

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE
L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERSCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

FACULTE : TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT : GENIE ELECTRIQUE

N°: RE_07



DOMAINE : GENIE ELECTRIQUE

FILIERE : ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

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

Par: DEMBRI Hadjira

Intitulé

**Performance de méthode de diagnostic des
défauts de circuit ouvert d'un filtre actif
parallèle**

Soutenu devant le jury composé de:

Mr. BENGUESMIA Hani	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Président
Mr. BENYETTOU Loutfi	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Rapporteur
Mr. BAHIDDINE Miloud	Université Mohamed Boudiaf - M'sila	Examineur

Année universitaire : 2018 / 2019



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ





REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier tout premièrement Allah le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné durant toutes ces longues années.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à mon encadreur Monsieur Benyettou Lotfi pour avoir d'abord proposé ce thème, pour leur suivi continuuel tout au long de la réalisation de ce mémoire et qui n'ont pas cessé de nous donner leurs conseils.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants et le chef de département Génie électrique qui a contribué à notre formation.

Nos sincères remerciements à tous les membres de jury qui nous ont fait l'honneur en acceptant d'examiner ce travail.

Enfin, un remerciement spécial à mes amis pour le soutien moral.



إهداء

إلى من أروضتني الحب والعنان
إلى من جرعت الكأس فارغا لتسقينني قطرة حب
إلى من كتبت أناملها لتقدم لنا لحظة سعادة
إلى من صدت الأشواك عن دربي لتمهد لي طريق العلم
إلى من علمتني الصمود مهما تبدلت الظروف

"أمي الحبيبة"

إلى روح أبي الغالي رحمه الله

الذي أفتقده اليوم كثيرا

إلى أختي إكرام

إلى كل من ساندني في مشواري الدراسي من القريب ومن البعيد

إلىكم

Sommaire

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOTAIONS ET ABREVIATIONS

INTRODUCTION GENERALE.....1

CHAPITRE I : Les convertisseurs statiques DC/AC :

Généralités, défauts et méthodes de diagnostic

I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition de l'onduleur	4
I.3 Principe générale de fonctionnement	5
I.4 Les application des onduleurs	6
I.5 Classification des onduleurs	7
I.5.1. Les onduleurs à résonance.....	7
I.5.2. Onduleur non autonome	7
I.5.3. Onduleur autonome	7
I.5.3.1 Les onduleurs (autonome) de courants	7
I.5.3.2 Les Onduleurs (autonomes) de tension	8
I.6 Onduleur de tension à deux niveaux	8
I.7 Présentation des différentes défaillances sur un convertisseur de puissance.....	9
I.7.1. Défaillance du condensateur	9
I.7.1.1 Cas des condensateurs électrolytiques.....	9
I.7.1.2 Cas des condensateurs à films métallisés	12
I.7.2. Défaillance de diodes classiques	12
I.7.3. Défaillance d'un exemple d'interrupteur statique : l'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).....	13
I.7.3.1. Court-circuit.....	13
I.7.3.2.Circuit ouvert.....	13
I.7.3.3.Vieillessement	14

I.7.3.4. Défaillance du circuit commande (Vieillessement de l'optocoupleur).....	14
I.7.4. Défauts capteurs	15
I.8 Principe et méthodes de diagnostic des convertisseurs statiques	16
I.8.1. Principe du diagnostic	16
I.8.1.1 Définition.....	16
I.8.2. Présentation des méthodes de diagnostic	16
I.8.3. Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs, quantitatifs.....	17
I.8.3.1 Méthodes de diagnostic à base de modèle et sans modèle	17
I.8.4. Classifications des méthodes de diagnostic	19
I.8.4.1 Méthodes internes.....	20
I.8.4.2 Méthodes externes	20
I.8.4.3 Méthodes inductives	20
I.8.4.4 Méthodes déductives	21
I.8.4.5 Traitement signal	21
I.9 Conclusion	21

CHAPITRE II: Perturbation des réseaux électriques

II.1 Introduction	22
II.2 Perturbations électriques et leurs origines	22
II.2.1. Perturbation harmonique.....	23
II.2.2. Sources des harmoniques.....	24
II.2.2.1 Source harmonique identifiable	24
II.2.2.2 Source harmonique non identifiable	25
II.2.3. Effets des harmoniques	25
II.2.4. Caractérisation des perturbations harmoniques	26
II.2.4.1 Le taux de distorsion harmonique	26
II.2.4.2 Le facteur de puissance	27
II.3 Solutions traditionnelles de réduction des perturbations.....	28
II.3.1. Solutions classiques	28
II.3.1.1 Agir sur la structure de l'installation	28
II.3.1.2 Augmentation de la puissance de court-circuit	28
II.3.1.3 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique	28

II.3.1.4 Compensation de la puissance réactive	29
II.3.1.5 Filtrage passif	29
II.3.2. Nouvelles solutions de dépollution	30
II.3.2.1 Les redresseurs à MLI	30
II.3.2.2 Filtres actifs	30
II.3.2.3 Filtre actif parallèle	31
II.3.2.4. Filtre actif série.....	31
II.3.2.5 Filtre actif hybride	32
II.4 Applications des filtres actifs parallèles	33
II.5 Conclusion	34

CHAPITRE III: Etude du Filtre Actif Parallèle à Deux Niveaux

III.1 Introduction	35
III.2 Principe de filtrage actif parallèle	35
III.3 Structure générale du filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension à deux niveaux	37
III.3.1. Topologie générale	37
III.3.1.1 Partie commande.....	37
III.3.1.2 Partie puissance.....	37
III.3.2. Onduleur de tension à deux niveaux.....	38
III.3.2.1 Structure générale	38
III.3.2.2 Tension générées par l'onduleur	38
III.3.2.3 Représentation vectorielle des tensions générées	39
III.4 Contrôle du FAP à base d'onduleur de tension à deux niveaux.....	40
III.4.1. Identification des courants harmoniques par méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.....	40
III.4.2. Régulation du courant du filtre actif parallèle	45
III.4.2.1 Modèle mathématique du FAP dans le repère	45
III.4.2.2 Synthèse du régulateur du courant	46
III.4.3. Régulation de la tension continue.....	47
III.4.3.1 Principe de la régulation	48
III.4.3.2 Synthèse du régulateur de tension.....	48
III.4.4. Stratégie de commande de l'onduleur à deux niveaux	50

III.4.4.1 Commande par hystérésis	50
III.4.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion	51
III.5 Conclusion.....	52

CHAPITRE IV : Simulation et interprétation des résultats

IV.1 Introduction.....	53
IV.2 Résultats de simulation	53
IV.2.1. Résultats de simulation de l'ensemble réseau, charge non-linéaire avant le filtrage.	54
IV.2.2. Résultats de simulation de l'ensemble réseau, charge non-linéaire après le filtrage en mode de fonctionnement sain	56
IV.2.3. Résultats de simulation de l'ensemble réseau, charge non-linéaire après le filtrage en mode dégradé (défaillant)	59
IV.2.4. Les résultats de simulation en état sain et en état défaillant.....	72
IV.3 Conclusion	73
CONCLUSION GENERALE.....	74

BIBLIOGRAPHIE

RESUME

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1: Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie	5
Figure I.2 : Symbole et signal d'un onduleur	5
Figure I.3 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle.....	6
Figure I.4 : Signal complet de l'onduleur	6
Figure I.5 : a) Onduleur de tension monophasé en demi-pont	8
Figure I.5 : b) Onduleur de tension monophasé en pont	8
Figure I.5 : Représentation schématique d'un onduleur de tension à deux niveaux	9
Figure I.6 : Schéma équivalent d'un condensateur réel	10
Figure I.7 : Schéma équivalent simplifié du condensateur	10
Figure I.8 : Tension en sortie du filtre.....	11
Figure I.9 : Fiabilité des technologies dans les drivers de commande.....	14
Figure I.10 : Courbes de CTR - Composant sain et composant défaillant.....	15
Figure I .11 : Présentation des méthodes de diagnostic	17
Figure I .12 : Structure d'un système de diagnostic à base d'un modèle.....	18
Figure I .13 : Détection de défauts basée sur les modèles.....	18
Figure I .14 : Structure d'un système de diagnostic orienté données.....	19
Figure I .15 : Méthodes de diagnostic	20

CHAPITRE II

Figure II.1 : Diagramme de Fresnel des puissances.....	27
Figure II.2 : a) Structure du filtre résonant.....	30
Figure II.2 : b) Montage du filtre amorti	30
Figure II.2 : filtrage passif.....	30
Figure II.3 : Filtre actif parallèle	31

Figure II.4 : Filtre actif série	32
Figure II.5 : a) Filtre combiné actif parallèle et passif parallèle	32
Figure II.5 : b) Filtre combiné actif série et passif parallèle	32
Figure II.5 : d) Combinaison parallèle-série.....	33
Figure II.5 : Filtre actif hybride.....	33

CHAPITRE III

Figure III.1 : Raccordement du FAP avec le réseau.....	36
Figure III.2 : schéma synoptique d'un filtre actif parallèle.....	36
Figure III.3 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle à deux niveaux	37
Figure III.4 : Onduleur de tension triphasée	38
Figure III.5 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur	40
Figure III.6 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances.....	43
Figure III.7 : Schéma de principe d'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.	44
Figure III.8 : Circuit monophasé équivalent d'un filtre actif parallèle	45
Figure III.9 : Schéma de la régulation des courants du SAPF	46
Figure III.10 : Schéma simplifié de la régulation.....	47
Figure III.11 : Boucle de régulation de la tension continue	49
Figure III.12 : Principe de commande des courants par hystérésis	51
Figure III.13 : Principe de commande des courants par MLI	51

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : Le courant de ligne généré par la charge non linéaire	55
Figure IV.2 : Spectre harmonique du courant de ligne généré par la charge non linéaire	56
Figure IV.3 : Le Courant et la tension à la sortie des redresseurs.....	56
Figure IV.4 : courant de la référence.....	57
Figure IV.5 : courant injectés par filtre	57
Figure IV.6 : courants harmonique et référence.....	58
Figure IV.7 : Le courant de source après filtrage.....	58

