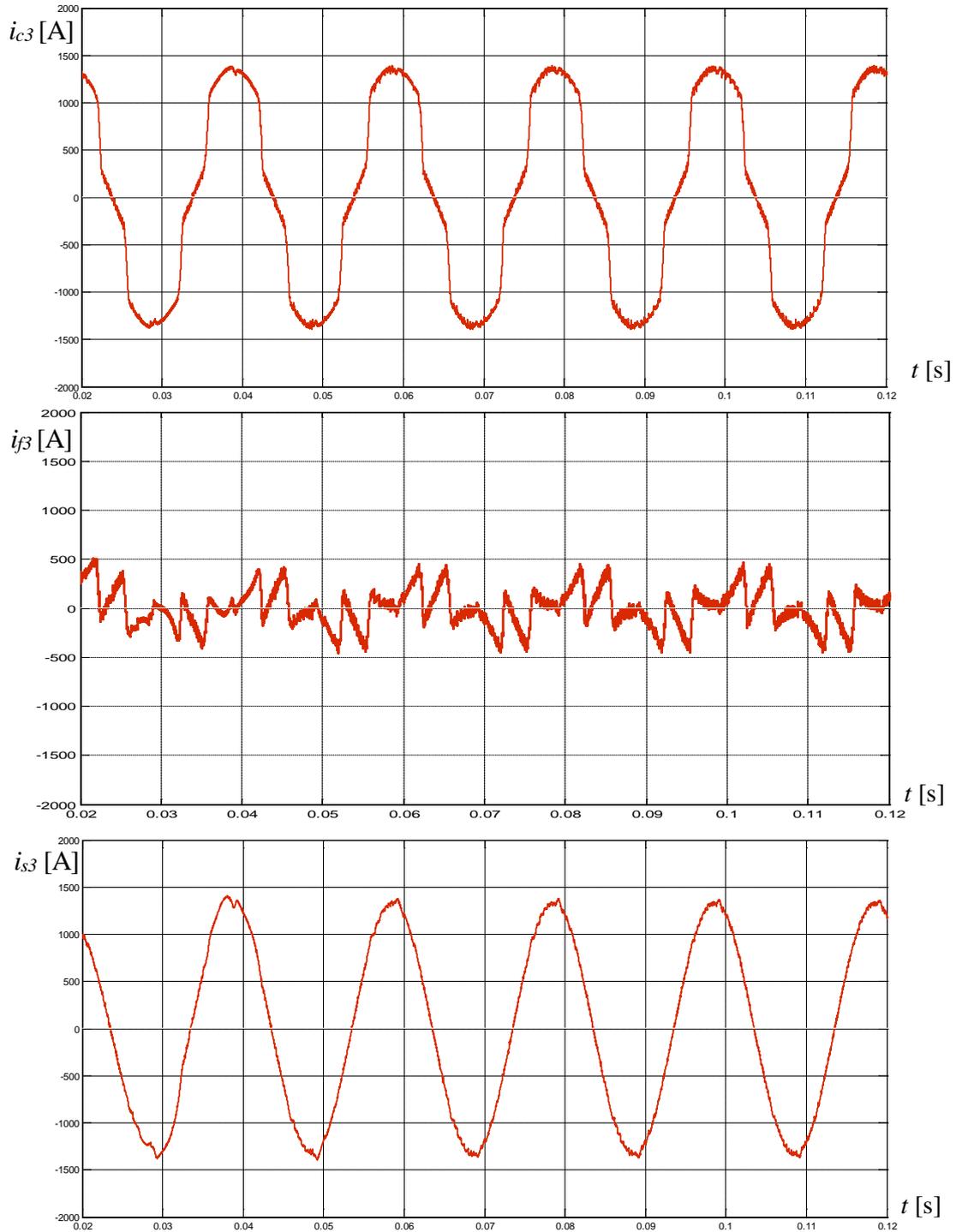


Figure 4-16 : Résultats de simulation pour la troisième phase
(a) $i_{c1}=f(t)$; (b) $i_{f1}=f(t)$; (c) $i_{s1}=f(t)$

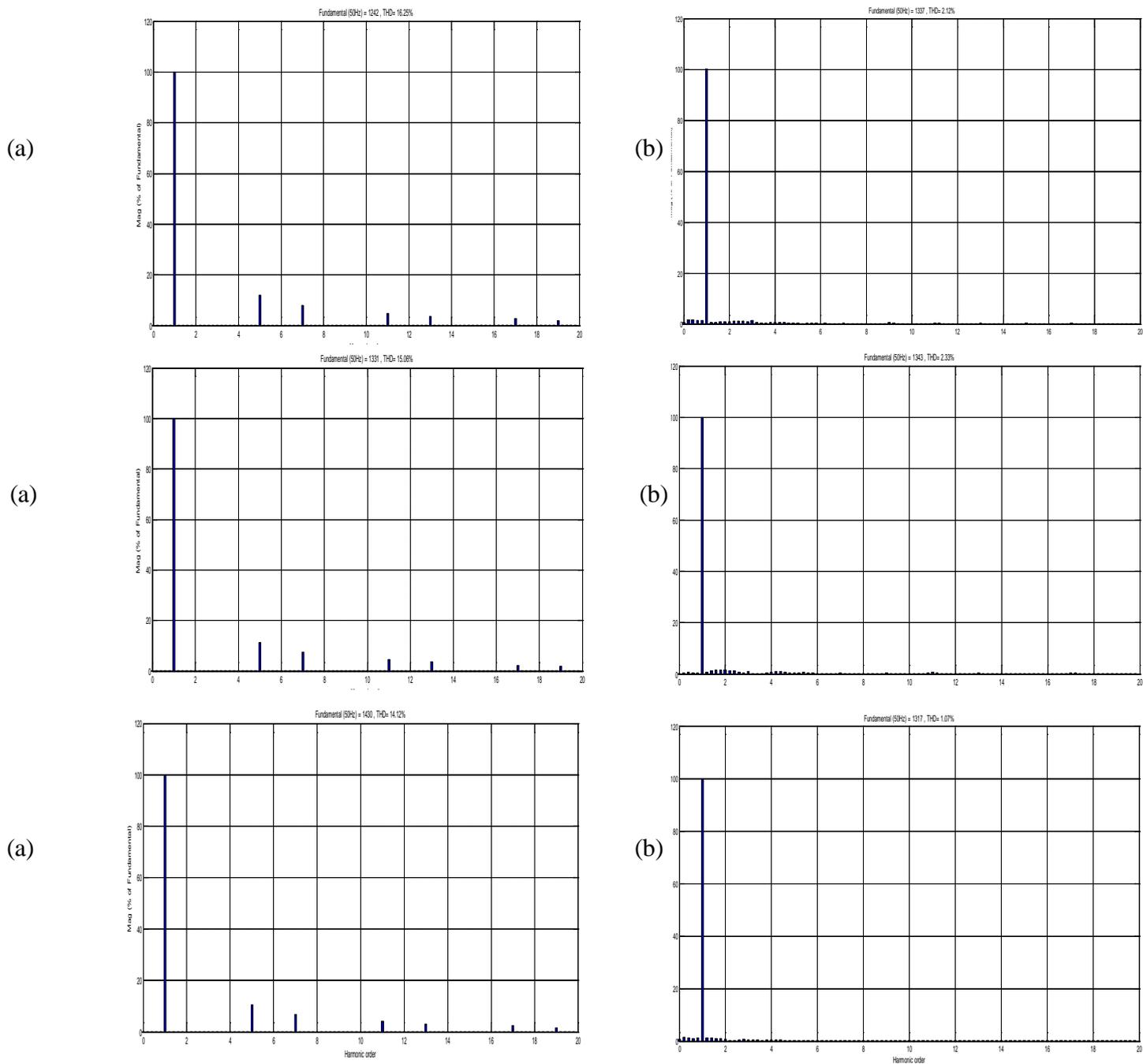


Figure 4-15 : Représentation des THD de la méthode p-q indirecte par un filtre Adaline pour un système déséquilibré(a) Avant filtrage, (b) après filtrage

On remarque qu'il y a amélioration au niveau des courants de sources, ce qui est montré par les THD qui sont passés de valeurs supérieures à des valeurs inférieures à 5%. Les résultats sont mis dans le tableau ci-dessous :

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
THD	1.15	2.05	2.33

Tableau 4-4 : THD par phase pour la méthode pq indirecte appliquant un filtre Adaline.

La tension aux bornes du condensateur est montrée dans la figure :

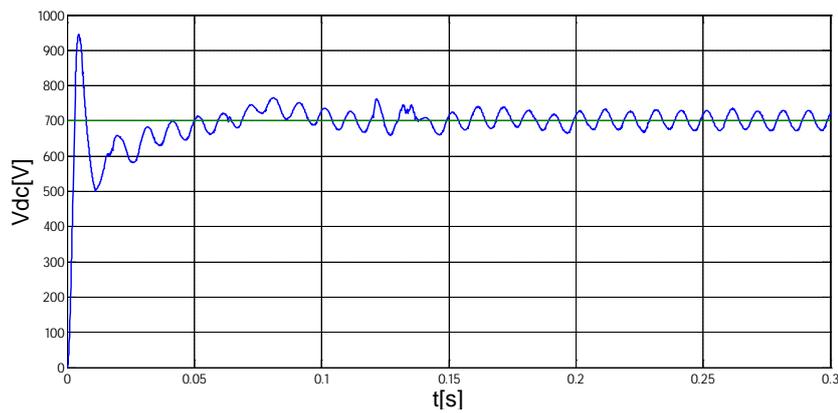


Figure 4-18 : Tension aux bornes du condensateur V_{dc}

4.1.4 Méthode des puissances p-q instantanées modifiée :

Nous présentons dans ce qui suit les résultats de simulation avec l'emploi de la méthode d'extraction des courants de références par l'emploi de la méthode des puissances instantanées p-q modifiée

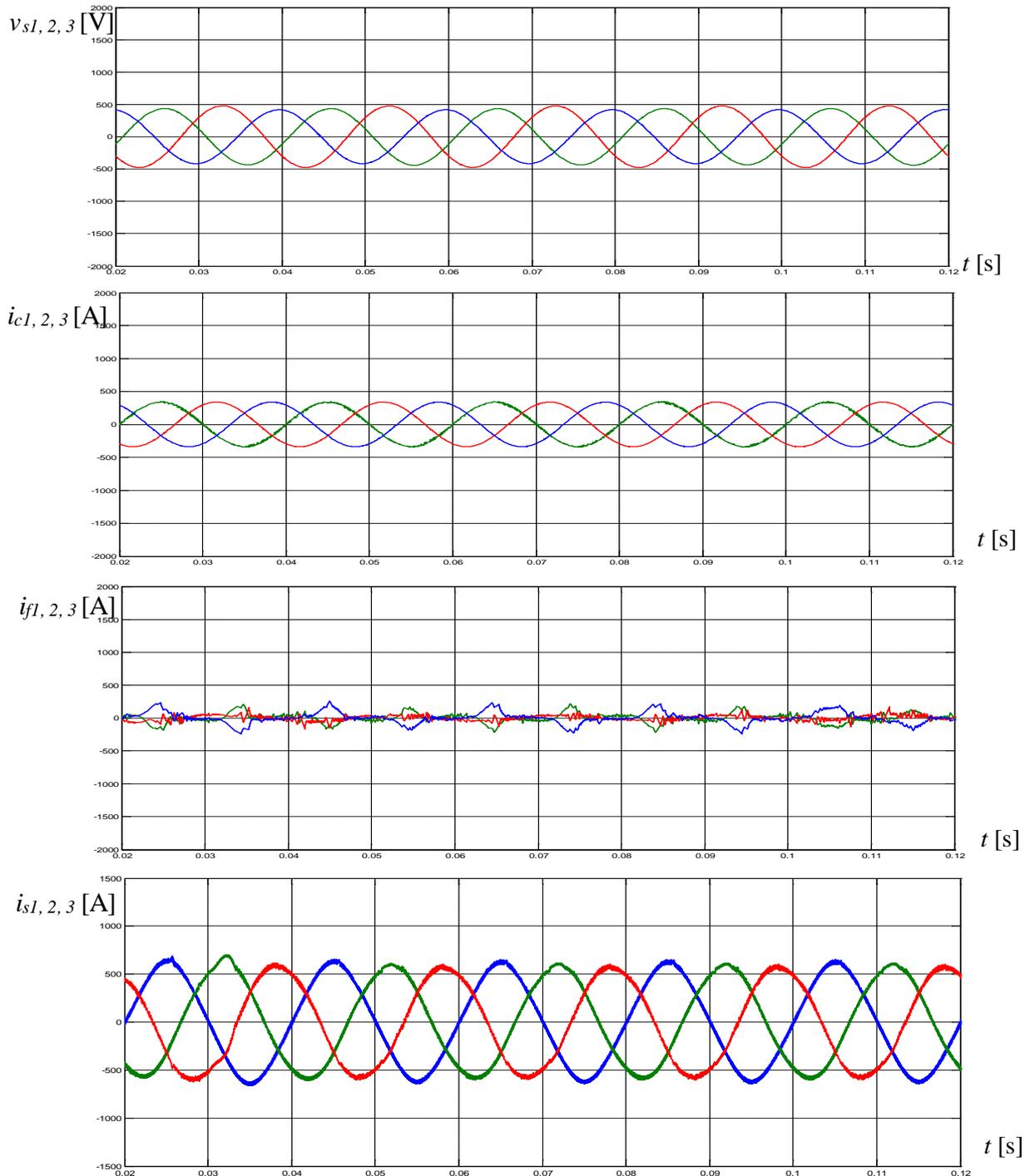


Figure 4-19 : Résultats de simulation par la méthode des puissances instantanées modifiées en régime déséquilibré ;(a) $v_{abc}=f(t)$, (b) $i_{c123}=f(t)$, (c) $i_{f123}=f(t)$, (d) $i_{s123}=f(t)$

Nous remarquons bien que l'objectif de notre simulation est bien vérifié de sorte que les signaux des courants triphasés après filtrage sont équilibrés, quasiment sinusoïdaux et en phase avec la tension de source. De même que précédemment, nous présentant l'évolution de chaque phase de façon distinct.

Phase 01 :

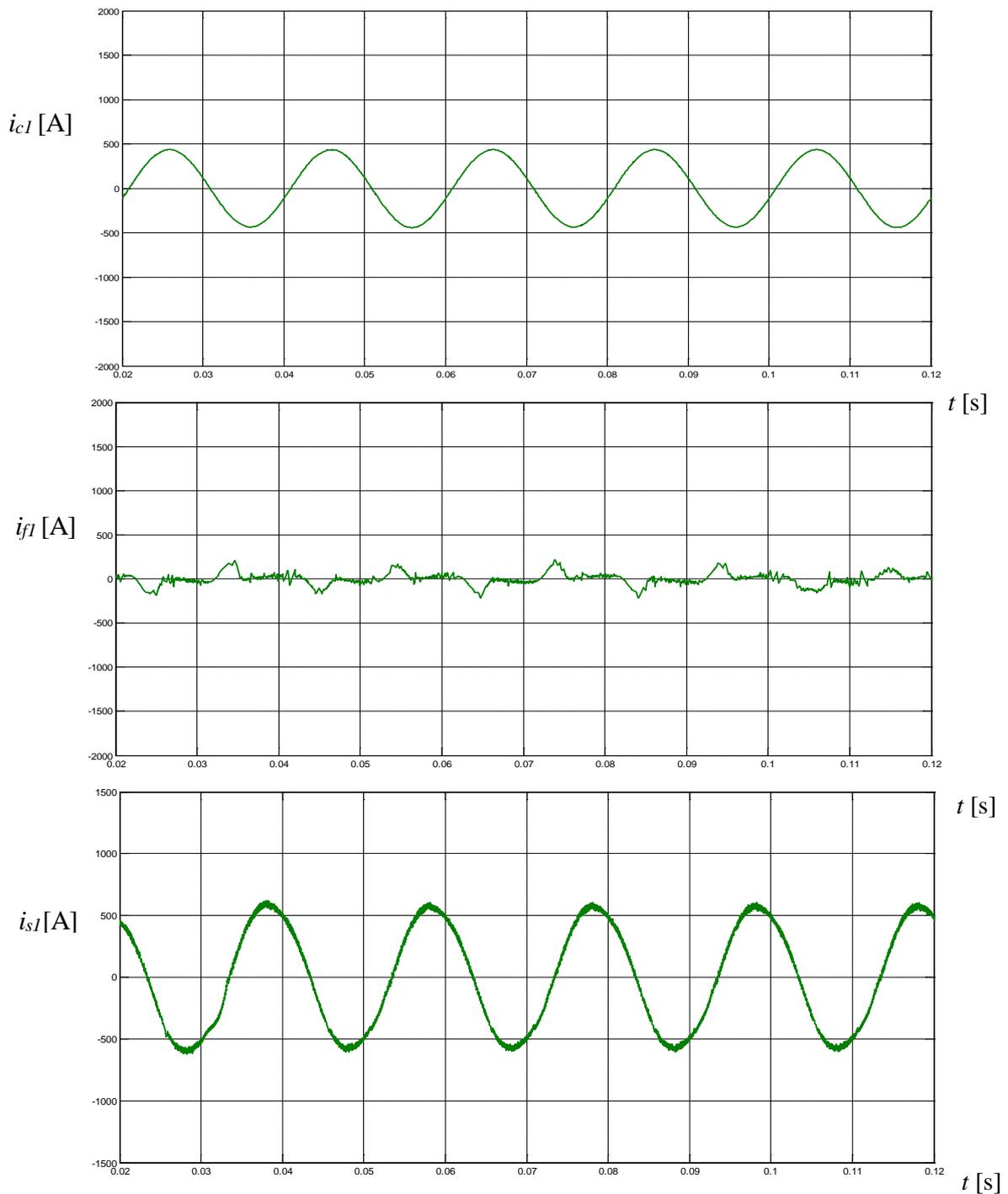


Figure 4-20 Résultats de simulation pour la première phase

(a) $i_{c1}=f(t)$; (b) $i_{f1}=f(t)$; (c) ; $i_{s1}=f(t)$

Phase 02 :

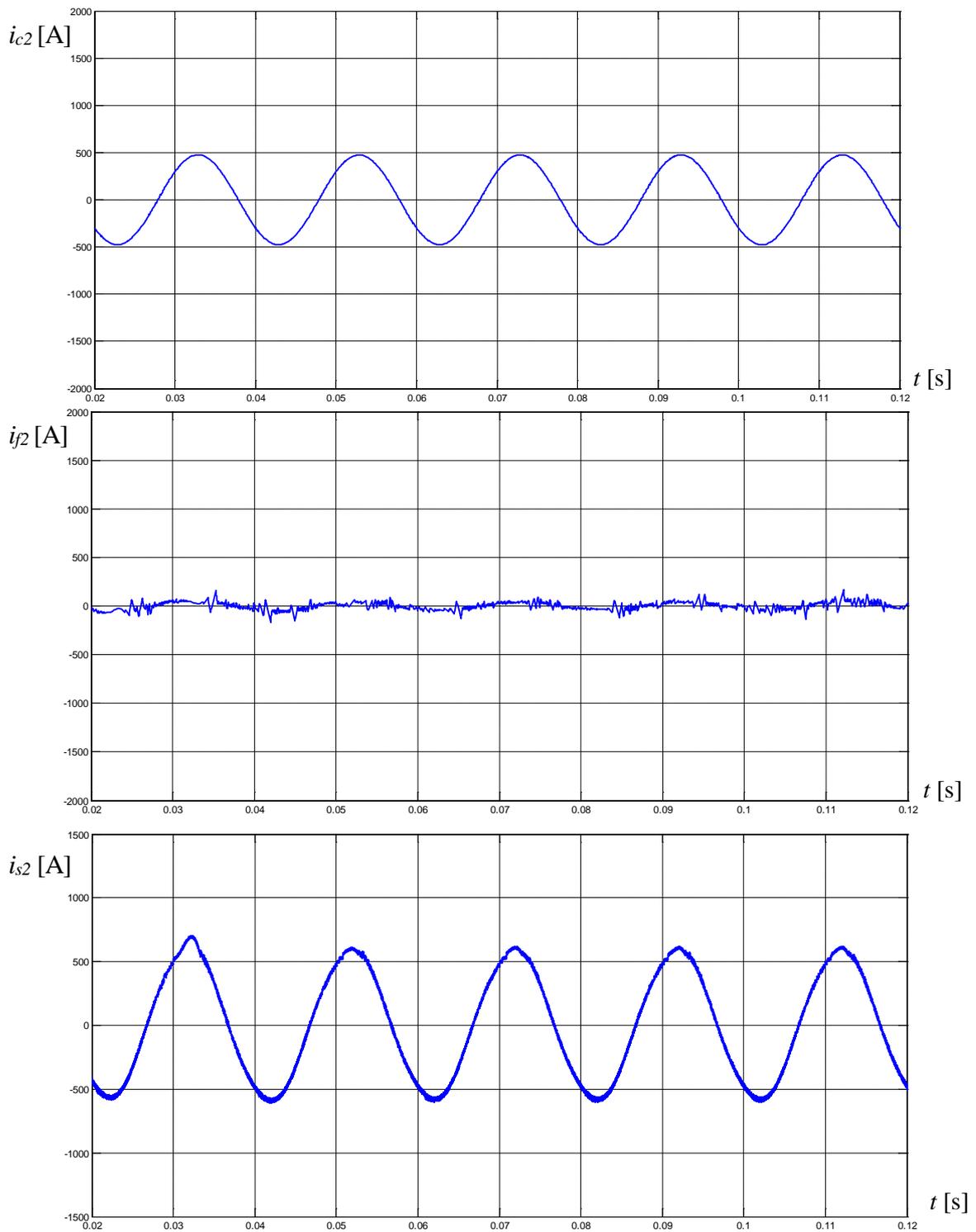


Figure 4-21 Résultats de simulation pour la deuxième phase
(a) $i_{c1}=f(t)$; (b) $i_{f1}=f(t)$; (c) ; $i_{s1}=f(t)$

Phase 03 :

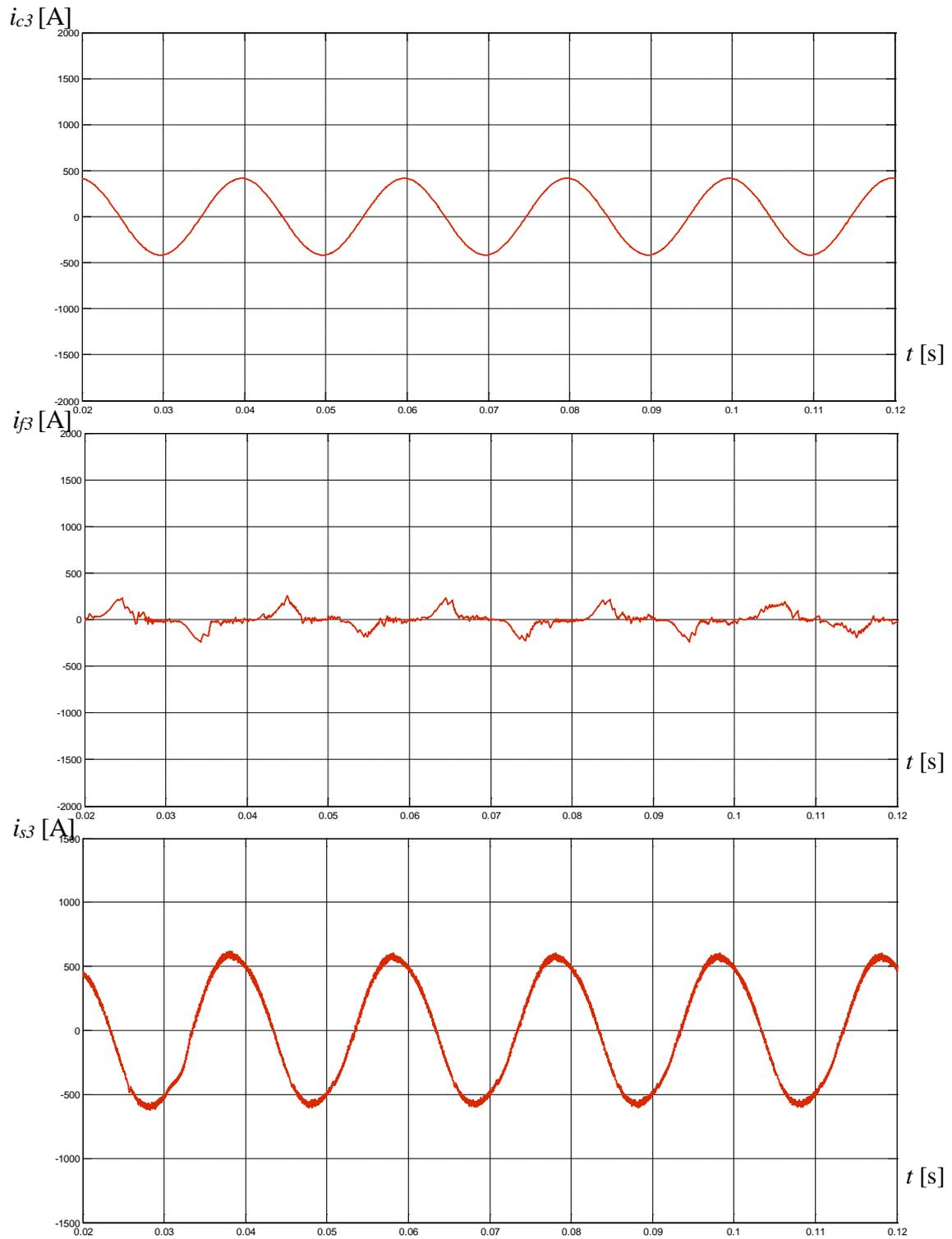


Figure 4-22 Résultats de simulation pour la troisième phase
 (a) $i_{c1}=f(t)$; (b) $i_{f1}=f(t)$; (c) ; $i_{s1}=f(t)$

On arrive à mesurer les performances de notre filtre parallèle, en évaluant le THD de nos courants de sources après filtrage. Ce qui nous a permis d'avoir les résultats montrés par les FFT du courant de source.