Figure IV.8 : spectre harmonique du courant de source après compensation.....	58
Figure IV.9 : courant Ifa de filtre	59
Figure IV.10 : courant Ifb de filtre	59
Figure IV.11 : courant Ifc de filtre	59
Figure IV.12 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc.....	60
Figure IV.13 : courant Ifa de filtre	61
Figure IV.14 : courant Ifb de filtre	61
Figure IV.15 : courant Ifc de filtre	62
Figure IV.16 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc.....	62
Figure IV.17 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique.....	63
Figure IV.18 : courant Ifa de filtre	64
Figure IV.19 : courant Ifb de filtre	64
Figure IV.20 : courant Ifc de filtre	65
Figure IV.21 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc.....	65
Figure IV.22 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique.....	66
Figure IV.23 : courant Ifa de filtre	67
Figure IV.24 : courant Ifb de filtre	67
Figure IV.25 : courant Ifc de filtre	67
Figure IV.26 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc.....	68
Figure IV.27 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique.....	69
Figure IV.28 : courant Ifa de filtre	70
Figure IV.29 : courant Ifb de filtre	70
Figure IV.30 : courant Ifc de filtre	70
Figure IV.31 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc.....	71
Figure IV.32 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique.....	71
Figure IV.33 : courant Ifa de filtre	72
Figure IV.34 : courant Ifb de filtre	72
Figure IV.35 : courant Ifc de filtre	73
Figure IV.36 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc.....	73
Figure IV.37 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique.....	74
Figure IV.38 : courant Ifa de filtre	75
Figure IV.39 : courant Ifb de filtre	75
Figure IV.40 : courant Ifc de filtre	75

Figure IV.41 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc..... 76
Figure IV.42 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique..... 77

Liste des tableaux

CHAPITRE II

Tableau II.1: les différentes perturbations électriques 23
Tableau II.2 : Principales charges polluantes 24

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Tensions en sortie de l'onduleur du FAP 39
Tableau III.2 : Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées..... 44

CHAPITRE IV

Tableau IV.1: Paramètres de simulation d'un filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension à deux niveaux..... 54
Tableau IV.2 : Les résultats de simulation en état sain et en état défaillant 72

Notations et symboles

FAP	Filtre actif parallèle
SAPF	Shunt Active Power Filter
THD	Total Harmonic Distortion
THD _i	Le taux de distorsion harmonique en courant
THD _v	Le taux de distorsion harmonique en tension
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
DC/AC	Convertisseur DC/AC (Onduleur)
GTO	Gate turn off thyristor
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
CALC	Circuit d'aide à la commutation
LED	Light-Emitting Diode
CTR	Current Transfer Ratio
FP	Facteur de puissance
PLL	Phase locked loop
V _{dc}	Tension continue appliquée à l'onduleur (ponts d'onduleur)
h	Rang de l'harmonique
L	Inductance
C	Capacité
T, D, K	Transistor et diode et leur interrupteur équivalent
S1, S2, S3	Etats logiques des interrupteurs de l'onduleur
R _p	Résistance parallèle représentant les pertes diélectriques et les fuites entre les deux électrodes (pour les condensateurs électrolytiques à l'aluminium, celle-ci est due à la présence des couches d'alumine)
R _{se}	Résistance série des connexions et des armatures

L_{se}	Inductance équivalente série des connexions et des enroulements
C_i	Capacité idéale anode-cathode
ESR	Résistance équivalente série représentant toutes les pertes dans les condensateurs (fonction de la fréquence)
ESL	Inductance équivalente série identique à L_{se}
V_{condo}	Tension instantanée aux bornes du condensateur du filtre de sortie du redresseur
V_{moy}	Valeur moyenne de la tension instantanée aux bornes du condensateur du filtre de sortie du redresseur
Z_{th}	Impédance thermique d'une diode
1, 2, 3 ou a, b, c	Indices de phase
V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}	Tension du réseau électrique sur la phase 1, 2, 3
I_{s1}, I_{s2}, I_{s3}	Courant du réseau électrique sur la phase 1, 2, 3
I_{L1}, I_{L2}, I_{L3}	Courant de la charge polluante sur la phase 1, 2, 3
I_f	Courants du filtre
L_f	Inductance de la sortie du filtre
L_s	Inductance de lissage à l'entrée de la charge non-linéaire
R_1, R_2	Résistances des charges continues
L_1, L_2	Inductances des charges continues
V_α, V_β	Tension du réseau électrique dans le repère de Concordia
I_α, I_β	Courants de la charge non-linéaire dans le plan (α, β)
p	Puissance active instantanée
q	Puissance réactive instantanée
\bar{P}	Puissance active continue
\bar{q}	Puissance réactive continue
$\omega_0 = 2\pi f_0$	Pulsation du filtre passe-bas
f_0	Fréquence de coupure du filtre passe-bas
S	Opérateur de Laplace

ξ	Coefficient d'amortissement
V_f	Tension du filtre actif
ΔI	Différence entre le courant de référence et le courant mesuré
t	Temps
i_{aref}	Courants de référence de la phase a ou phase 1
i_{inj}	Courant injecté par le FAP
D	Puissance déformante
i_{dh}	Sources de courant harmonique
V_{rh}	Sources de tension harmonique

Introduction générale

Les convertisseurs statiques triphasés à structure tension sont les composantes essentielles de nombreux systèmes d'électronique de puissance telles que les variateurs de vitesse pour machines alternatives, les alimentations sans interruption et les filtres actifs. Concernant leur fonctionnement, sécurité, fiabilité, performances, qualité et continuité de service sont quelques-unes des préoccupations majeures.

Les défauts qui peuvent survenir, qu'ils proviennent de la commande rapprochée du convertisseur (par exemple, défauts d'un des drivers), d'un des capteurs ou d'un des composants de puissance commandables (de type IGBT par exemple), conduisent à la perte de contrôle totale ou partielle de courant. Ceux-ci peuvent provoquer le dysfonctionnement du système, voire l'interruption complète de son fonctionnement. En outre, si le défaut n'est pas rapidement détecté et compensé, il peut dans certains cas mettre gravement en danger le fonctionnement du système [1].

Le diagnostic des onduleurs s'est fortement développé dans le monde industriel depuis plusieurs années dans afin d'élaborer des méthodes de diagnostic ayant pour objectif de prévenir les utilisateurs d'un risque possible pouvant apparaître en un point particulier du système car la volonté d'obtenir une chaîne de production de plus en plus sûre devient indispensable pour certaines applications.

D'autre part, ont défini les différents défauts qui peuvent se produire dans un onduleur sont :

- 1- Court-circuit de la source de tension continue ;
- 2- défaut d'interrupteur (transistor ou diode) maintenu ouvert (bloqué) ;
- 3- défaut d'interrupteur (transistor ou diode) maintenu fermé (conducteur) ;
- 4- défaut de coupure monophasée ;
- 5- défaut de court-circuit entre phases ;
- 6- défaut de court-circuit entre phase et terre ;
- 7- défauts des capteurs de tension et de courant.

Les défauts les plus fréquents sont le défaut d'interrupteur maintenu ouvert/fermé et coupure monophasé [2].

Le but du travail, proposé dans ce cadre, est la définition d'indicateurs de défaut qui permettent d'identifier le défaut et le localiser dans un convertisseur statique de tension DC-AC (onduleur de tension à 2) intégré dans un filtre actif parallèle pour des charge non-linéaires. Finalement, un système de diagnostic est conçu, en se basant sur l'analyse de l'évolution des différents indicateurs de défaut pour chaque défaut.

Nous allons étudier tous ces aspects cités ci-dessus dans cette mémoire, Le travail présenté dans ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous exposerons une description générale sur les onduleurs, ainsi que son principe de fonctionnement et ses caractéristiques principales. Ensuite nous présenterons leurs possibilités d'applications en quelques exemples et leurs Classification. La deuxième partie de ce chapitre expose les différentes défaillances et les différentes procédures pour la surveillance et on synthétise les différentes méthodes de diagnostic.

Le deuxième chapitre sera consacré à la description des perturbations des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Ainsi nous avons étudié Les sources de cette pollution harmonique, leurs conséquences et leurs caractéristiques. Ensuite, nous présentons également les solutions traditionnelles et modernes de dépollution harmonique en particulier le filtrage actif parallèle qui est retenu, par la suite, pour ses performances.

Le troisième chapitre est réservé à l'étude de la structure et des stratégies de commande de Filtre Actif Parallèle à Deux Niveaux. Nous exposons, notamment, la Structure générale du filtre actif parallèle, et la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées pour identifier les courants harmoniques provenant d'une charge électrique polluante. Pour le suivi des courants de référence, nous établissons la synthèse de la loi de commande en courant du filtre en utilisant la technique de commande par hystérésis.

Le quatrième et dernier chapitre, c'est pour la simulation et interprétation des résultats. Nous traiterons dans un premier temps les résultats de simulation de l'ensemble réseau charge non-linéaire avant le filtrage. Dans un deuxième temps, nous présenterons les résultats de simulation de l'ensemble réseau charge non-linéaire après le filtrage en état sain (aucun défaut

trouvé lors le fonctionnement de l'onduleur de tension) et en état défaillant (on a créé un défaut dans chacun des transistors de l'onduleur pendant le deuxième demi temps de simulation.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Les convertisseurs statiques DC/AC : généralités, défauts et méthodes de diagnostic

I.1 Introduction

La conversion de l'énergie continu-alternatif est une technologie réalisés ces dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance, en utilisant les convertisseurs statiques. Tel que les onduleurs de tension. Certaines de ces nouvelles applications, telles que le filtrage actif et la dépollution de réseaux électriques, ou l'alimentation de machines à courant alternatif pour des applications particulières, sont très exigeantes en termes de performances dynamiques.

Dans ce chapitre nous présenterons la structure de l'onduleur, le principe générale de fonctionnement et les différents types. Ainsi nous avons étudié les différents défaillances sur un convertisseurs statique. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons introduit les méthodes de diagnostic existantes.

I.2 Définition de l'onduleur

Un onduleur est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables ;
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes [3]. En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [4], On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant.