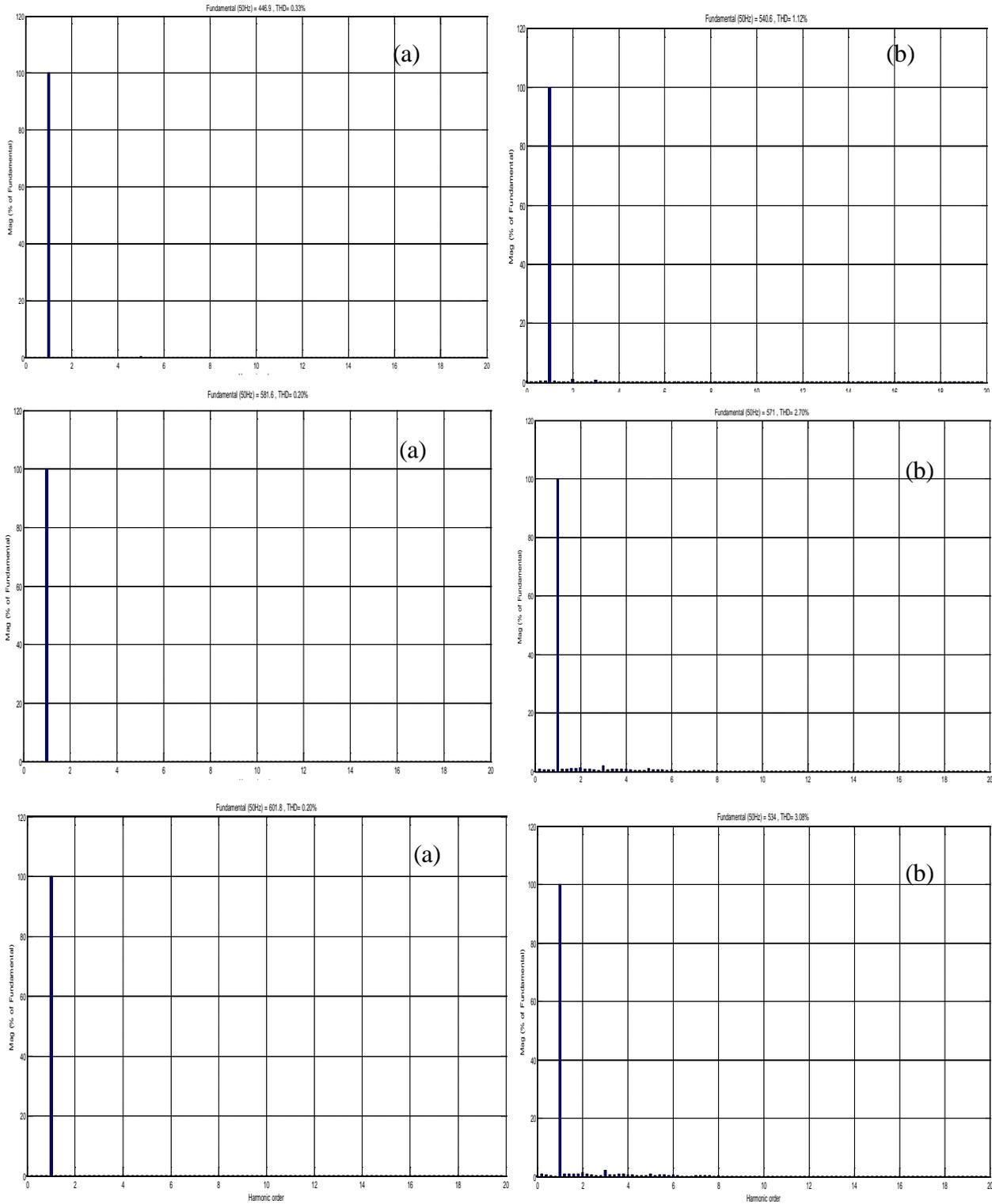


Figure 4-23 : Représentation des FFT de la méthode p-q indirecte modifiée pour un système déséquilibré ; (a) Avant filtrage, (b) après filtrage

Etude comparative en régime déséquilibré de charge

Nous nous proposons de présenter dans ce qui suit un tableau récapitulatif des performances de chacune des quatre techniques utilisées dans notre filtre parallèle :

Phase 1	Sans FAP	Avec FAP			
		pq_directe	Pq_indirecte (FPB)	Pq_indirecte (Filtre Adaline)	Pq_directe (FMV)
1	100	100	100	100	100
3	0.13	0.23	0.75	0.36	0.69
5	11.6	1.99	0.02	0.18	0.02
7	6.99	1.46	0.01	0.10	0.03
9	0.02	0.14	0.00	0.27	0.02
11	3.77	1.32	0.01	0.28	0.02
13	2.54	1.14	0.01	0.17	0.02
15	0.00	0.12	0.00	0.20	0.01
17	1.36	1.12	0.00	0.24	0.01
19	0.91	0.94	0.00	0.16	0.01
THD%	14.41	3.95	1.04	1.15	1.12
Ampl. max	866.3	95	381.4	931.9	377.4

Phase 2	Sans FAP	Avec FAP			
		pq_directe	Pq_indirecte (FPB)	Pq_indirecte (Filtre Adaline)	Pq_directe (FMV)
1	100	100	100	100	100
3	0.13	0.30	1.76	1.24	1.90
5	10.17	1.79	0.91	0.27	0.93
7	6.93	1.59	0.55	0.41	0.44
9	0.08	0.10	0.28	0.54	0.22
11	3.09	1.26	0.11	0.37	0.10
13	2.58	1.18	0.09	0.18	0.04
15	0.04	0.12	0.09	0.29	0.05
17	1.07	1.08	0.05	0.23	0.03
19	0.92	1.04	0.04	0.04	0.02
THD%	13.05	3.84	2.91	2.05	2.70
Ampl. max	931.1	941.8	567.7	944.5	403.7

Phase 3	Sans FAP	Avec FAP			
		pq_directe	Pq_indirecte (FPB)	Pq_indirecte (Filtre Adaline)	Pq_directe (FMV)
1	100	100	100	100	100
3	0.02	0.33	1.98	0.88	1.75
5	10.02	0.15	0.95	0.42	0.87
7	5.92	1.50	0.58	0.44	0.55
9	0.06	0.23	0.30	0.34	0.28
11	3.18	1.55	0.11	0.63	0.11
13	2.06	1.27	0.10	0.28	0.09
15	0.03	0.04	0.09	0.13	0.08
17	1.11	1.31	0.06	0.45	0.05
19	0.70	0.92	0.04	0.19	0.04
THD%	12.32	4.23	3.39	2.33	2.70
Ampl. Max	997.8	938	531.2	949.3	403.7

Tableau 4-5 Tableau récapitulatif des THDs des courants de source pour les quatre méthodes d'identification

Après filtrage on remarque que les THD obtenus ont des valeurs inférieures à 5%. On observe bien que la méthode indirecte des puissances instantanées appliquant un filtre Adaline, et s'ensuit par la méthode directe des puissances instantanées modifiées.

4.2. Simulation numérique pour le cas d'un défaut monophasé :

Dans un souci de mesurer l'efficacité de notre filtre actif de puissance parallèle lors d'un défaut monophasé survenu sur une des phases coté charge, nous établissons une série de simulation pour vérifier que notre filtre nous permet de revenir à un courant triphasé équilibré quasiment sinusoïdale et en phase avec la tension de source. Nous utiliserons deux méthodes d'extraction suivie d'une comparaison de leurs performances.

Soit le système à simuler définit comme suite :

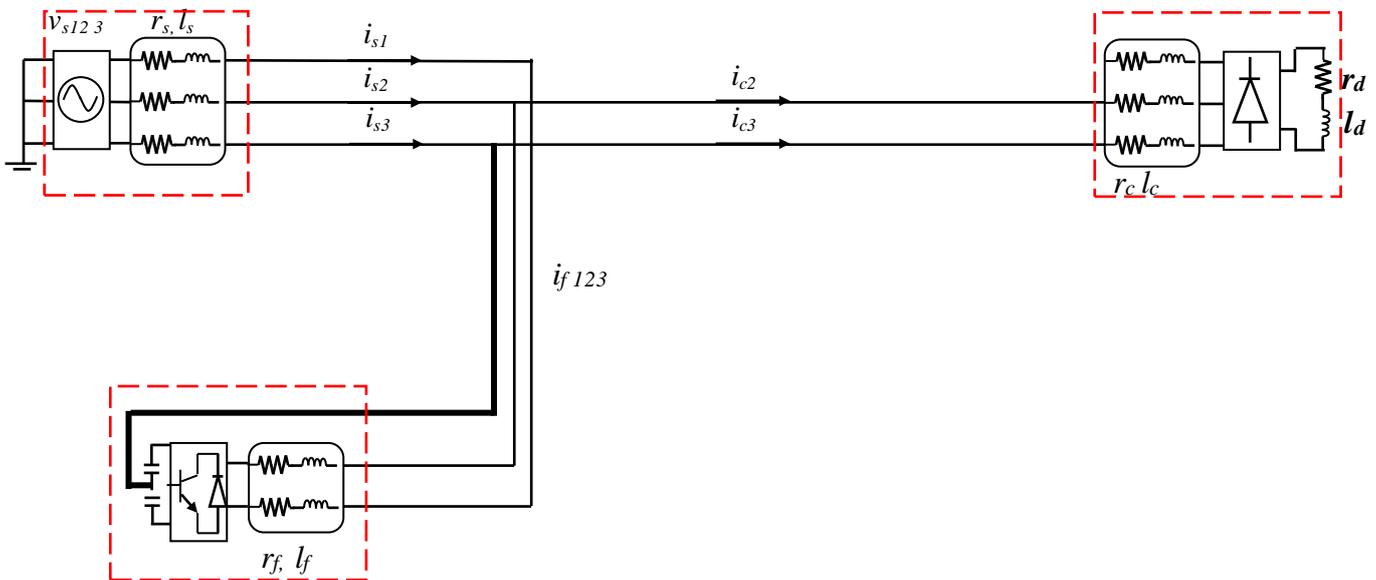


Figure 4-24 Modèle d'un réseau électrique déséquilibré dû à un défaut monophasé coté charge

4.2.1. Méthode indirecte des puissances instantanée par un filtre passe-bas

Résultats de simulation en utilisant la méthode d'extraction basée sur les puissances instantanées p-q avec emploi d'un filtre passe bas :