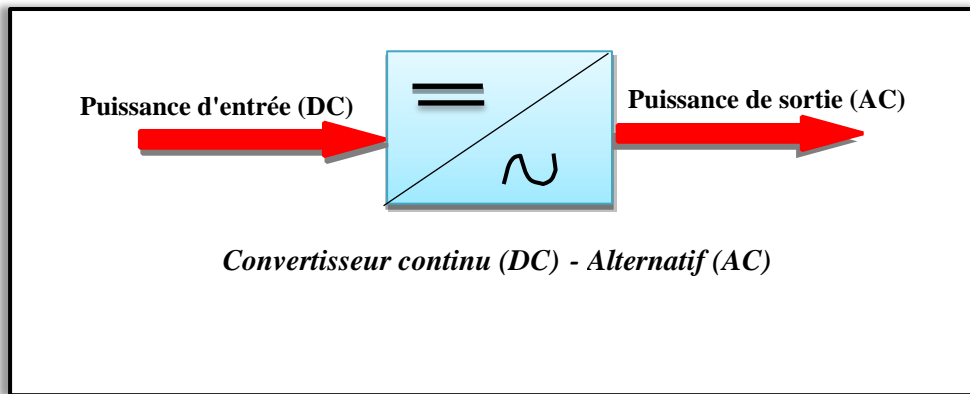


Figure I.1: Schéma de Conversion DC/AC et grandeur de sortie

I.3 Principe générale de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un onduleur est basé sur l'électronique de commutation, on génère une onde de tension alternative à partir d'une tension continue comme le montre la Figure (I.2), On peut dire qu'il existe deux moyens pour réaliser cette conversion. L'utilisation directe d'une paire d'interrupteurs de base qui consiste à régler la Fréquence et la durée des interconnexions de la source avec la sortie. Il est donc plutôt Temporel et débouche sur les techniques de modulation de largeur d'impulsion. Contrôler l'amplitude soit de façon continue en créant une source réglable (ce qui suppose l'existence d'un autre étage de conversion), soit de façon discrète en disposant d'un nombre suffisant de sources [5].

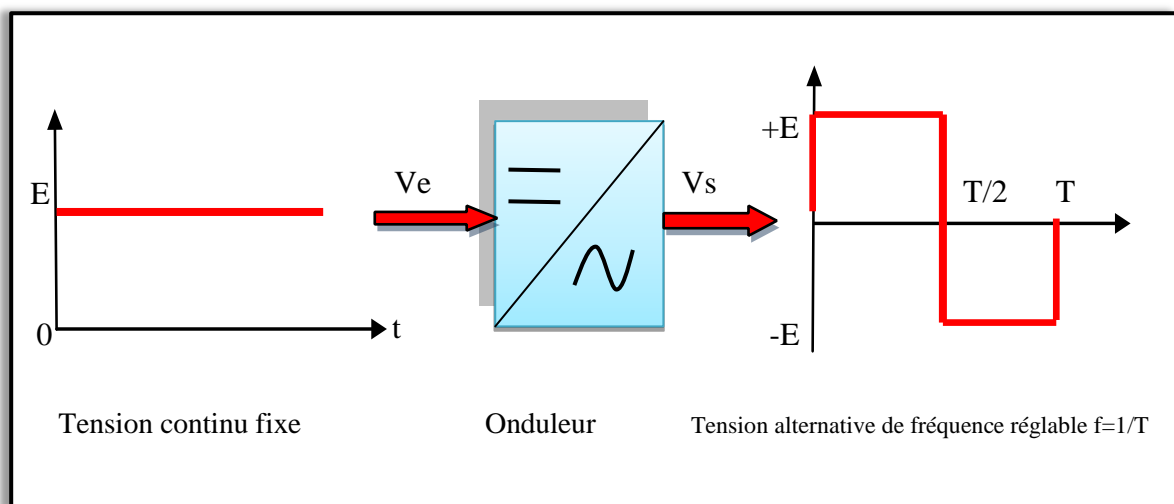


Figure I.2 : Symbole et signal d'un onduleur

Quand $K_1 - K_2$ sont fermés (On) et $K_3 - K_4$ sont ouverts (off) pour $t_1 < t < t_2$ on obtient une alternance positif $U(t) = V_{dc}$ comme la montre la Figure (I.3).

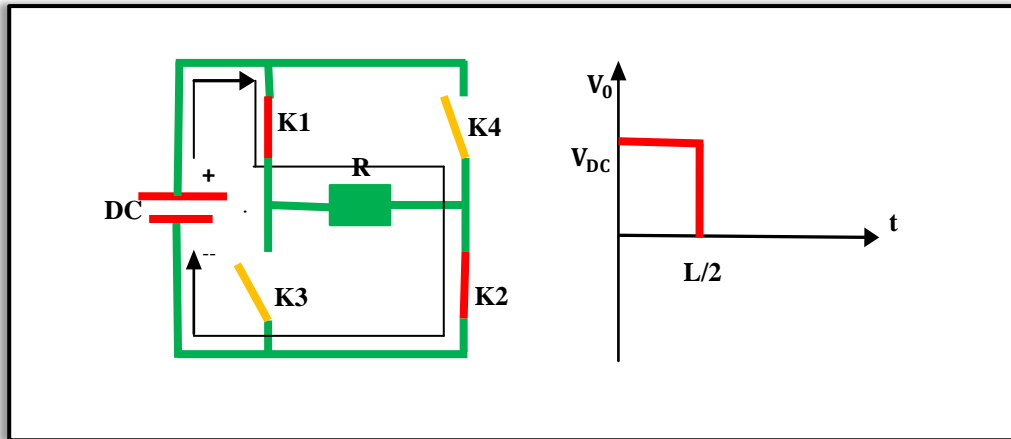


Figure I.3 : Fonctionnement et signal de l'onduleur dans le 1er demi-cycle

Pour obtenir le signal résultant sur la période complète qui est présentée sur la Figure (I.4)

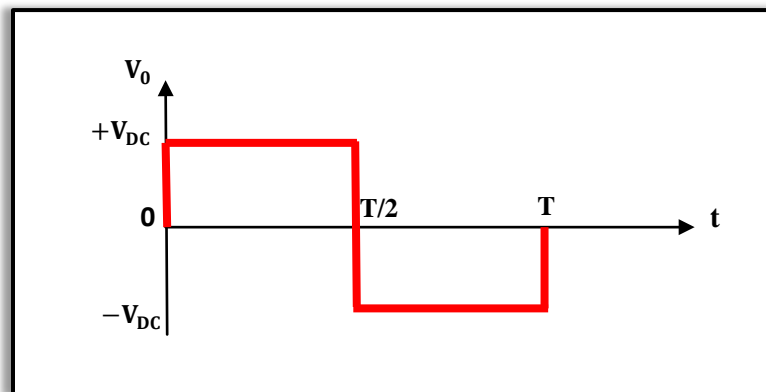


Figure I.4 : Signal complet de l'onduleur

I.4 Les application des onduleurs

Ils sont utilisés en électrotechnique pour :

- Soit fournir des tensions ou courants alternatifs de fréquence et amplitudes variables ;
- Soit fournir une ou des tensions alternatives de fréquence et d'amplitude fixes. Nous citons quelques domaines d'application :

- Production des tensions sinusoïdales de fréquences moyennes (de quelques kHz à quelques 10Khz) ;
- Alimentations alternatives de secours fonctionnant sur batteries d'accumulateurs, chauffage à induction... ;
- Alimentation des moteurs à courant alternatif à fréquence variable.

I.5 Classification des onduleurs

Il existe plusieurs centaines de schémas d'onduleurs, chacun correspondant à un type d'application déterminé ou permettant des Performances recherchées [6]. Les onduleurs sont en général classés selon les modes de commutation de Leurs interrupteurs.

I.5.1. Les onduleurs à résonance

Les onduleurs à résonance sont des onduleurs de tension ou de courant à un créneau par alternance fonctionnant dans des conditions particulières. La charge doit être un circuit oscillant peu amorti. On commande les interrupteurs par une fréquence voisine de la fréquence de résonance de la charge. Si celle-ci varie, il faut faire varier la fréquence de commande. L'onduleur doit donc être piloté par la charge, il n'est plus autonome [7].

I.5.2. Onduleur non autonome

Dans ce cas, les composants utilisés peuvent être de simples thyristors commandés Uniquement à la fermeture et la commutation est «naturelle » contrairement à l'onduleur autonome. L'application principale de ce type d'onduleur se trouve dans les variateurs pour moteurs synchrones de très forte puissance où les thyristors sont souvent les seuls composants utilisables.

I.5.3. Onduleur autonome

Qui délivre une tension avec une fréquence soit fixe, soit ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner. Et leurs interrupteurs sont commandés par des circuits auxiliaires indépendants du réseau alternatif. Il dépend essentiellement de la nature du générateur et du récepteur entre lesquels il est monté cela conduit à distinguer :

- les onduleurs de tensions ;
- Les onduleurs de courant [8].

I.5.3.1 Les onduleurs (autonome) de courants

L'onduleur de courant transforme un courant continu en courants triphasés dans les enroulements de la machine. Il peut fonctionner en commutation naturelle, c'est le cas des machines synchrones. La commutation forcée est réalisée pour toutes les autres machines. Ce type d'onduleur ne permet que le réglage de la fréquence des grandeurs de

sortie, l'amplitude de celle-ci doit être réalisée par ajustement de la grandeur d'entrée [9].

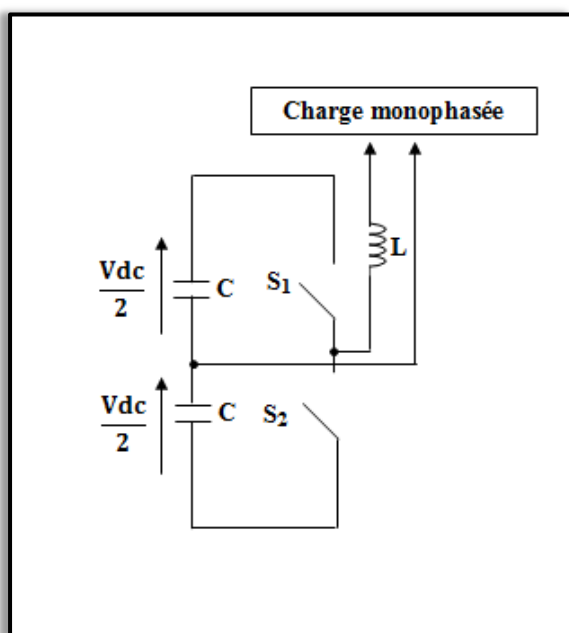
I.5.3.2 Les Onduleurs (autonomes) de tension

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

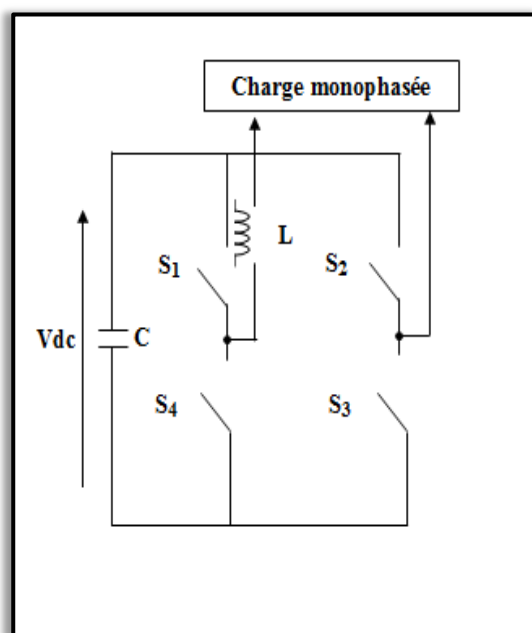
I.6 Onduleur de tension à deux niveaux

L'onduleur de tension à deux niveaux est constitué de :

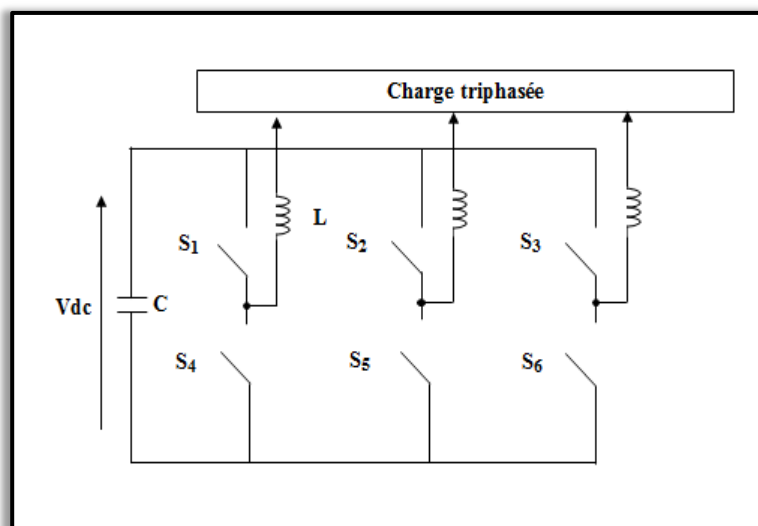
- source de tension continue (Batterie ou Capacité C de tension V_{dc}) ;
- source de courant alternatif (Inductance L) ;
- pour chaque demi-bras, d'un interrupteur bicommandable (MOSFET, GTO, IGBT), aux bornes duquel est montée une diode en antiparallèle (interrupteur bidirectionnel en courant et unidirectionnel en tension S_i). La Figure (I.5) donne le schéma synoptique d'un onduleur de tension à deux niveaux.



a. Onduleur de tension monophasé en demi-pont



b. Onduleur de tension monophasé en pont



c. Onduleur de tension triphasé

Figure I.5 : Représentation schématique d'un onduleur de tension à deux niveaux

I.7 Présentation des différentes défaillances sur un convertisseur de puissance

I.7.1 Défaillance du condensateur

Les condensateurs sont plus étudiés parce qu'ils sont dans les applications courantes les composants qui posent le plus de problèmes mais qui, inversement, sont les plus simples à analyser.

I.7.1.1 Cas des condensateurs électrolytiques

Malgré leur faible fiabilité, des considérations de rendement volumique et de prix font que la grande majorité des concepteurs d'alimentations choisissent pour constituer les filtres, des condensateurs électrolytiques. Le schéma équivalent d'un condensateur réel peut être mis sous différentes formes [10]. Nous utiliserons celle de la Figure (I.6), avec les notations suivantes :

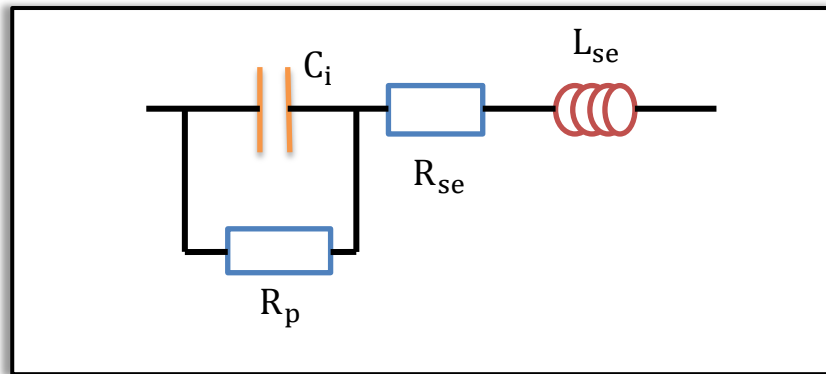


Figure I.6 : Schéma équivalent d'un condensateur réel

C_i : Capacité idéale anode-cathode, l'élément principal du condensateur

R_p : Résistance parallèle représentant les pertes diélectriques et les fuites entre les deux électrodes (pour les condensateurs électrolytiques à l'aluminium, celle-ci est due à la présence des couches d'alumine).

R_{se} : Résistance série des connexions et des armatures.

L_{se} : Inductance équivalente série des connexions et des enroulements. Elle dépend de la technologie de fabrication.

Le schéma précédent peut être simplifié suivant la représentation normalisée de la figure (I.7).

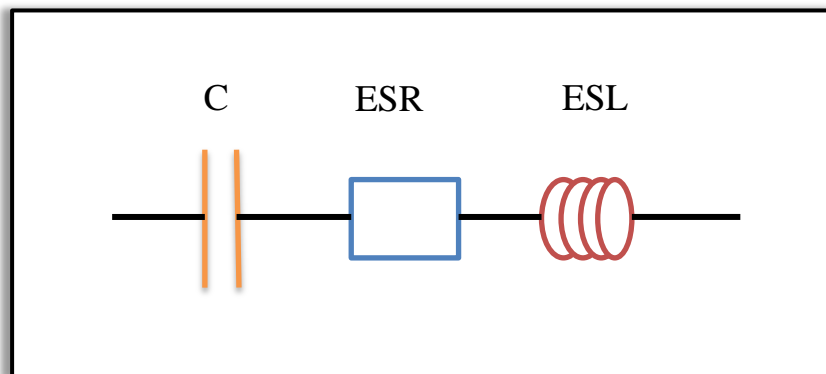


Figure I.7 : Schéma équivalent simplifié du condensateur

Il se compose de :

$$C = C_i \left(1 + \frac{1}{R_p^2 C_t^2 \omega_n^2} \right) \quad ESL = L_{se} \quad (I.1)$$

ω_n : pulsation naturelle du circuit C-ESR-ESL

C : capacité (dépendante de la fréquence).

ESR : résistance équivalente série représentant toutes les pertes dans les condensateurs (fonction de la fréquence).

ESL : inductance équivalente série, identique à L_{se} , sa valeur est de quelques nH et est indépendante de la fréquence.

Pour ces condensateurs, la loi d'Arrhenius [11], nous montre que leur durée de vie est approximativement divisée par deux, chaque fois que la température est augmentée de 10°C .

Le courant qui traverse le condensateur et donc la résistance équivalente série ESR, provoque une élévation de température et influence la durée de vie. La fin de vie des condensateurs est provoquée par un phénomène de défaillance interne, évaporation de l'électrolyte ou réaction chimique qui se manifeste par la dégradation des paramètres électriques suivants : la résistance équivalente série ESR augmente et la capacité diminue [12], cette dernière évoluant de manière moins importante. Avec cette augmentation rapide de l'ESR et cette diminution de C, la tension aux bornes du condensateur V_{condo} présente de plus en plus d'ondulation (ΔV). Une surveillance de ce taux peut permettre de détecter l'état du filtre d'entrée.

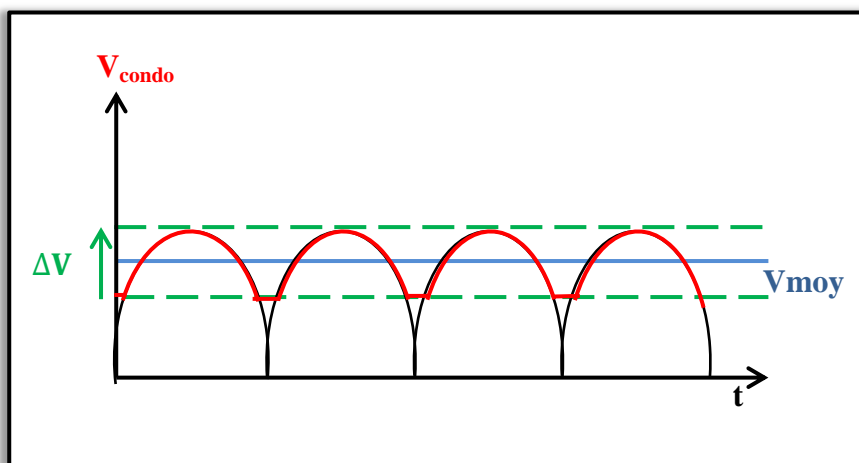


Figure I.8 : Tension en sortie du filtre

La température est également un facteur aggravant de l'état du condensateur et elle affecte sa capacité. Pour chaque condensateur, une plage de température de fonctionnement est définie. Si la température croît et qu'elle dépasse la limite thermique du condensateur, ce la accélère son vieillissement et peut provoquer une défaillance, en cas d'élévation trop importante.

Enfin, le condensateur peut se retrouver en court-circuit lorsqu'une défaillance apparaît sur un bras (un bras est une cellule de commutation constituée de 2 interrupteurs). Si on regarde le schéma équivalent du condensateur, on voit que par nature, sans être connecté à un autre composant, le condensateur se décharge (décharge naturelle de C_i dans R_p , If courant de fuite). R_p représente la qualité du diélectrique et de l'oxyde. Si ce dernier est dégradé, la résistance de fuite diminue et donc le courant de fuite augmente. Ainsi, si un bras est en court-circuit, cela revient à mettre en court-circuit la capacité. Dans ce cas, soit les connectiques cassent (soudure des pattes sur le condensateur) soit cela génère un courant plus intense dans le condensateur (augmentation du courant de fuite) entraînant une augmentation de la température et donc une usure accélérée de l'électrolyte.

I.7.1.2 Cas des condensateurs à films métallisés

Les conséquences d'une défaillance sur un condensateur à films dépendent de l'utilisation de ce condensateur.

En capacité de filtrage, comme pour les condensateurs électrolytiques, une augmentation du taux d'ondulation de la tension en sortie du filtre est observée. On observe également un échauffement dans la capacité dû à une mauvaise répartition du courant dans la métallisation du film (ondulation haute fréquence). Dans le cas d'une utilisation dans un circuit d'aide à la commutation (CALC), un mauvais dimensionnement en courant d'une part et un fonctionnement à haute fréquence d'autre part peuvent produire des échauffements dus également à une mauvaise répartition des courants.