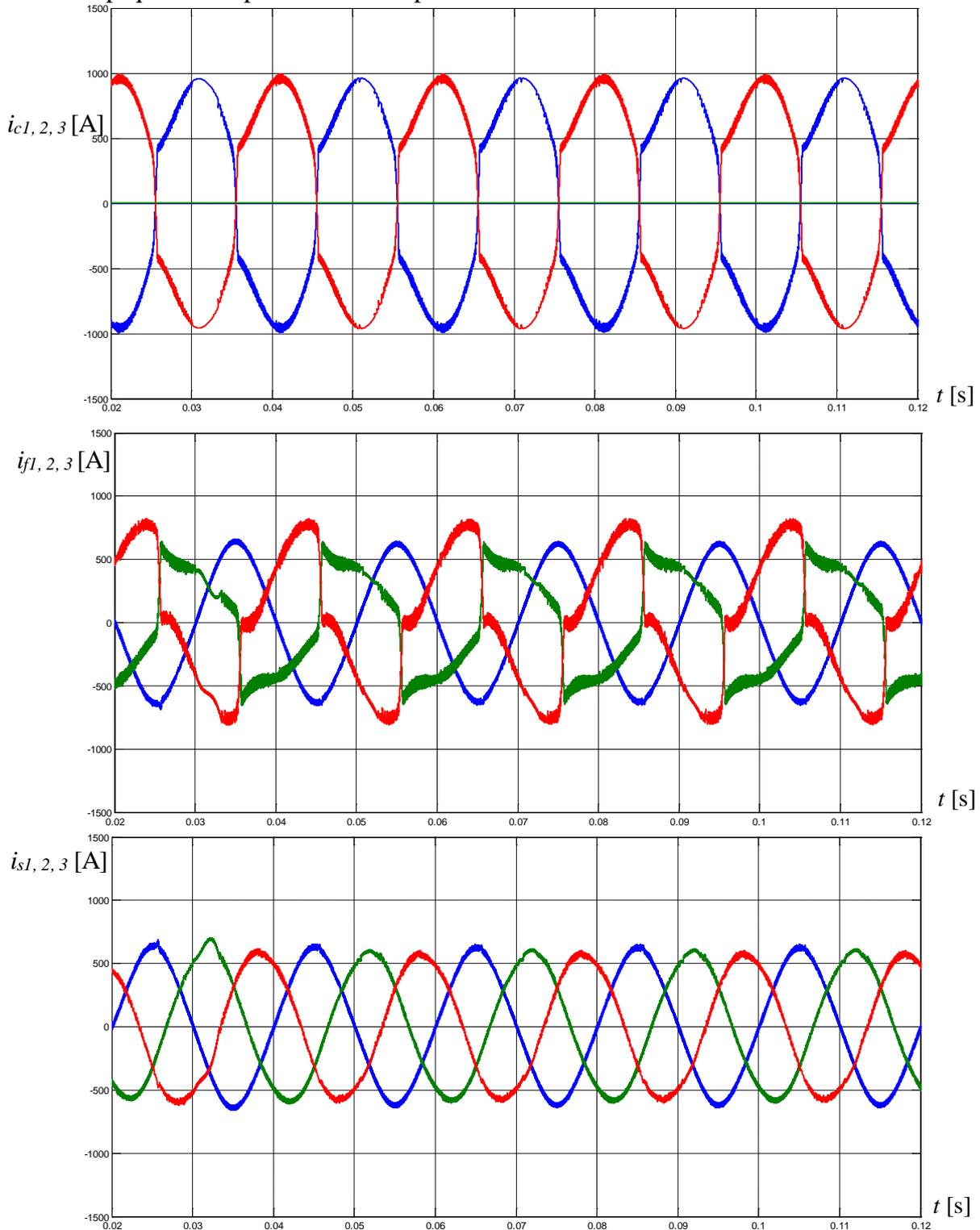


Figure 4-25 Résultats de simulation par la méthode indirecte p-q avec FPB avec défaut monophasé (a) $i_{c123}=f(t)$; (b) $i_{f123}=f(t)$, (c) $i_{s123}=f(t)$

Phase 01:

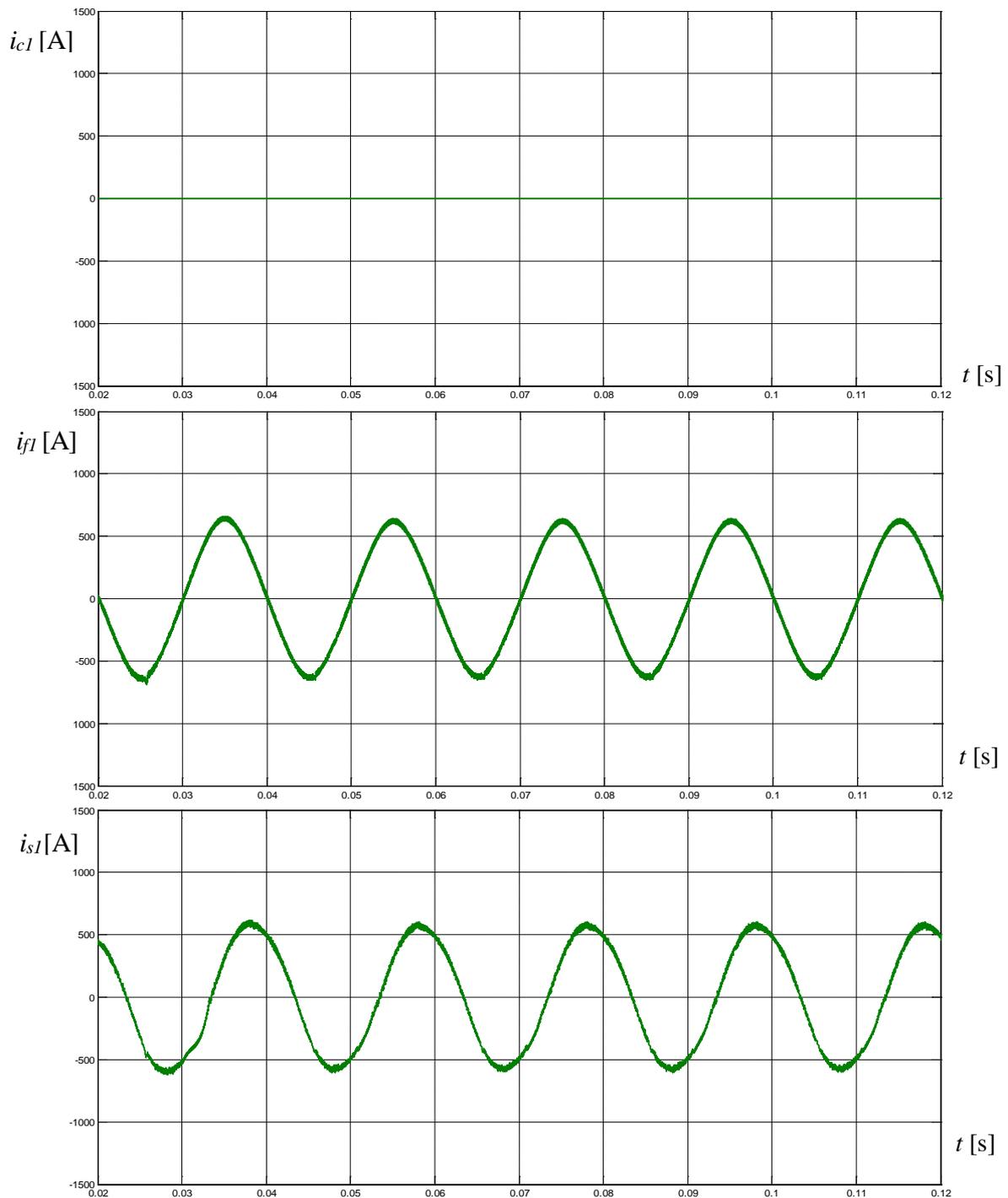


Figure 4-26 Résultats de simulation pour la première phase
 (a) $i_{c1}=f(t)$; (b) $i_{f1}=f(t)$, (c) $i_{s1}=f(t)$

On remarque que malgré la présence de défaut au niveau de la phase, l'emploi du filtre actif parallèle nous a permis d'avoir un courant quasi-sinusoidale coté source.

Phase 02:

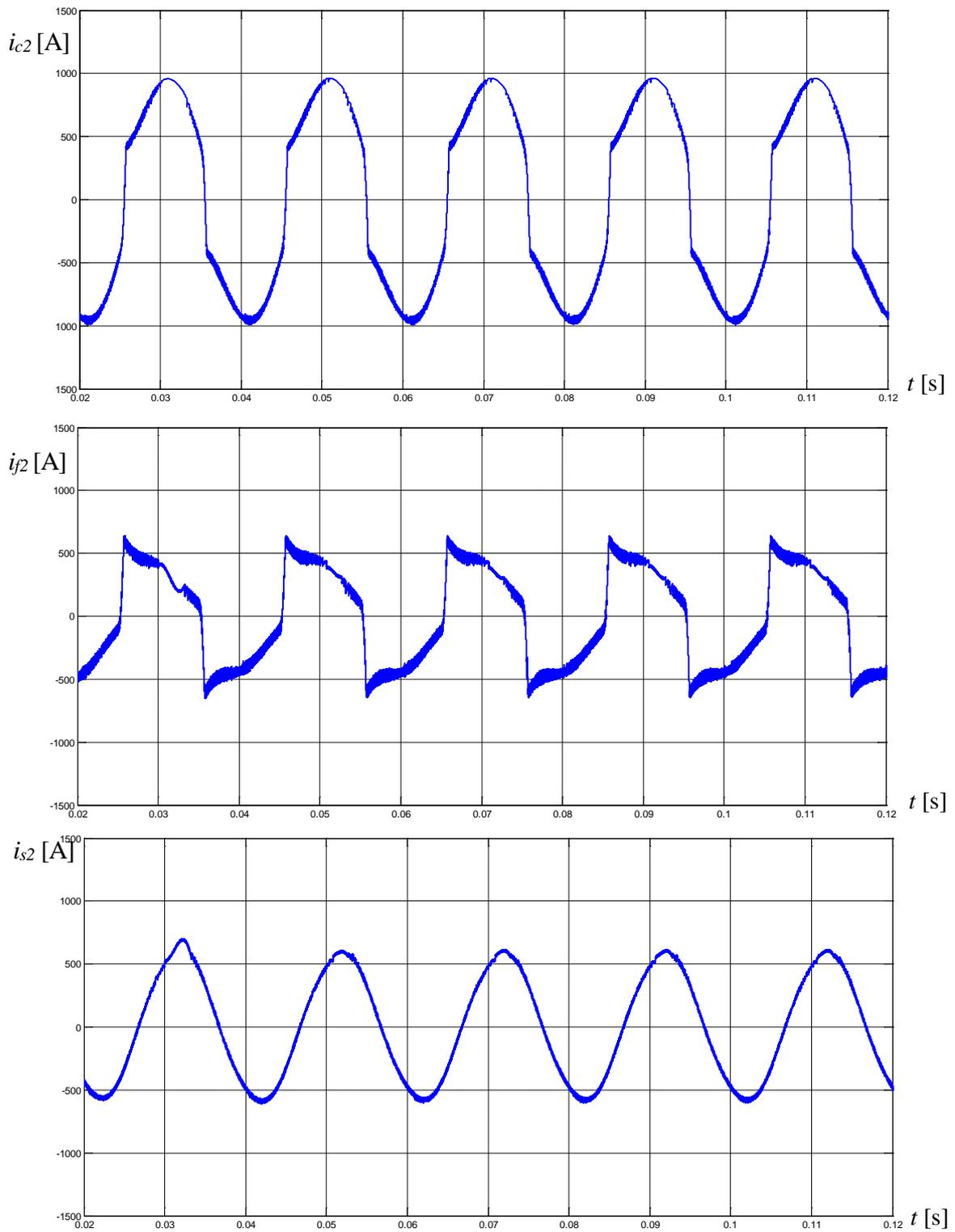


Figure 4- 27 résultats de simulation pour la deuxième phase
 (a) $i_{c2}=f(t)$; (b) $i_{fj2}=f(t)$, (c) $i_{s2}=f(t)$

Phase 03:

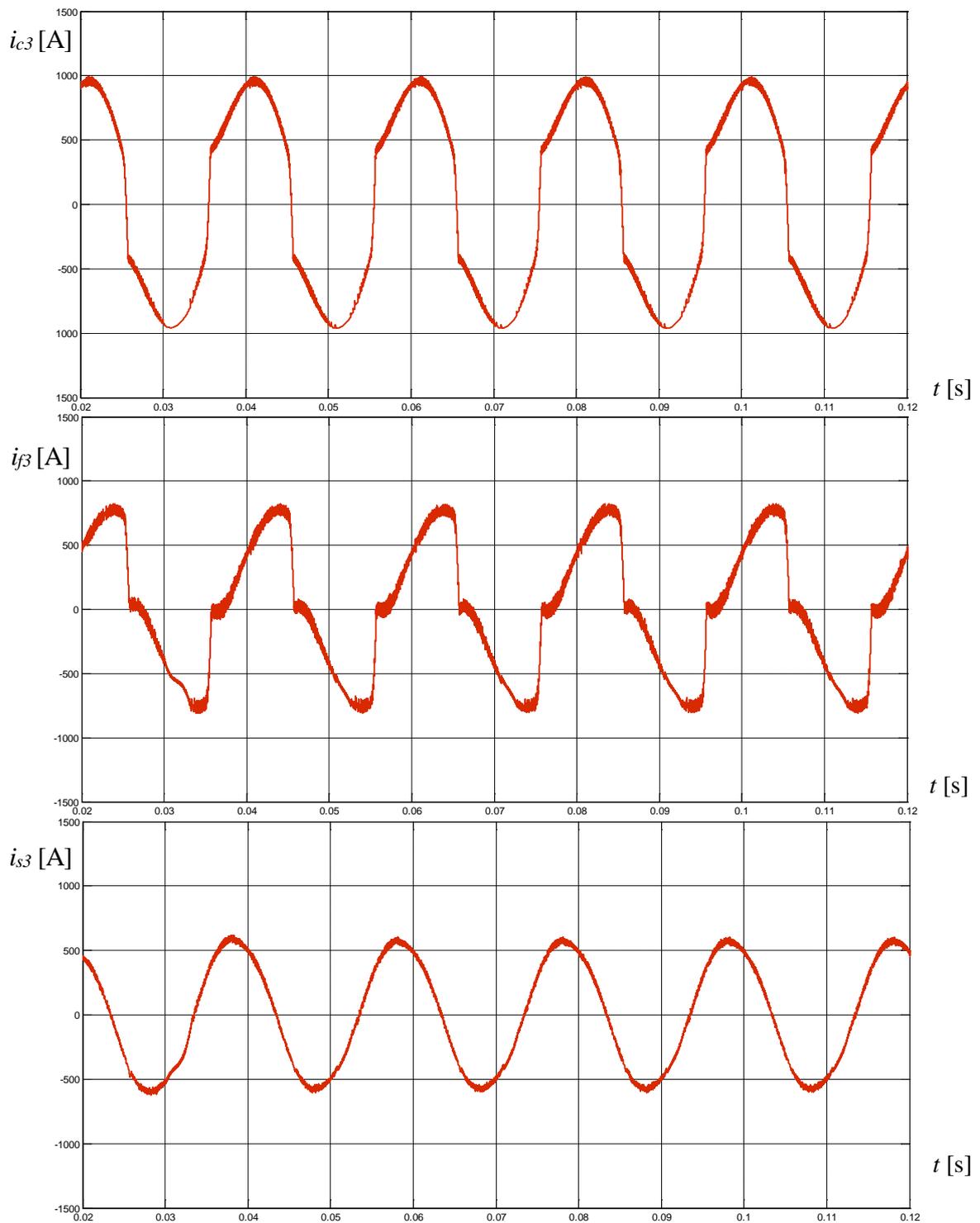


Figure 4-28 Résultats de simulation pour la troisième phase
 (a) $i_{c3}=f(t)$; (b) $i_{\beta}=f(t)$, (c) $i_{s3}=f(t)$

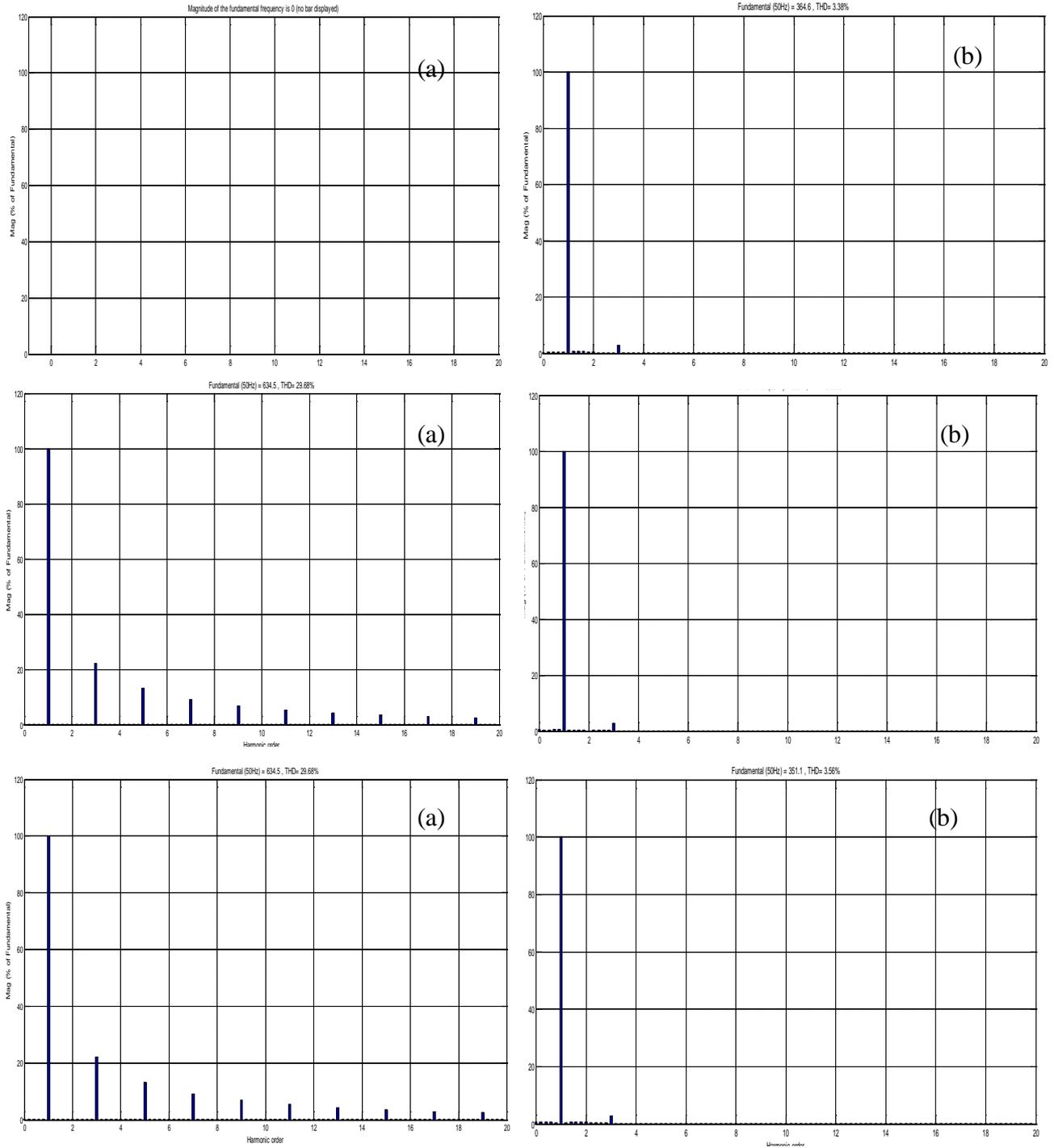


Figure 4-29 Représentation des THD obtenue par p-q indirecte avec un filtre passe bas
 (a) Avant filtrage , (b) après filtrage

4.2.2. Méthode indirecte des puissances instantanées par un filtre Adaline :

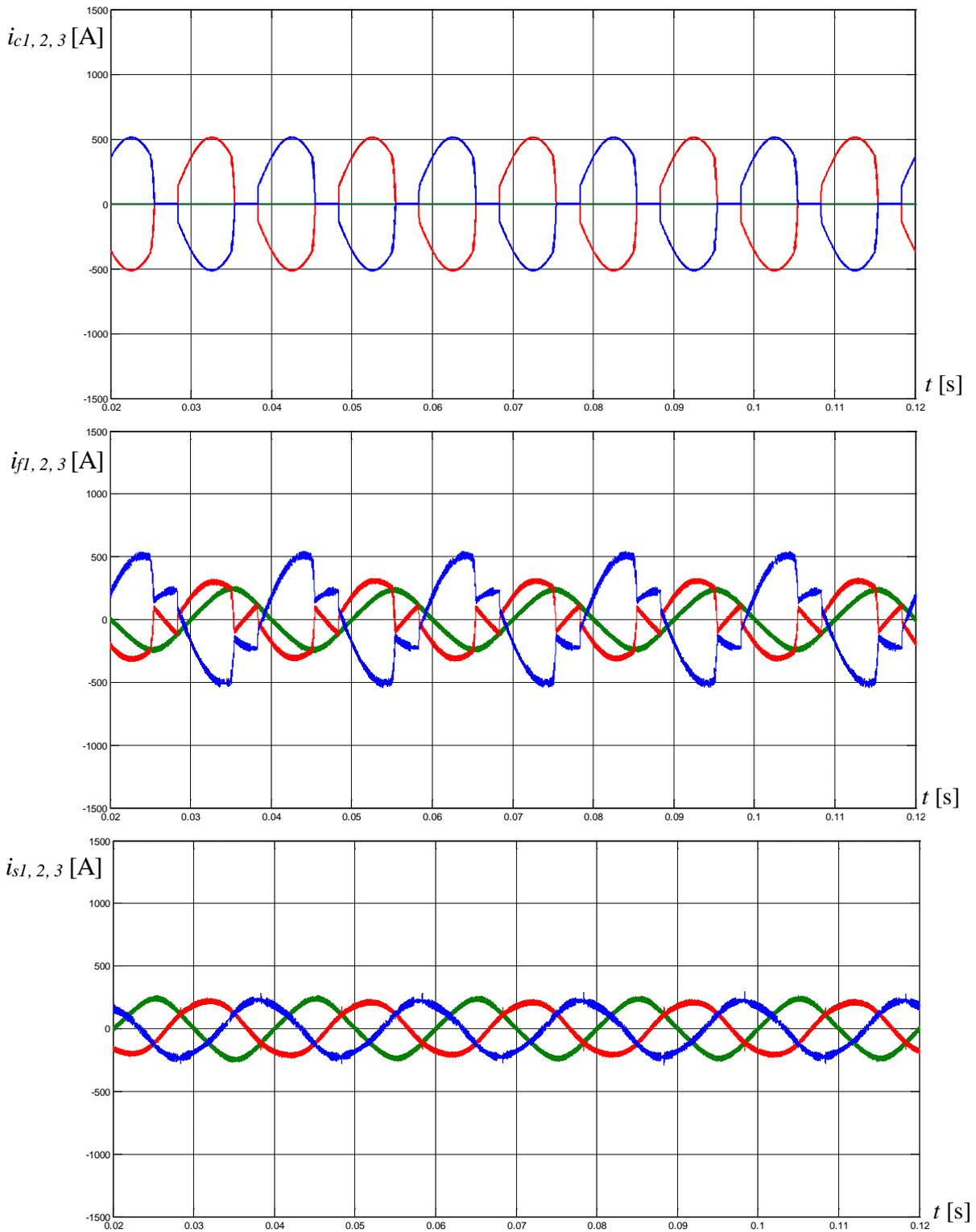


Figure 4-30 Résultats de simulation par la méthode directe des puissances Instantanées par un filtre Adaline suivant le régime déséquilibré
 (a) $i_{c123}=f(t)$, (b) $i_{f123}=f(t)$, (c) $i_{s123}=f(t)$

Phase 01:

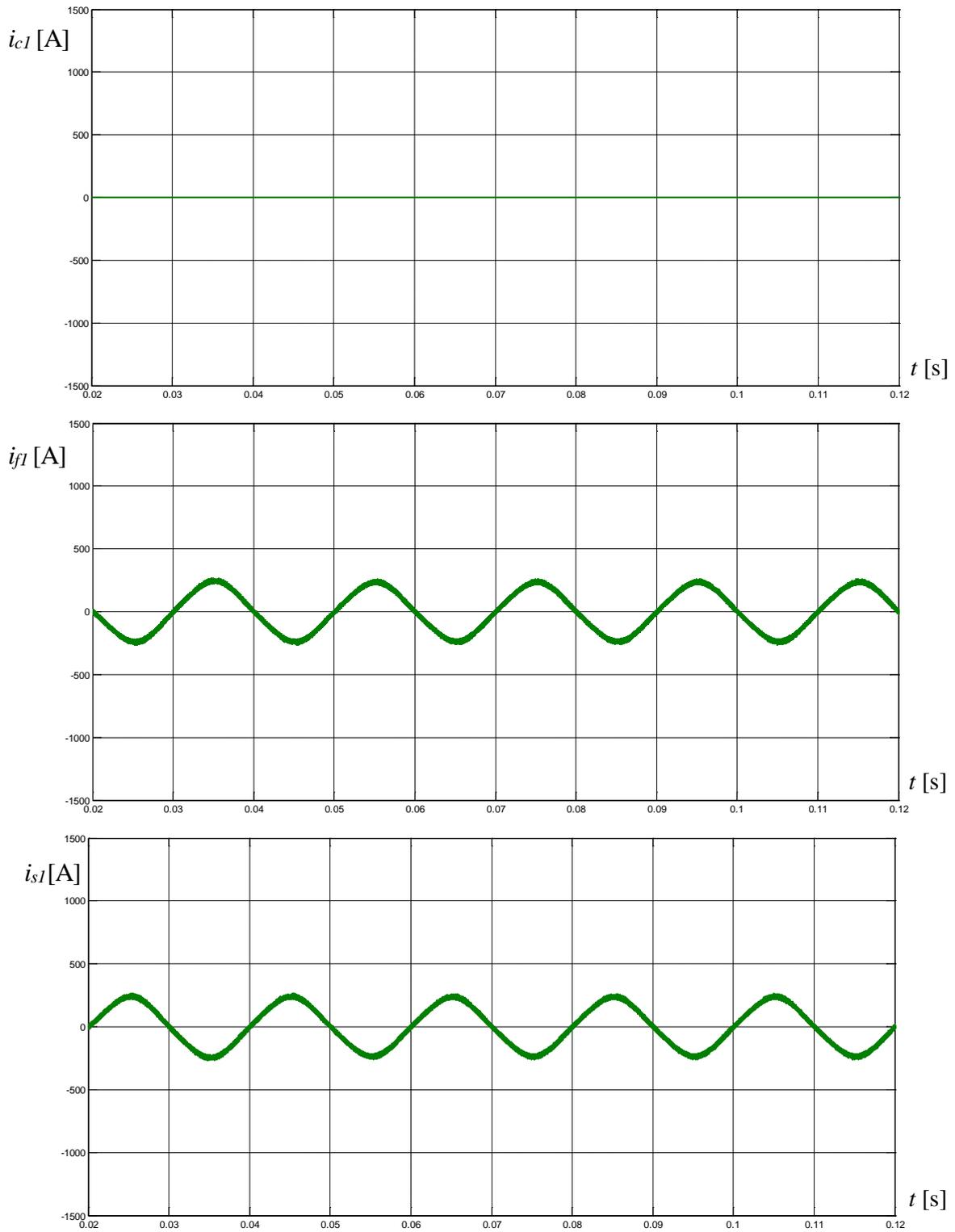


Figure 4- 31 Résultats de simulation pour la première phase
(a) $i_{c1} = f(t)$; (b) $i_{f1} = f(t)$; (c) $i_{s1} = f(t)$