Dans une utilisation pour le découplage, la connectique actuelle des condensateurs ne permet pas l'élimination des parasites hautes fréquences pouvant résulter du réseau et/ou des commutations. Il n'y a pas à l'heure actuelle de solution technologique permettant de répondre complètement au problème

I.7.2. Défaillance de diodes classiques

Pour les diodes classiques, l'analyse est plus complexe car il existe plusieurs modes de défaillance possibles. Seul le vieillissement, qui est la défaillance la plus importante, sera présenté ici. Les diodes peuvent vieillir de plusieurs façons. Il peut y avoir un problème sur la puce de silicium, un problème sur le boîtier qui n'est plus ou pas hermétique. Un indicateur de l'état de la diode est l'impédance thermique Z_{th} qui devra être la plus petite possible. Elle est définie par la relation suivante :

$$Z_{th} = \frac{T_{jonction}^{\circ} - T_{boitier}^{\circ}}{P} \quad (I.2)$$

Avec P : puissance dissipée dans la diode en Watt

Les coefficients de dilatation des différents matériaux de la diode étant différents, des craquelures peuvent apparaître. La dissipation thermique est alors de moins en moins bonne et l'impédance thermique va augmenter (se dégrader). La défaillance apparaît ainsi en fin de vie du composant, pendant la période dite 'd'usure'. Ce problème est un problème que l'on retrouve dans la plupart des semi-conducteurs de puissance.

I.7.3. Défaillance d'un exemple d'interrupteur statique : l'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

I.7.3.1. Court-circuit

Le défaut de type court-circuit se produit lorsqu'un des composants d'une cellule de commutation reste constamment fermé. Un tel défaut peut avoir deux causes : soit la mise en court-circuit physique de la puce de silicium (IGBT ou diode) par dépassement de température critique, soit la défaillance de la commande rapprochée. L'analyse du déroulement d'un court-circuit est décrite dans [13]. Dans ce cas, les courants de phases sont fortement altérés. Ce type de défaillance est extrêmement préjudiciable au convertisseur et nécessiterait la mise en œuvre de sécurité permettant de déconnecter le bras défaillant dès l'apparition de cette défaillance.

I.7.3.2. Circuit ouvert

Il se peut, pour diverses raisons, qu'un des IGBT (supérieur ou inférieur) d'une cellule de commutation d'un bras reste constamment ouvert (défaut de type circuit ouvert). Ce type de défaut a pour principale cause une défaillance de la commande rapprochée (défaut thermique du driver ou perte d'alimentation par exemple). Selon la localisation du défaut dans la cellule, celui-ci sera visible soit sur l'alternance positive du courant (défaut sur IGBT supérieur), soit sur l'alternance négative (défaut IGBT inférieur). Lorsque le défaut est visible, la signature se matérialise par le passage d'un rapport cyclique α à 0 ou à 1, mais uniquement sur la cellule défaillante. La conséquence est que la cellule défaillante se retrouve alors en surtension et qu'un arrêt du convertisseur est obligatoire pour éviter une propagation du défaut [14].

I.7.3.3. Vieillessement

Comme pour la diode classique, ce mode de défaillance de l'IGBT est corrélé avec l'augmentation de l'impédance thermique qui peut être entraînée par :

- Sollicitations successives (cyclage) ;
- Défaut au niveau de la puce de silicium ;
- Boîtier non hermétique, permettant à l'humidité de pénétrer à l'intérieur (plus ou moins fréquent sur les composants non militaire) et la corrosion du composant [14].

I.7.3.4. Défaillance du circuit commande (Vieillessement de l'optocoupleur)

Le circuit de commande impose l'état des cellules de commutation, c'est-à-dire l'ouverture ou la fermeture des IGBT. La conception du circuit de commande doit être réalisée avec soin pour réaliser au mieux les fonctions de l'interrupteur. Une isolation galvanique est présente afin de découpler le circuit porteur d'information (partie du circuit de commande générant les impulsions) du circuit porteur de puissance. Cette isolation peut être réalisée au moyen d'un optocoupleur, d'un transformateur d'impulsion ou encore par une liaison par fibre optique [14].

Bien qu'équivalentes en terme de fonction, ces techniques ne présentent pas les mêmes niveaux de fiabilité (Figure I.9).

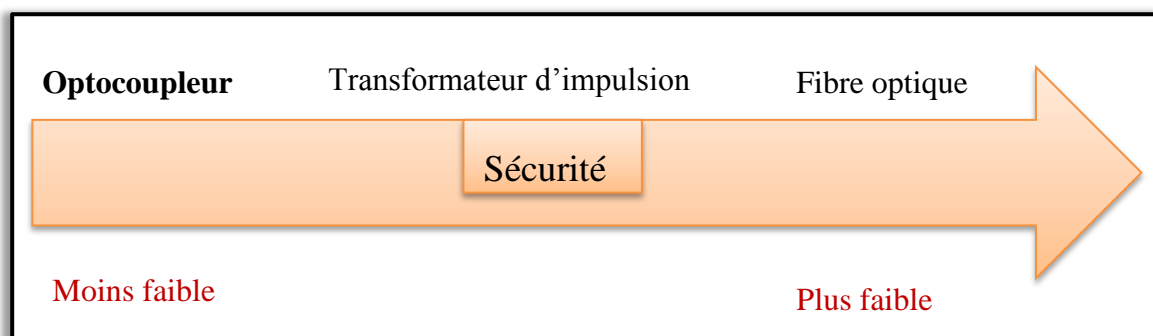


Figure I.9 : Fiabilité des technologies dans les drivers de commande

Regardons le cas le plus défavorable. L'optocoupleur, qui est constitué d'une diode électroluminescente (LED) et d'un phototransistor, est l'élément qui présente le plus de défaillance. Un défaut de l'optocoupleur est principalement lié au vieillissement de ce dernier. En vieillissant, la résine de l'optocoupleur s'opacifie, et, de ce fait, le niveau d'énergie du signal et la bande de fréquence couverte diminuent. Il n'y a alors plus de transmission de l'information et la sortie du circuit de commande reste inactive. Ce vieillissement est accentué par les effets de la température. Il semble que la défaillance de la LED intervient

systématiquement avant la défaillance du phototransistor. Le vieillissement de la LED peut être détecté relativement simplement, en mesurant le rapport entre le courant d'entrée et le courant de sortie (Current Transfer Ratio – CTR) où

$$CTR = \frac{I_s}{I_e} = \frac{I_{collecteur}}{I_{Forward}}$$

Avec : $I_{Forward}$ est le courant direct de la diode. Si la LED vieillit, sa puissance diminue, ce qui entraîne une variation du CTR passant de la courbe bleue (Figure I.10) pour un composant neuf à la courbe verte pour un composant usé. La surveillance du vieillissement de la LED peut donc se faire par la surveillance du CTR.

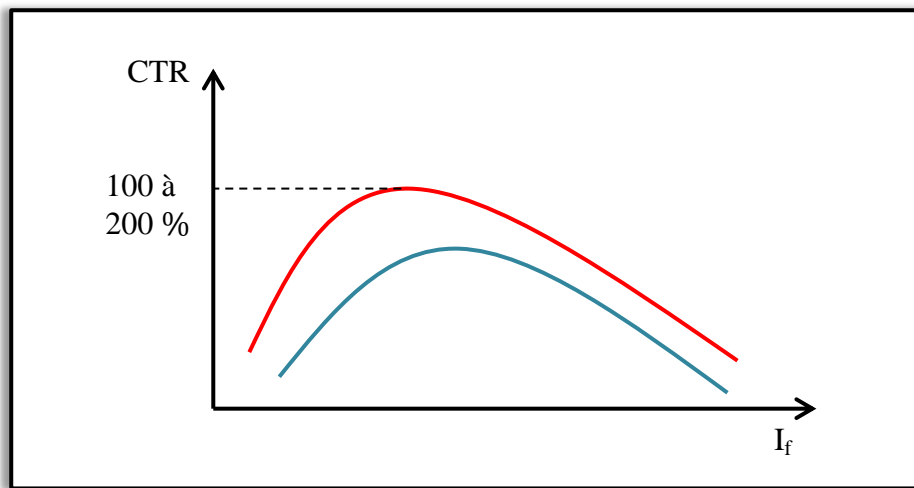


Figure I.10 : Courbes de CTR - Composant sain et composant défaillant

I.7.4. Défauts capteurs

Dans le cadre de la recherche d'une méthodologie assurant un diagnostic sûr et fiable, l'essentiel de la stratégie ne réside pas uniquement dans le grand nombre de capteurs et la redondance des informations mais aussi dans la fiabilité et la précision des systèmes de mesure et d'analyse de ces informations [15]. En effet, le degré de pertinence de l'information en provenance des capteurs, doit être déterminé afin d'éliminer toutes les informations et les mesures aberrantes. Une information erronée peut être le résultat d'une panne ou d'un défaut au niveau du système de mesure lui-même. La redondance matérielle peut être considérée dans ce cas comme importante pour le diagnostic. En revanche, elle est onéreuse en termes d'équipement et de maintenance. Afin d'assurer une bonne qualité de mesure et éviter des sources possibles d'erreurs, quelques règles doivent être respectées :

- s'assurer de la fiabilité et de la précision des instruments de mesure (étalonnage, tests, etc.) [15] ;
- bien choisir le régime de fonctionnement pendant lequel sont effectuées les mesures (régime transitoire, permanent) ;
- rendre compte des conditions environnementales du fonctionnement du processus;
- bien définir les marges d'incertitudes tolérées (perturbations, erreurs, etc.).

I.8 Principe et méthodes de diagnostic des convertisseurs statiques

I.8.1. Principe du diagnostic

I.8.1.1 Définition

Les diagnostics sont de plus en plus utilisés dans l'industrie. Elles permettent de détecter un défaut d'une manière précoce afin d'éviter des arrêts inattendus de l'installation. Et, ainsi assuré une maintenance rapide et à temps en évitant plus de dépenses [16]. La sélection de la méthode de diagnostic la plus appropriée à un système industriel donné, ne peut se faire qu'après un recensement des besoins et des connaissances disponibles.

L'inventaire des éléments à étudier est le suivant:

- nature des causes de défaillances à localiser ;
- connaissance des signatures associées aux défaillances induites par les causes ;
- maîtrise des moyens de mesure des symptômes ;
- maîtrise des moyens de traitement des symptômes ;
- connaissance des mécanismes physiques entre les causes et les effets ;
- inventaire du retour d'expérience ;
- recensement des expertises disponibles ;
- définition du niveau de confiance dans le diagnostic ;
- identification des utilisateurs finaux du diagnostic.