Phase 02:

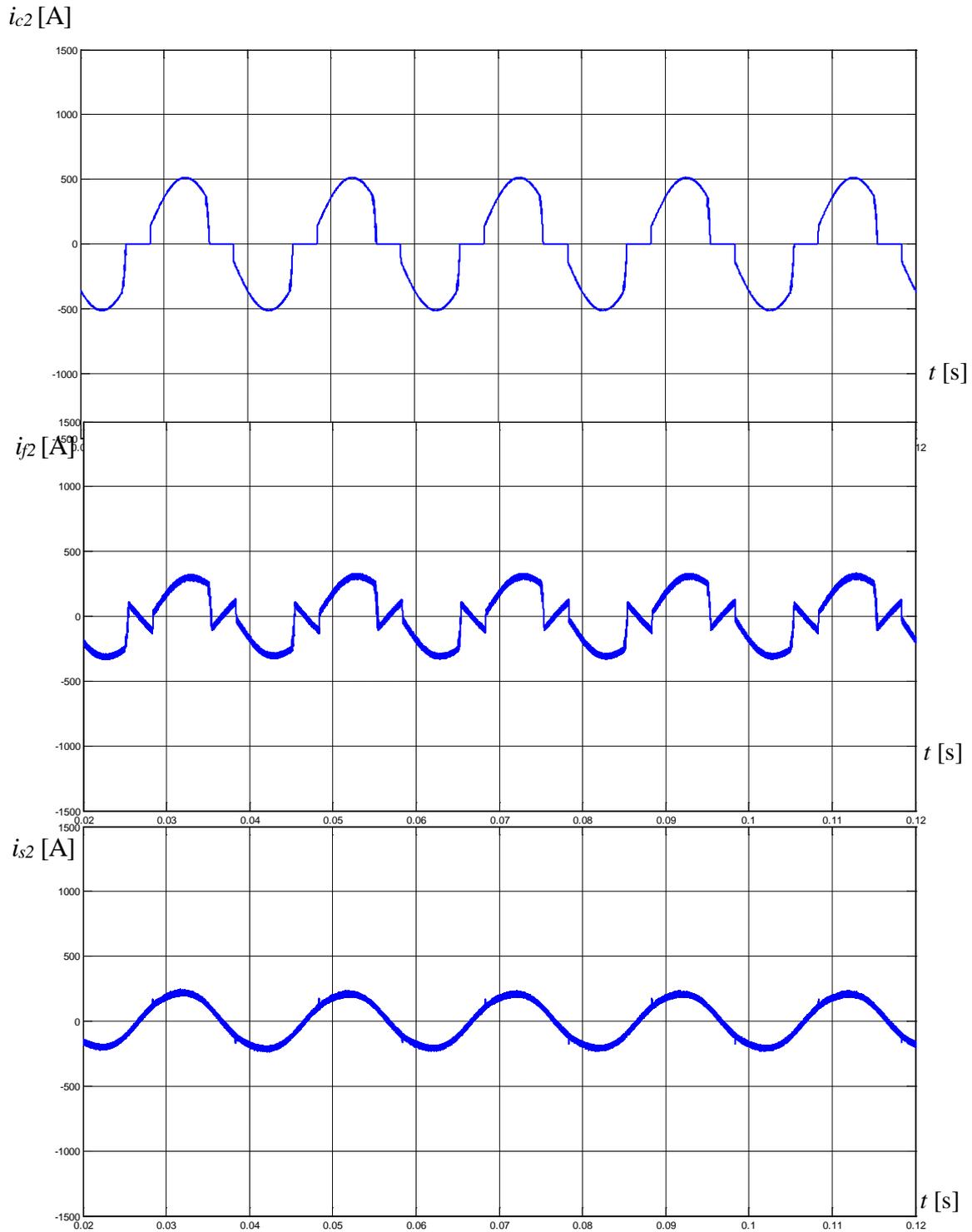


Figure 4-32 Résultats de simulation pour la deuxième phase
 (a) $i_{c2}=f(t)$; (b) $i_{f2}=f(t)$; (c) $i_{s2}=f(t)$

Phase 03:

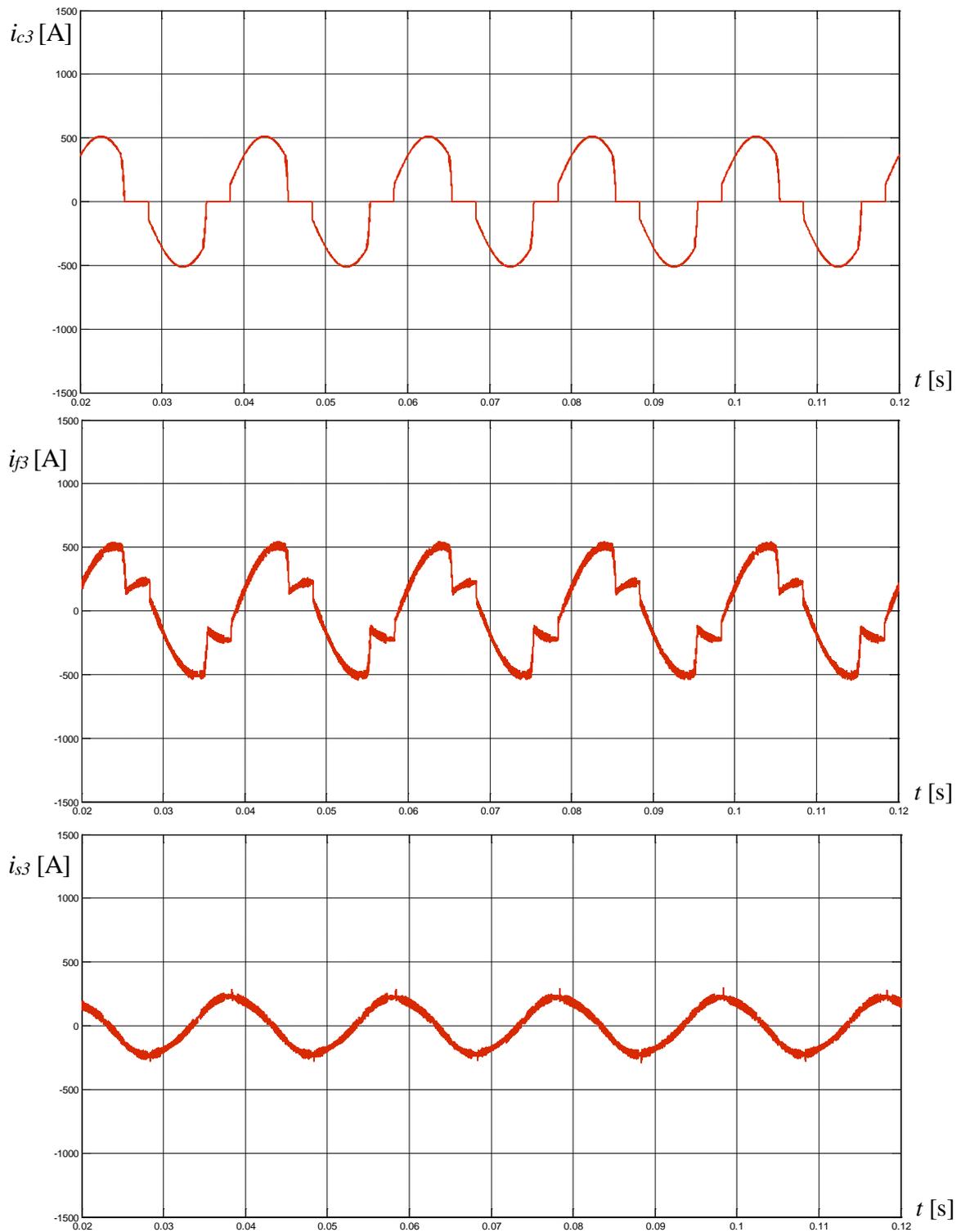


Figure 4-33 résultats de simulation pour la troisième phase
 (a) $i_c = f(t)_3$; (b) $i_{\beta} = f(t)$; (c) $i_{s3} = f(t)$

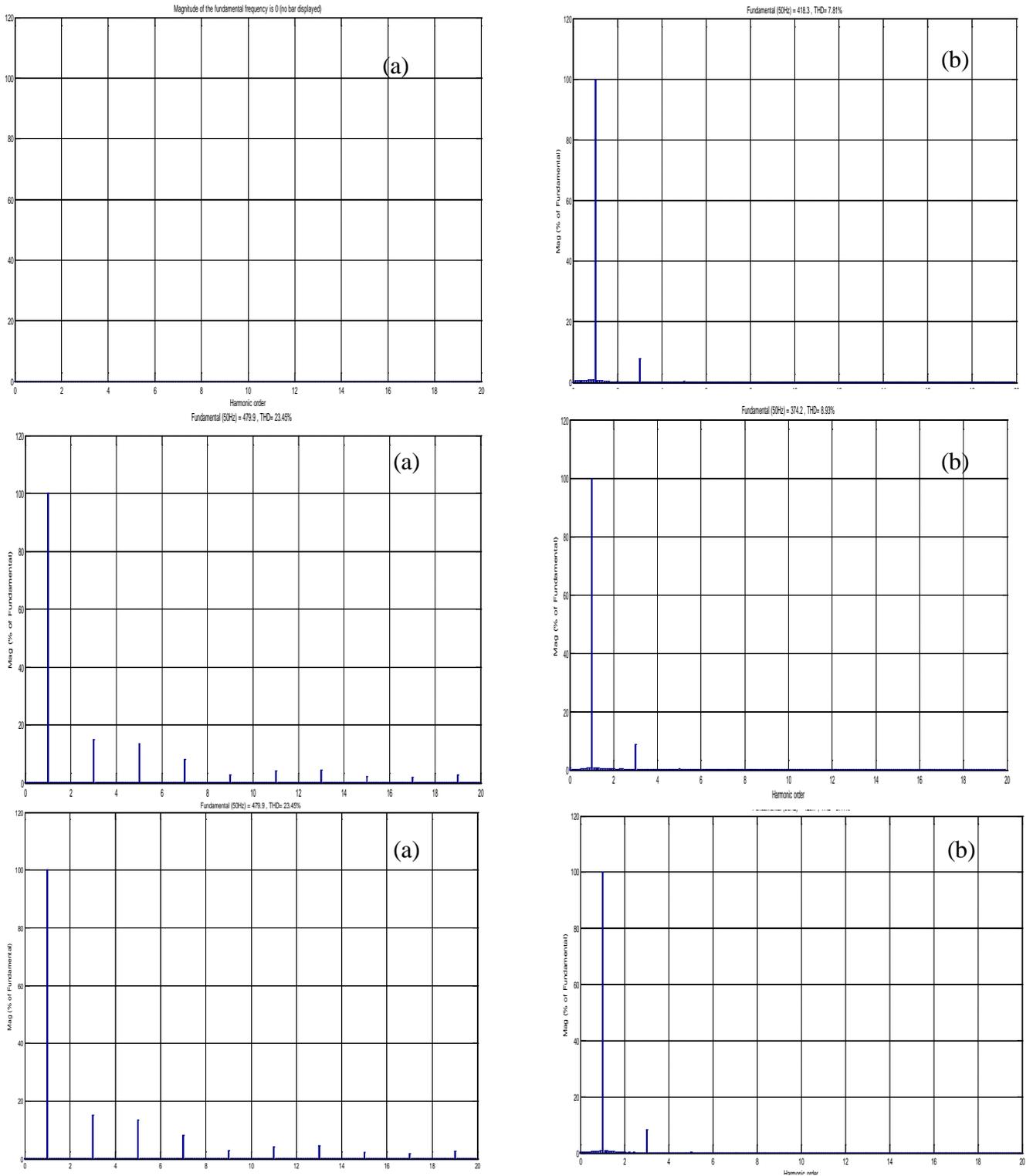


Figure 4-34 Représentation des FFT obtenue par p-q indirecte avec un filtre Adaline
 (a) Avant filtrage , (b) après filtrage

Phase 1	Sans FAP	Avec FAP	
		Pq_indirecte (FPB)	Pq_indirecte (Filtre Adaline)
1	*	100	100
3	*	2.78	2.71
5	*	0.23	0.37
7	*	0.07	0.14
9	*	0.14	0.07
11	*	0.13	0.03
13	*	0.10	0.07
15	*	0.09	0.05
17	*	0.07	0.06
19	*	0.08	0.02
THD%	*	3.38	3.52
Ampl. Max	*	257.8	295.8

Phase 2	Sans FAP	Avec FAP	
		Pq_indirecte (FPB)	Pq_indirecte (Filtre Adaline)
1	100	100	100
3	19.52	2.82	2.28
5	11.59	0.13	0.35
7	7.87	0.04	0.18
9	5.67	0.21	0.11
11	4.20	0.22	0.11
13	3.14	0.18	0.16
15	2.35	0.08	0.11
17	1.76	0.15	0.12
19	1.31	0.02	0.07
THD%	25.51	3.56	3.6
Ampl. Max	444.5	248.3	301

Phase 3	Sans FAP	Avec FAP	
		Pq_indirecte (FPB)	Pq_indirecte (Filtre Adaline)
1	100	100	100
3	19.52	0.80	2.75
5	11.59	0.27	0.55
7	7.87	0.12	0.25
9	5.67	0.07	0.14
11	4.20	0.14	0.15
13	3.14	0.19	0.25
15	2.35	0.09	0.13
17	1.76	0.18	0.14
19	1.31	0.07	0.07
THD%	25.51	3.65	4.43
Ampl. Max	444.5	249.9	264.6

Tableau 4-6 : Tableau récapitulatif des deux méthodes d'identification pour système déséquilibrés (défaut monophasé)

Conclusion :

A travers ce quatrième chapitre, il nous a été permis de confirmer et valider que l'emploi du filtre actif parallèle a permis de retrouver des courants coté source quasiment sinusoïdaux et en phases avec les tensions coté source en mode déséquilibré que ce soit au niveau de la charge triphasé ou lors d'un défaut monophasé coté charge.

L'emploi des quatre méthodes pour le régime déséquilibré a permis de déduire que la méthode indirecte des puissances instantanées par un filtre Adaline est la plus performante vis les résultats des THDs des courants de source pour les trois phases. Voir tableau 4-5.

Pour ce qui du fonctionnement en mode défaut monophasé, l'utilisation de deux méthodes d'extraction a permis de déduire que la méthode indirecte avec un filtre passe bas à été plus performante avec des THDs par phase inférieurs a celles pour la commande indirecte appliquant un filtre Adaline.

Conclusion générale

Les pollutions électriques sont principalement causées par des charges non linéaires, ces charges à base de composants d'électronique de puissance absorbent des courants non sinusoïdaux. Pour palier ce problème plusieurs solutions sont proposées dans la littérature.

Parmi ces solutions, nous avons opté pour la solution du filtrage actif de puissance de type shunt pour les nombreux avantages qu'ils présentent. Dans le cadre de notre étude la charge non linéaire est représentée par un pont redresseur triphasé débitant sur une charge $r-l$. dans ce cas le courant absorbé est du type alternatif et très riche en harmoniques.

Nous avons observé que la qualité du filtrage dépend essentiellement de la régulation du bus continu V_{dc} alimentant la capacité d'entrée de l'onduleur. Car cette dernière permet la compensation de l'énergie réactive. C'est pourquoi il est important de réaliser une régulation de ce bus continu. D'autre part il est essentiel de synthétiser des courants de référence de bonne qualité afin de rendre le filtrage efficace. Il existe plusieurs méthodes d'identification des courants de références. Dans notre mémoire on choisit la méthode basée sur les puissances instantanées et sa variante.

Pour la régulation de la tension du bus continu nous avons étudié une régulation classique du type PI. Concernant la commande des courants nous avons utilisé la commande par hystérésis classique.

Notre étude a consisté à effectuer des simulations appliquées à trois configurations de simulation qui couvre les régimes de fonctionnement : équilibré, déséquilibrés en charge, en cas d'un défaut monophasé côté charge.

Les résultats de simulation obtenus ont permis une compréhension approfondie du fonctionnement du filtre actif de puissance en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie. Une étude comparative des résultats issus des différentes techniques d'identification des courants de références et entre différents régimes. Les performances sont évaluées en matière de THD de courant de source.

Nos résultats montrent que la méthode indirecte des puissances instantanées par un filtre passe-bas donne de meilleurs résultats que ce soit pour le régime équilibré et

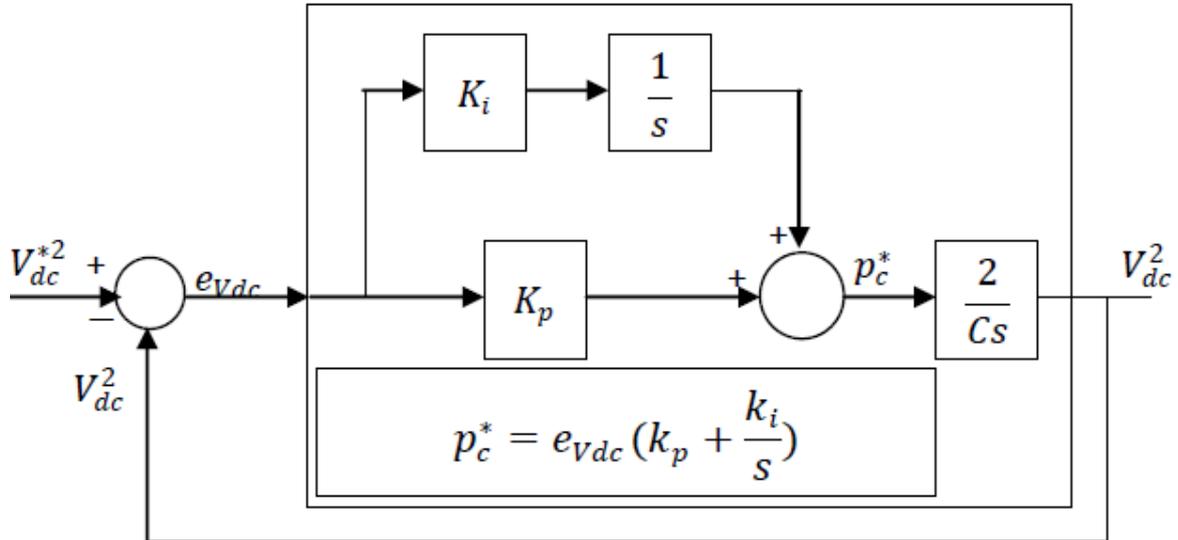
déséquilibré en présence d'un défaut monophasé. Et en régime déséquilibré en charge la méthode indirecte des puissances instantanées appliquant un filtre Adaline.

Plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- intégré des filtres actifs sélectifs pour les forts courants et tension
- Faire la même étude pour la MT
- Utilisation de nouvelles commandes plus évoluées à notre système, ...

ANNEXE A

Calcul du régulateur PI



La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par :

$$\frac{V_{dc}^2}{V_{dc\ ref}^2} = \frac{\frac{2k_p}{c}s + \frac{2k_i}{c}}{s^2 + \frac{2k_p}{c}s + \frac{2k_i}{c}}$$

La comparaison de cette fonction de transfert avec la forme générale d'une fonction de transfert de deuxième ordre, permet de donner :

$$k_i = \frac{1}{2} c \omega_c^2 \quad , \quad k_p = \xi \sqrt{2ck_i}$$

Avec $\omega_c = 2\pi f_c$

$$\xi = 0.707 \quad , \quad f_c = 40\text{Hz}$$

Références Bibliographiques

- [AB-08] M. M. Abdusalam, “ Structure et strategies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-France, 2008.
- [AK-83] H. Akagi, Y. Kanazawa et A. Nabae, « Generalized theory of the instantaneous reactive power in three- phase circuits”, In IPEC’83, Int. Power Electronics Conf., pp. 1375-1386, Tokyo , Japan, 1983.
- [AK-86] H. Akagi. “Control Strategy of Active Power Filters using Multiple Voltage-Source PWM Converters”. IEEE Trans. On Industrial Applications, vol. IA-22, n°3, p.460-465, 1986
- [AK-90] H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nabae, “Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters”, IEEE Trans. on Industry applications, vol. 26, No. 1, pp. 93-98, 1990.
- [AK-95] H. akagi, H. Fujita, « New Power Line Conditioner for Harmonic Compensaation in Power Systems » , IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 10, n°3, p. 1570-1575, Juillet 1995.
- [AK-05] H. Akagi. “Active Harmonic filters”. Proccedings IEEE, vol. 93, n°12,p. 2128-2141, décembre 2005.
- [AK-06] H. Akagi, “ Modern active filters and traditional passive filters”, Bulletin of the polish Academy of Sciences, Technical Sciences, vol. 54, No. 3, 2006.
- [AL-00] M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun, “Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced”, EPE- PEMC 2000, kotic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211-216, September 2000.
- [AL-02] Alali Mohamed Alaa Edin, “ Contribution à l’étude des compensateurs actifs des réseaux électriques », thèse de Doctorat en génie électrique, Université Louis Pasteur ULP, (France) 2002.
- [AS-05] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg and S. Hansen, “ Evaluation of harmonic detection methods for active power filter application”, Applied Power Electronics Conference and Exposition. APEC 2005. Twentieth Annual IEEE, pp. 635-641, Vol. 1, March 2005.

- [AU-97] V. Aburto, M. Schneider, L. Moran, J. Dixon. "An Active Power Filter Implemented with a three level NPC Voltage- Source Inverter". Conférence PESC'97, vol. 2, p. 1121-1126, Juin 1997.
- [BE-98] L. Benchaita, "Etude, par simulation numérique et expérimentation, d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle- commande » thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 30 Octobre 1998.
- [BE-02] M. C. Benslimane, « Compensation générale des harmoniques : Etude, dimensionnement et commande d'un filtre actif parallèle », Mémoire de Magister, Université M'hamed Bougara de Boumerdes, 2002.
- [BE-04] M. C. Benhabib , " Contribution à l'étude des différentes topologies et commandes des filtres actifs parallèles à structure tension, Modélisation, Simulation et validation expérimentale de la commande", Thèse, Université Henri Poincaré , Nancy- France, 2004.
- [BE-07] S. Beaulieu, " Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique », Mémoire présente comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie. Université du Québec a Chicoutimi 2007.
- [BH-91] S. Bhattacharya, D. M. Divan, B. Banerjee, "Synchronous frame harmonic isolator using active series filter", EPE'91, pp. 30-35, 1991.
- [BO-00] J. Bonal, G. Segulier, " Entrainement électrique à vitesse variables », technique et documentation, 2000.
- [BR-99] Bruant Nicolas, "Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles : Compensation globale ou sélective des harmoniques en régime équilibré », Thèse de Doctorat en génie électrique, Université de Nantes, (France) 1999.
- [CEI-90] CEI/ IEC 61000-2-1 :1990, " Electromagnetic Compatibility", Part 2: Environment, Sect. 1:" Description of the environment- Electromagnetic environment for low- frequency conducted disturbances and signaling in public power supply systems", First Edition,1990-05
- [CH-89] R .F. Chu, J.J. Burns, " Impact of Cycloconverter Harmonics", IEEE Trans on Ind Appl, vol. 25, no. 3 May/ June 1989, pp.427 -435.
- [CH-00] A. Chandra, B. Zingh, B. N. Zingh, K. Al-Haddad, " An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power factor correction and

balancing of nonlinear loads”, IEEE Trans. On power electronic, vol.15, No. 3, pp.495-507, May 2000.

[CH-04] Q. Chen, Z. Chen and M. McCormick, “ the application and optimization of C-type filter in a combined harmonic power filter”. 35th annual IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.