I.8.2. Présentation des méthodes de diagnostic

Les méthodes de diagnostic se répartissent en deux grandes classes.

- ✓ **Dans le premier cas:** on utilise des redondances d'informations et la connaissance fournie par le modèle mathématique pour caractériser le mode de fonctionnement ou l'état du système, puis décider s'il est normal ou anormal [17].
- ✓ **Dans le deuxième cas:** c'est l'analyse des données fournies par le système qui permet de décider de son état. Les méthodes les plus familières aux automaticiens sont les

méthodes basées sur l'utilisation de modèles mathématiques. Celles-ci utilisent la redondance existant entre les différentes variables mesurées en termes de relations statiques ou dynamiques. Dans l'étude qui suit, il sera question de présenter les différentes méthodes de détection et d'isolation des défauts. L'intérêt portera surtout sur les méthodes à base de modèle mathématique [18].

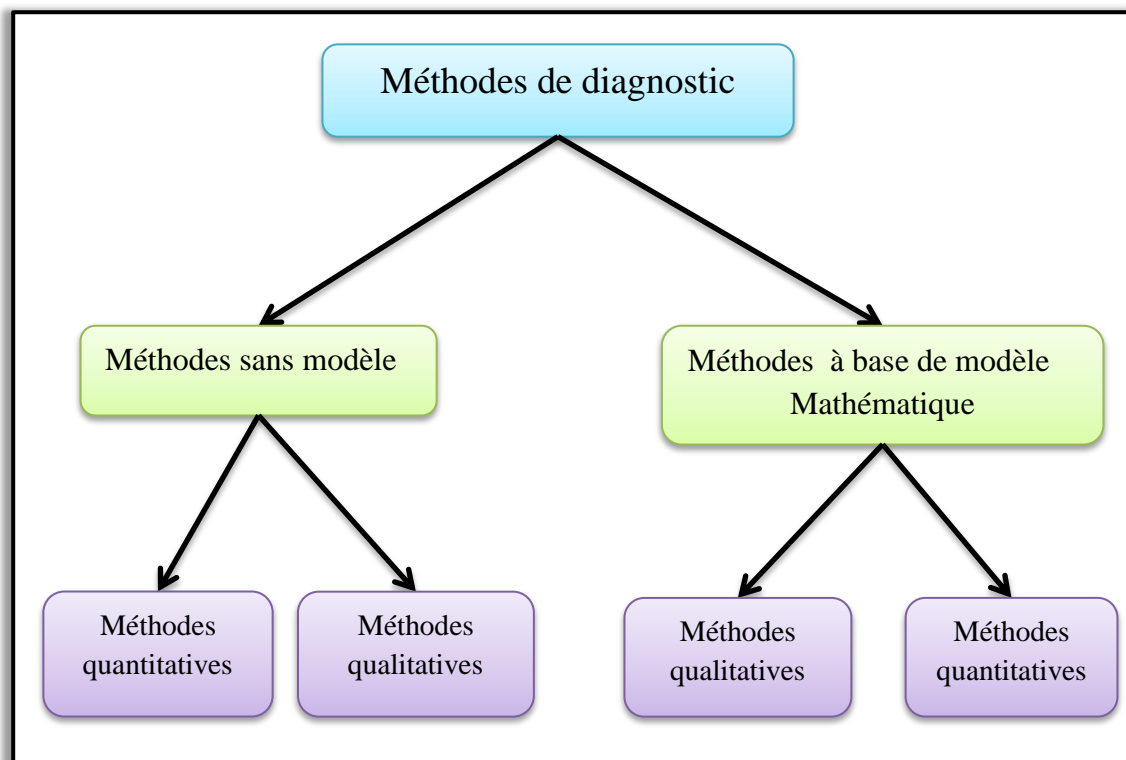


Figure I.11 : Présentation des méthodes de diagnostic

I.8.3. Méthodes de diagnostic à base de modèles qualitatifs, quantitatifs

Dont les premiers permettent d'abstraire le comportement du procédé avec un certain degré d'abstraction et ne représentent pas la physique du système, mais sa description en termes de mode de fonctionnement [18], les secondes méthodes reposent sur l'estimation de l'état, des paramètres ou de l'espace de parité en utilisant des modèles mathématiques du système décrivant le comportement du système [19].

I.8.3.1 Méthodes de diagnostic à base de modèle et sans modèle

Consistent à comparer le comportement du système avec le comportement celui du modèle qualitatif et/ou quantitatif établi. Ainsi, Tout écart est alors synonyme d'une défaillance, comme indiqué par les schémas de Figure (I.12) et Figure (I.13). Ces deux types d'approches peuvent coexister au sein d'une même méthode de diagnostic [18].

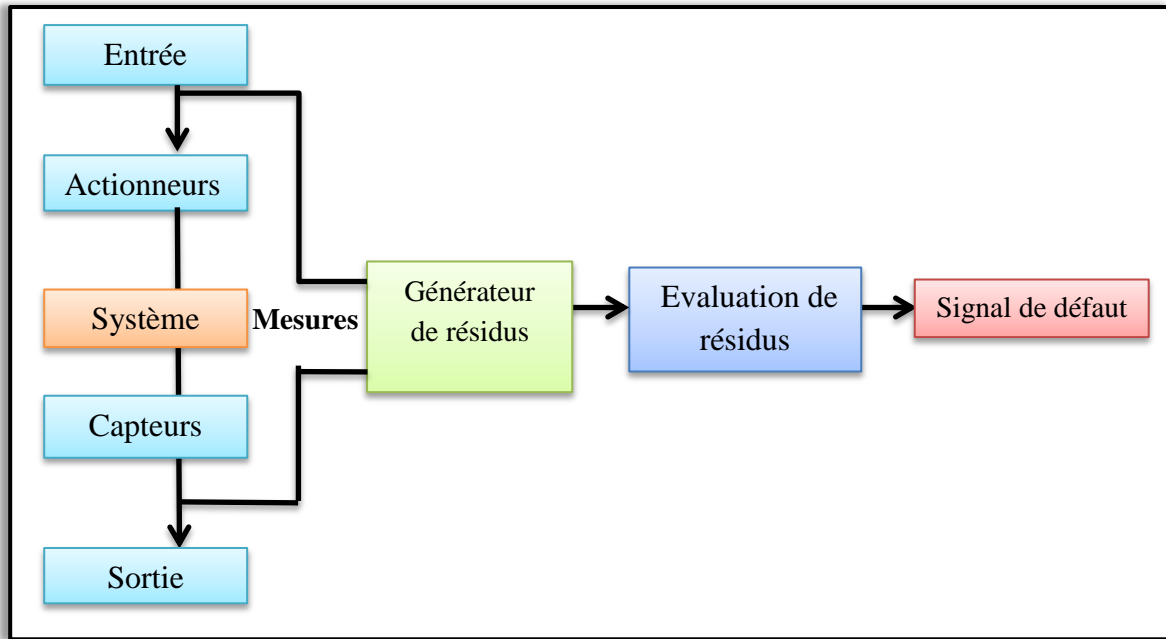


Figure I.12 : Structure d'un système de diagnostic à base d'un modèle

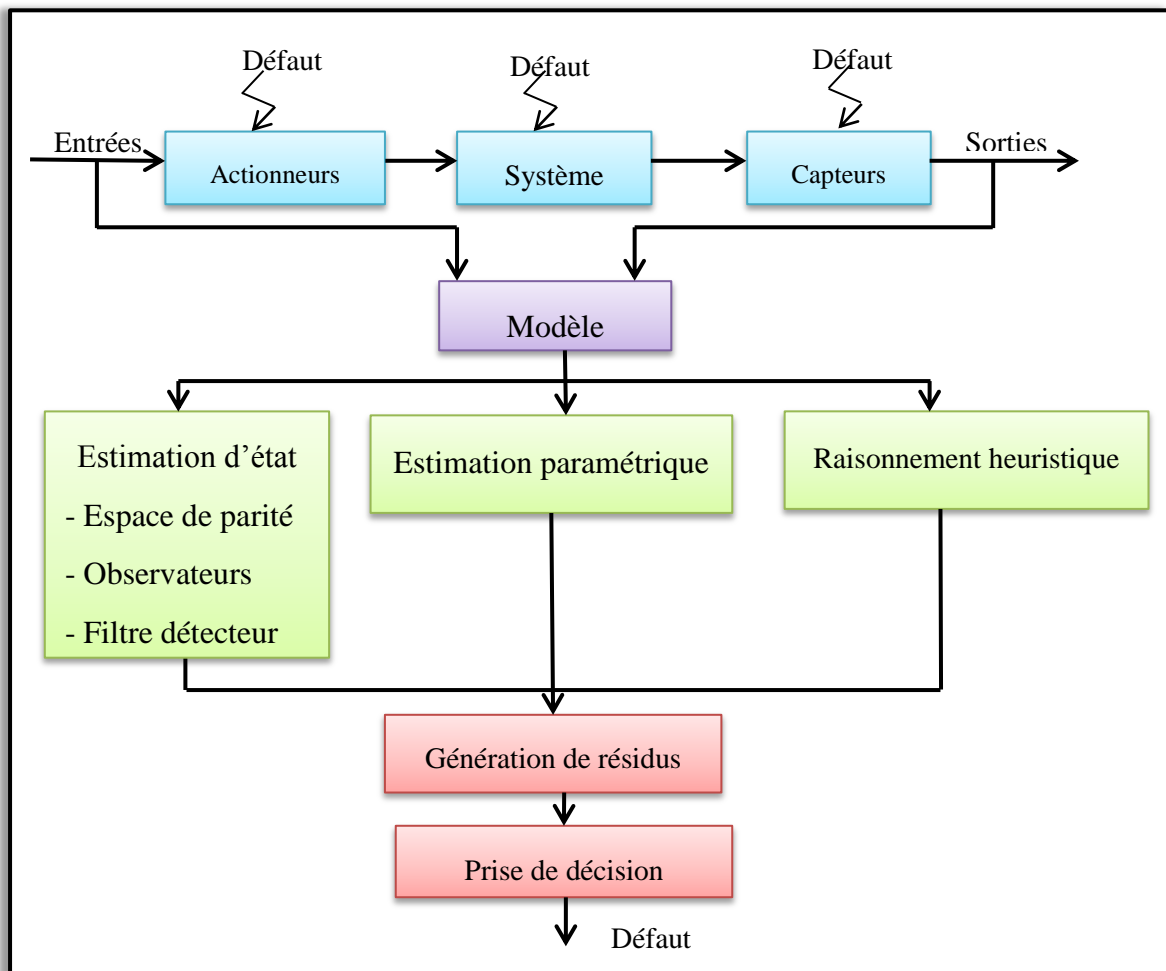


Figure I.13 : Détection de défauts basée sur les modèles

Par ailleurs, des méthodes de diagnostic sans modèle (diagnostic orienté données) ou seule la disponibilité des données de mesure est nécessaire. Les méthodes orientées données peuvent être : des systèmes experts, des méthodes statistiques comme l'analyse en composantes principales (ACP), la classification et des méthodes basées sur l'intelligence artificielle comme les réseaux de neurones. La Figure (I.14) donne le schéma conceptuel du diagnostic orienté données [19].

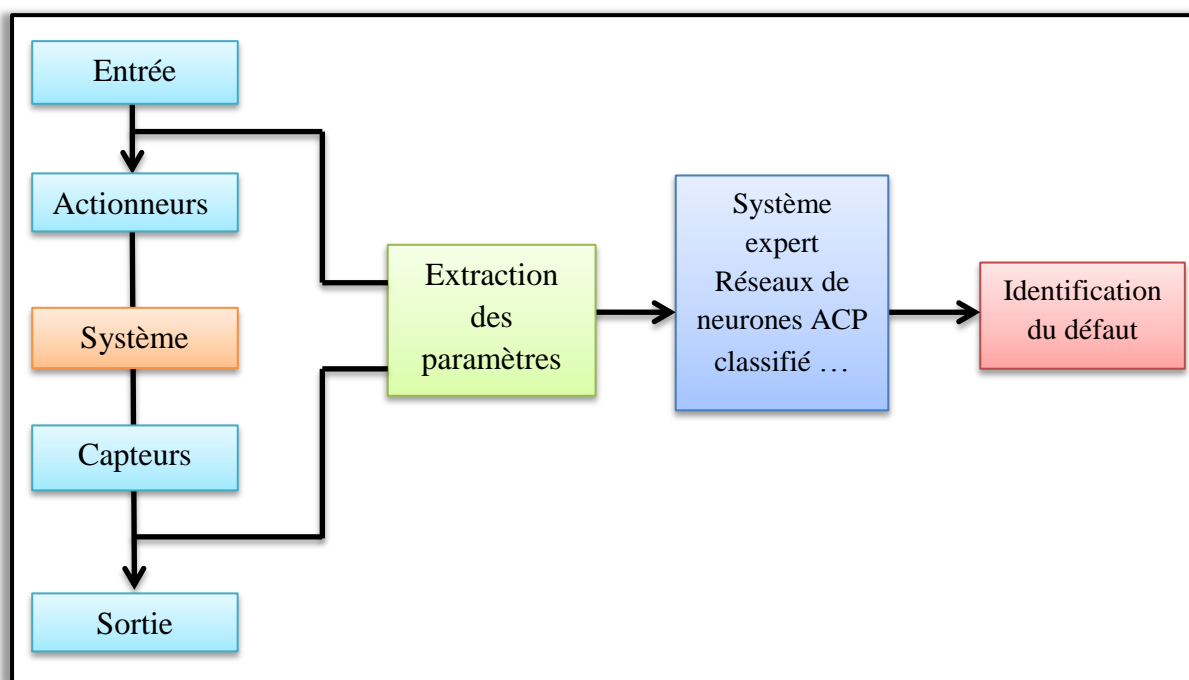


Figure I.14 : Structure d'un système de diagnostic orienté données

I.8.4. Classifications des méthodes de diagnostic

Les premières méthodes de diagnostic ont été basées sur la redondance matérielle, parce qu'elle est très répandue dans les domaines où la sûreté de fonctionnement est cruciale comme dans l'aéronautique ou le nucléaire. Dans la littérature on distingue plusieurs classifications des méthodes de diagnostic. Toutes ces méthodes sont résumées à la Figure suivante :

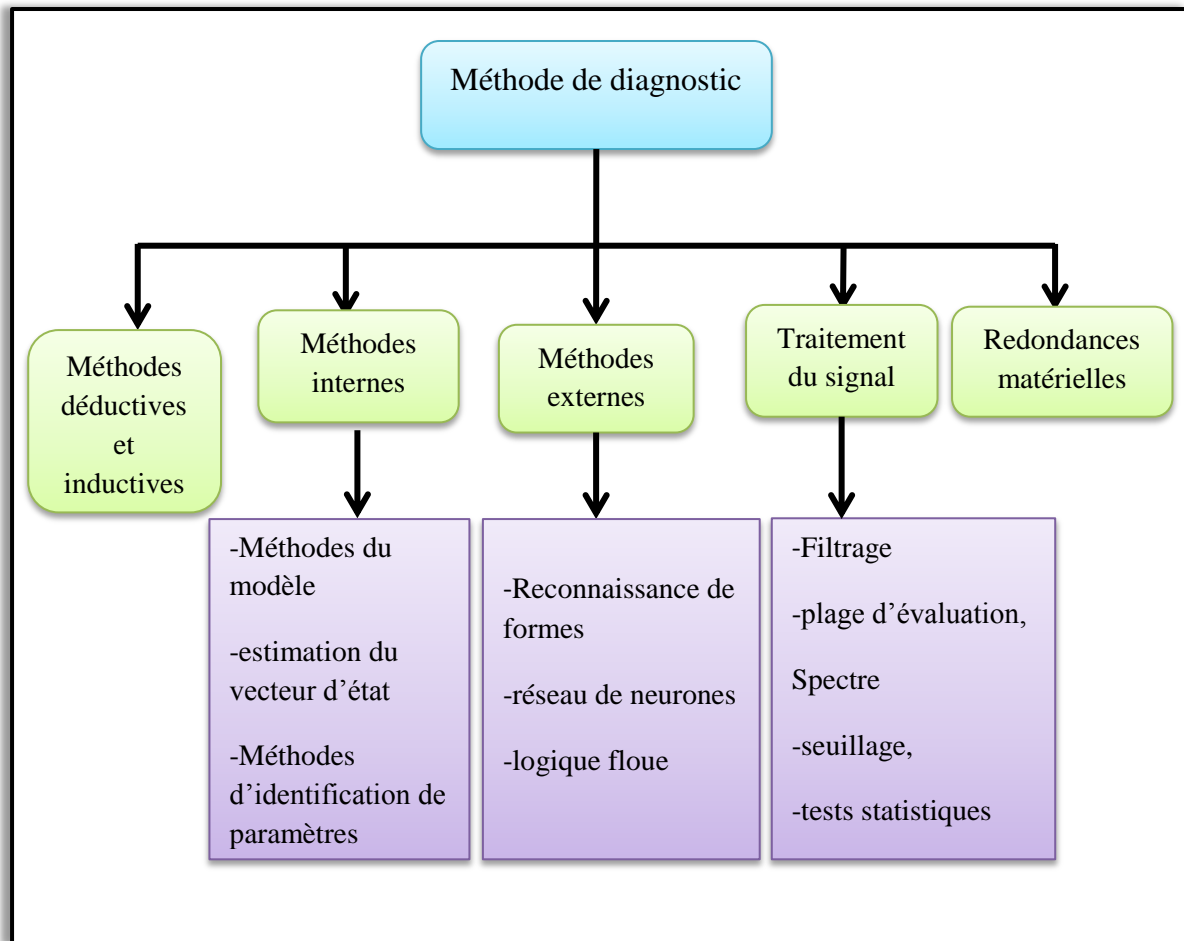


Figure I.15 : Méthodes de diagnostic

I.8.4.1 Méthodes internes

Ces méthodes sont basées sur des modèles physiques ou mathématiques validés par les techniques d'identification de paramètres. Le diagnostic de défaillance est possible en suivant en temps réel l'évolution des paramètres physiques ou bien en utilisant l'inversion de modèles de type « boîte noire ».

I.8.4.2 Méthodes externes

Ces méthodes supposent qu'aucun modèle n'est disponible pour décrire les relations de cause à effet. La seule connaissance repose sur l'expertise humaine confortée par un solide retour d'expérience. Dans cette catégorie, on retrouve toutes les méthodes basées sur l'intelligence artificielle et les approches probabilistes [20].

I.8.4.3 Méthodes inductives

Ces méthodes correspondent à une approche montante où l'on identifie toutes les combinaisons d'événements élémentaires possibles qui entraînent la réalisation d'un

événement unique indésirable. En d'autres termes, il faut interpréter les symptômes ainsi que leurs combinaisons possibles afin de trouver le défaut.

I.8.4.4 Méthodes déductives

Pour ces méthodes, la démarche est inversée puisque on débâte avec l'événement indésirable et on cherche ensuite toutes les causes possibles par une approche descendante. Une vérification des effets trouvés par rapport aux effets possibles permet de confirmer ou d'infirmer l'existence du défaut.

I.8.4.5 Traitement signal

Le traitement et l'analyse d'un signal pouvant être parfois utiles dans le domaine de diagnostic, En effet, la mesure d'un signal contient des oscillations qui peuvent être harmoniques, de nature stochastique ou les deux simultanément. La variation de ces signaux peut être reliée aux défauts [17].

I.9 Conclusion

La technique des onduleurs statiques DC/AC représente un domaine de recherche important. Recherche liée également à des applications toujours plus performantes et plus puissantes. Dans ce chapitre on a présenté une description générale sur les onduleurs, le principe de fonctionnement et leurs applications et classifications. Dans la deuxième partie de ce chapitre nous avons présenté les différentes défaillances sur un convertisseur statique. Ensuite, nous avons présenté quelques approches de diagnostic à savoir les méthodes sans modèle et les méthodes à base de modèle mathématique.

Chapitre II

Perturbation des réseaux électriques

II.1 Introduction

L'énergie électrique doit d'être délivrée sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et la symétrie. Cependant cet objectif semble idéal et n'est jamais facile à assurer, car le réseau électrique aujourd'hui est appelé à fonctionner sous un environnement de plus en plus perturbateur [21].

L'utilisation des convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs) est de plus en plus intense que ce soit pour des applications industrielles ou domestiques. Ces dispositifs utilisés dans le, la régulation de vitesse des moteurs à courant continu et alternatif, et aussi utilisés dans le matériel informatique, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les appareils de climatisation, etc. En effet ces convertisseurs statiques consomment des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale : ils fonctionnent comme des générateurs des courants harmoniques. Ces harmoniques peuvent perturber le comportement normal de certains équipements électriques.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les principales perturbations électriques. Dans sa première partie nous présenterons les origines et les effets des perturbations harmoniques sur le réseau. Dans sa deuxième partie, seront représentées les solutions usuelles de compensation de ces perturbations, avec un intérêt particulier pour les différents types de filtrage.