[CH-08] H.Cheung, A. Hamlyn, F. Chen, L. Wang, W. Liu, R. Cheung, Adaptative power Line Filter for Interfacing Wind- Power DGs to Distribution System, in proc. of Power and Energy Society General Meeting- Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008, pp 1- 7.

[DE-97] C. Dewez, “Modélisation d’un filtre actif parallèle triphasé pour la dépollution harmonique et synthèse d’une commande basée sur le rejet de perturbation ». thèse de Doctorat de l’université de Poitiers, France, 1997.

[DJ-07] H. Djeghloud, « Filtrage actif de puissance », Thèse de doctorat, Université de Constantine 2007.

[DZ-11] S. R. DZONDE NAOUSSI, « implantation De Réseaux Neuromimétiques sur Cible FPGA – Application à L’intégration D’un Sysytème de Filtrage Actif », thèse de Doctorat, Université De Strasbourg, 18 Novembre 2011.

[EP-10] M. D. Epanya, “ Application du filtrage actif pour une mise en œuvre de méthode de prédiction et de contrôle d’harmoniques dans un réseau de distribution électrique », Mémoire comme exigence partielle de la maîtrise en génie électrique. Université du Québec 2010.

[GH-05] : GHENNAM TAREK « Etude et Réalisation d’un Compensateur Actif de Puissance Commandé Par DSP » Thèse de Magister, Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, Janvier 2005. (simul)

[GO-97] T.Gouraud, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique ». thèse, Nantes, France, 1997

[GY-76] L. Gyugyi, E. C. Strycula, “Active AC Power Filters”. in proc. of IEEE-IAS Annual Meeting, pp. 529-535, 1976.

- [HA-99] K. Haddad, G. Joos, “three phase active filter topology based on reduced switch count voltage source inverter”, IEEE Power Electronics Specialists Conference, vol. 1, pp. 236-241, Aug. 1999.
- [KA-09] S. Karimi, “ Continuité de service des convertisseurs triphasé de puissance et prototype ‘ FPGA in the loop’ : application au filtre actif parallèle », thèse de Doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy –I, 26 Janvier 2009.
- [KI-06] R. Kiffouche, « Identification des harmoniques et génération de courants de référence : Application au convertisseur statiques » Mémoire de Magister, Université M’hamed Bougara de Boumerdes, Juillet 2006.
- [KO-04] A. E. kouzou, «Compensation active des perturbations dans un réseau basse tension » , Mémoire de Magister, Université M’hamed Bougara, Boumerdes, 2004.
- [LA-97] J.-S. Lai, T. S. Key, “Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipment for Commercial Office Buildings”, IEEE Trans. on Industrial Applications, vol. 33, n°4, p. 1104-1110, Juillet –Aout 1997.
- [MA-99] A. A. Mahdi, A. J. Hussain, and D. Al-Jumeily, Adaptative Neural Network Model Using the Immune System for Financial Time Series Forecasting, International Intelligence, Modelling and Simulation, pp 104-109,2009.
- [MI-04] H. Miranda, V. Cardenas, J. Pérez, C. Nunez. “A Hybrid Multilevel Inverter for Shunt Active Filter Using Space Vector Control”, in proc. of PESC’04, Aachen (Allemagne), 2004.
- [MO-95] L. A. Moran, J. Dixon, & R. R. Wallace « A three- phase active power filter operating with fixed switching frequency for reactive power and current harmonic compensation » , IEEE Transactions on Industrial Electronics, pp. 402-408, Vol.42, No.4, August 1995.
- [MO-02] S. Mouttou, “ Nouvelles approches de commande d’un filtre actif parallèle à source de courant », mémoire e maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2002.
- [MO-07] E. Monmasson, and Marcian N. Cirstea, “FPGA Design Methodology for Industrial Control Systems-A Review”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 54, No. 4, pp. 1824- 1842, 2007.

- [MO-08] : MOHAMED MUFTAH ABDUSALAM « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales » Thèse de doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, mai 2008.
- [NE-09] P. Neves, D. Goncalves, J. G. Pinto, R. Alves, J. L. Afonso, Single-phase Shunt Active Filter interfacing renewable energy sources with the power grid, in proc. of 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON'09), 2009, pp 3264-3269.
- [NI-96] S. Nia, “ Contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à commande analogique et numérique temps réel ». thèse de Doctorat de l' I.N.P.L, Nancy, (France) 1996.
- [OR-06] M. E. Ortuzar, R. E. Carmi, J. W. Dixon, L. Moran, « Voltage-Source Active Power Filter Based on Multilevel Converter and Ultracapacitor DC Link”, IEEE Trans. Ind. Electron. , vol. 53, No. 2, pp.477-485, April 2006.
- [OM-07] OMEIRI Amar, “ Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », thèse de Doctorat, université Annaba, 2007.
- [OU-05] D. Ould Abdeslam, “ Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension », thèse de Doctorat, université de Haute- Alsace, 8 décembre 2005.
- [PE-90] F. Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae. “ A Study of Active Power Filters Using Quad-Series voltage- Source PWM Converters for Harmonic Compensation”. IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 5,n° 1, p.983-990, Novembre- Décembre 1990.
- [PE-98] F.Z. Peng, “ Application issues of active power filter”, IEEE industry Applications Magazine., Vol. 4,pp. 21-30, Sept.- Oct. 1998.
- [PE-99] F.Z. Peng and D.J. Adams, “Harmonic source and filtering approaches- series/ parallel, active/passive, and their combined power filters”, Conference Record of the thirty-fourth IAS IEEE Annual Meeting., Vol. 1, pp. 448-455. 1999.
- [RA-86] C. Rambaut , G. Segulier et R. Bausiere. « la conversion alternatif-alternatif » , Tec & doc Lavoisier,1986, les convertisseurs d'électronique de puissance, volume 2.

- [RA-03] S. Rahmani and K. Al-Haddad, « A new indirect current control algorithm based on the instantaneous active current for reduced switch active filters ». EPE, ISBN 90-75815-07-7, pp 1-10, Toulous, 2003.
- [RA-10] K. S. Rani, K. Porkumaran, “Multilevel shunt active filter based on sinusoidal subtraction methods under different load conditions”, IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON), 2010, pp 692-697.
- [RE-03] S. Rechka, E. Ngandui, X. Jianhong, P. Sicard, “ Analysis of harmonic detection algorithms and their application to active power filters for harmonics compensation and resonance damping”, Can. J. Elect. Comput. Eng., vol. 28, pp. 41-51,2003.
- [RO-98] S. Round, H. Laird, R. Duke, C. Tuck,” An improved three-level shunt active filter”, Proc. Intern. Conf. power Electronic Drives & Energy systems for Industrial Growth, vol. 1, pp. 469- 479, 2002.
- [RO-07] M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa, “comparaison of voltage – source and current source shunt active power filters”, IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 22, No. 2. pp. 636-643, March 2007.
- [SI-99] B. Singh, K. Al-Haddad and A.C. Chandra, “ A review of Active Filters for Power Quality Improvement”, IEEE Trans. Industrial Electronics., Vol. 46, pp. 960-971, October 1999.
- [SU-90] J. Subjak, J. McQuilkin, “Harmonics Causes, effects, measurements and analysis: update,” IEEE Trans on Ind. Appl., vol. 26, n°6, Novembre/ Decembre 1990, pp.1034-1042.
- [TA-02] P.C. Tan, P C Loh, D. G. Holmes, R. E. Morrison : “Application of Multilevel Active Power Filtering to a 25 kV Traction System”, Conférence AUPEC’ 92, Mebourne (Australie), 2002.
- [TA-03] P. C. Tan, R. E. Morrison, D. G. Holmes. “Voltage Form Factor Control and Reactive Power Compensation in a 25-kV Electrified Railway System Using a shunt Active Filter Based on Voltage Detection”. IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 39, n°2, Mars/ Avril 2003.

[SI-99] B. Singh, K. Al-Haddad and A.C. Chandra, “ A review of Active Filters for Power Quality Improvement”, IEEE Trans. Industrial Electronics., Vol. 46, pp. 960-971, October 1999.

[WU-05] T.-F. Wu, H.-S. Nien, C.-L. Shen, C.-H. Chang, and J.-Y. Chiu, “ A Single- Phase Inverter System for PV Power Injection and Active Power Filtering With Nonlinear Inductor Consideration”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, No. 4, pp. 1075-1083, July/ August 2005.

Résumé :

Aujourd'hui la qualité de l'énergie électrique est devenue un problème majeur. L'énergie produite par les alternateurs subit des distorsions dues aux indépendances des lignes et aux courants prélevés par les charges non linéaires. Celles-ci, composées essentiellement des convertisseurs d'électroniques de puissance, absorbent des courants non sinusoïdaux et se comportent comme des générateurs de courants harmoniques.

Il existe plusieurs méthodes de dépollution des réseaux. Les méthodes traditionnelles consistent à utiliser des filtres passifs. Ces derniers ont des inconvénients tels que le manque de souplesse, l'encombrement et les problèmes éventuels de résonance avec le réseau, ce qui rend la solution d'une dépollution passive obsolète et inefficace.

Les progrès réalisés en électronique de puissance et en contrôle (puissance et fréquence de commutation des interrupteurs,...) permettent, actuellement, de concevoir des solutions modernes et efficaces basées essentiellement sur l'utilisation de filtres actifs. Un filtre actif est composé généralement d'un onduleur de tension judicieusement commandé afin de générer des courants harmoniques de même amplitude et en opposition de phase avec les harmoniques que l'on désire compenser.

L'objectif de notre travail est l'étude d'un filtre actif parallèle triphasé. Le filtre actif est commandé par hystérésis, et l'extraction est faite par méthode des puissances instantanées directe et indirecte et celle indirect des puissances instantanées modifiées.

Mots clés :

Filtre actif parallèle, harmonique, onduleur, hystérésis, Adaline.

Summary:

Today the quality of electric power has become a major problem. The energy produced by the generators is distorted due to the independence of the lines and the currents drawn by non-linear loads. These mainly consist of electronic power converters, absorb non-sinusoidal currents and behave as generators harmonic currents. Crossing the line impedance, these harmonic currents carry harmonic voltage at the connection point.

There are several methods of depollution networks. Traditional methods include the use of passive filters. These have drawbacks such as lack of flexibility, the size and potential problems of resonance with the network. Furthermore, polluting harmonics cover a wide frequency range and fluctuating, making the solution an outdated and inefficient passive remediation.

Advances in power electronics and controls (power switches and switching frequency, automatic tool and signal processing) can at present to design modern and effective solutions based mainly on the use of active filters. An active filter is generally composed of a voltage inverter judiciously controlled to generate current (voltage) harmonic of the same amplitude and out of phase with the harmonics which it is desired to compensate.

the objective of our work is the study of a three-phase parallel active filter. The active filter is controlled by hysteresis and the extraction and made by method of direct and indirect instantaneous power and the indirect change of instantaneous power.

Keywords:

Parallel active filter, harmonic, UPS, hysteresis, Adaline.

اليوم أصبحت جودة الطاقة الكهربائية مشكلة كبيرة. مشوهة الطاقة التي تنتجها المولدات نظرا لاستقلال الخطوط والتيارات التي رسمها الأحمال غير الخطية. هذه تتكون أساسا من محولات الطاقة الالكترونية واستيعاب تيارات غير الجيبية وتتصرف كما مولدات التيارات التوافقية. عبور خط مقاومة، هذه التيارات التوافقية تحمل الجهد التوافقي عند نقطة الاتصال

وتشمل الطرق التقليدية استخدام مرشحات السليبي. هذه لها عيوب مثل عدم وجود المرونة، وحجم. تنظيف هناك عدة طرق لشبكات والمشاكل المحتملة الرنين مع الشبكة. وعلاوة على ذلك، التوافقيات الملوثة تغطي مجموعة واسعة تردد وتذبذب، مما يجعل من حل لمعالجة السليبي قديمة وغير فعالة

التقدم في الالكترونيات والكهرباء والتحكم (مفاتيح السلطة وتردد التبديل، أداة آلية ومعالجة الإشارات) يمكن في الوقت الحاضر لتصميم حلول حديثة وفعالة تقوم أساسا على استخدام المرشحات النشطة. عامل تصفية نشطة تتكون بشكل عام من الجهد العاكس التي تسيطر عليها بحكمة لتوليد الحالي (الجهد) من نفس السعة والتوافقيات في المعارضة المرحلة مع التوافقيات التي هو المطلوب للتعويض.

الهدف من عملنا هو دراسة من ثلاث مراحل تصفية مواز نشط. يتم التحكم في تصفية النشاط التباطؤ، واستخراج والتي أدلى بها أسلوب القوة لحظية المباشرة وغير المباشرة والتغير غير المباشر للقوة لحظية

الكلمات المفتاحية:

Adaline، التباطؤ، UPS مرشح مواز نشط، التوافقي،