II.2 Perturbations électriques et leurs origines

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde [22]. Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités ultérieurement peuvent se manifester par : un creux ou une coupure de tension, une fluctuation de tension, un déséquilibre du

système triphasé de tension, une variation de la fréquence et, la présence d'harmoniques et/ou d'inter-harmoniques.

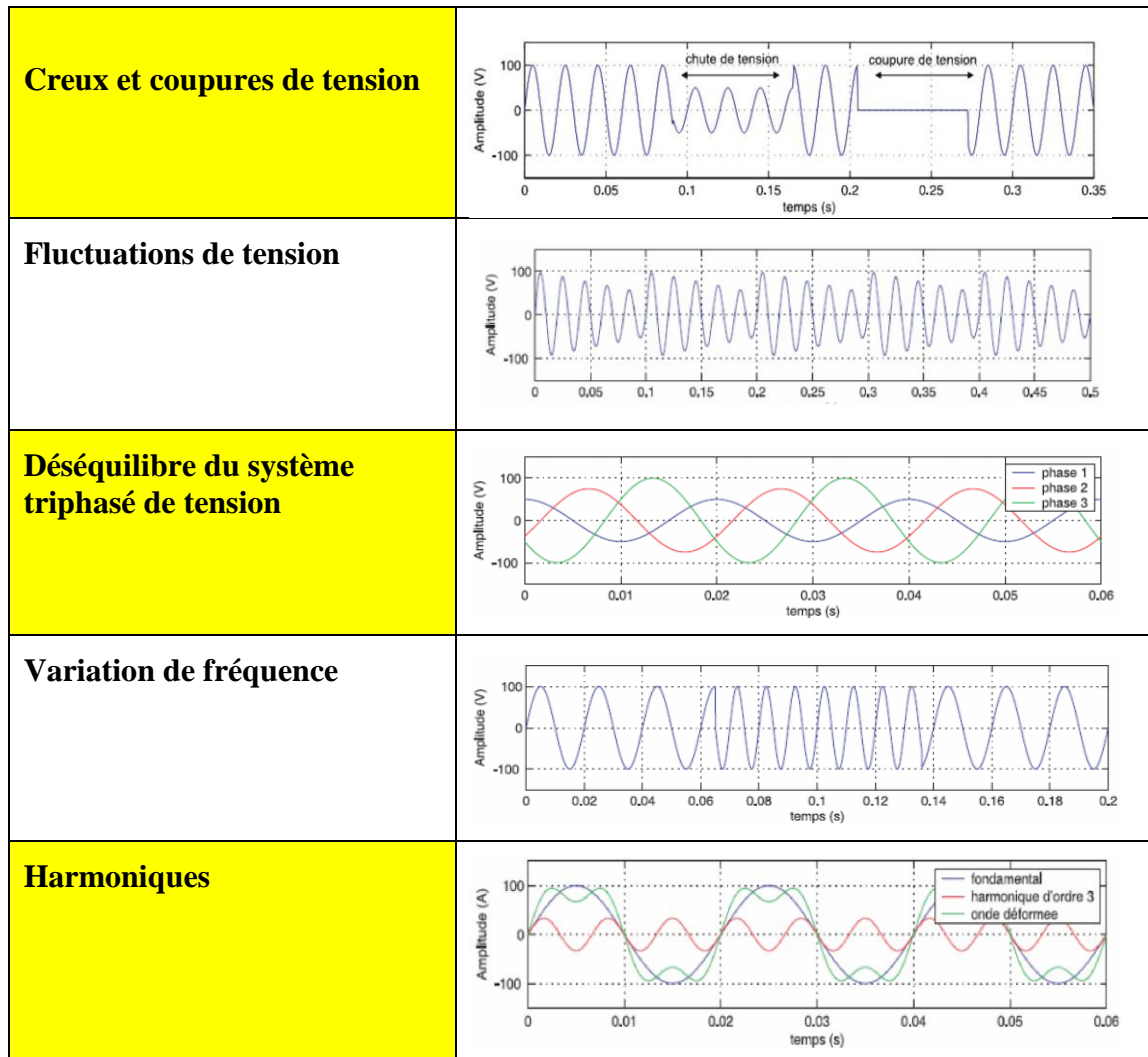


Tableau II.1 : les différentes perturbations électriques

II.2.1. Perturbation harmonique

Les perturbations sont tous les phénomènes internes ou externes au réseau ayant un pouvoir de modifier d'une manière transitoire ou permanente en amplitude et /ou en forme les grandeurs électriques du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. Le domaine de fréquence qui correspond à l'étude des harmoniques est généralement compris entre l'harmonique 2 et celui du rang 40 [23], mais on peut également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples entières de la fréquence fondamentale.

On peut alors distinguer [24] :

- les altérations de l'onde de tension (harmonique, déséquilibre, flicker). Ces phénomènes sont permanents ou durent au minimum plusieurs minutes ;
- les creux de tension, surtension et coupures brèves d'une durée de l'ordre d'une à quelques secondes ;
- les surtensions transitoires, de durée inférieure à une période.

II.2.2. Sources des harmoniques

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension est l'injection des courants non sinusoïdaux par des charges dites non linéaires, ainsi les charges déséquilibrées branchées au réseau. Le Tableau (II.1) montre quelques sources des harmoniques [25].

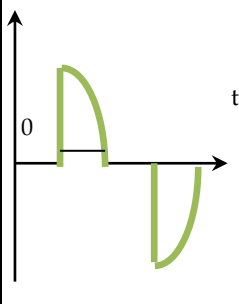
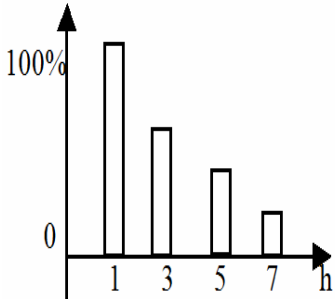
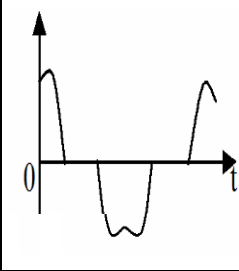
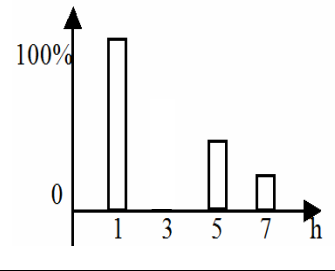
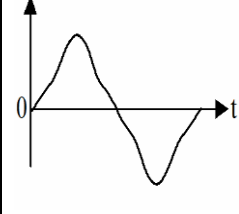
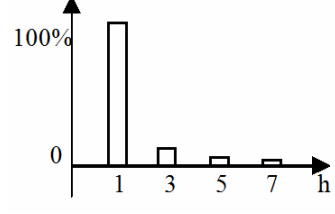
Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique correspondant
Gradateur monophasé	-Régulation de puissance de fours à résistance. -Modulation de puissance des lampes halogènes		
Redresseur triphasé à thyristor	-Variateur de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs synchrones		
Moteur asynchrone	-Machines-outils -Appareils électroménagers -Ascenseurs		

Tableau II.2 : Principales charges polluantes

II.2.2.1 Source harmonique identifiable

Les équipements dotés de dispositifs de l'électronique de puissance, notamment les redresseurs et les cyclo convertisseurs de puissances unitaires importantes, installés sur les réseaux haute et moyenne tensions sont typiquement des sources harmoniques identifiables.

Avec ce type de charge non linéaire, le distributeur de l'énergie est capable d'identifier le point d'injection des harmoniques et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit se procurer des moyens nécessaires à la réduction de cette perturbation [24].

II.2.2.2 Source harmonique non identifiable

Ce type de générateur de courants harmoniques est principalement représenté par les appareils utilisés dans les domaines électro-domestiques ou tertiaires tels que les téléviseurs et les microordinateurs. Vue leur très large diffusion, ces équipements comportant souvent un redresseur monophasé à diodes avec un condensateur de lissage, prélèvent de courants harmoniques non négligeables au réseau. Dans ce cas, il est de la responsabilité du distributeur de l'énergie électrique d'empêcher la propagation de la perturbation harmonique sur le réseau puisque individuellement chaque utilisateur génère un faible taux d'harmonique.

II.2.3. Effets des harmoniques

Les effets des harmoniques les plus connus et les plus spectaculaires sont la destruction des condensateurs ou des disjoncteurs sous l'effet des forts courants harmoniques amplifiés par des résonances. Un autre phénomène, de plus en plus rencontré, est l'échauffement des transformateurs et des conducteurs de neutre sous l'effet des courants harmoniques de rang 3 [26].

➤ Effets instantanés :

- Déclenchements intempestifs des protections;
- Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, téléviseur, écran d'ordinateur,...);
- Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs);
- Destruction par surcharge thermique de condensateurs;
- Perte de précision des appareils de mesure.

➤ Effets à long terme :

- Une surcharge en courant provoque des échauffements supplémentaires donc un vieillissement prématuré des équipements;
- Echauffement des transformateurs et des alternateurs (par augmentation des pertes Joule, des pertes fer...);
- Fatigue mécanique (couples pulsatiles dans les machines asynchrones,...);

- Echauffement des récepteurs : des conducteurs de phases et du neutre par augmentation des pertes Joule et diélectriques;
- Destruction de matériels (condensateurs, disjoncteurs,...);
- Rayonnement électromagnétique perturbant les écrans (micro-ordinateurs, appareils de laboratoire...) [26].

II.2.4. Caractérisation des perturbations harmoniques

Le récepteur d'énergie se comporte comme une charge polluante, s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou déséquilibrés ou consomme de l'énergie réactive. La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique défini pour la tension ou le courant par rapport à une onde sinusoïdale. Le facteur de puissance est utilisé généralement pour définir la consommation de l'énergie réactive [27], [28].

II.2.4.1 Le taux de distorsion harmonique

On utilisera le terme THD (Total Harmonic Distortion) pour désigner le taux de distorsion harmonique. Le THD s'exprime par rapport à la fréquence fondamentale et caractérise l'influence des harmoniques sur l'onde de signal déformée. Deux taux de distorsion harmonique sont distingués [29] :

- le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD_i
- le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD_v

Le premier s'exprime sous la forme :

$$THD_i = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (\text{II.1})$$

Avec : I_1 la valeur efficace du courant fondamental et I_h les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant.

Le THD_i ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le THD_v est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit, imposée par le réseau :

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{|Z_{cc}^h| I_h}{V_1^2}\right)^2} \quad (\text{II.2})$$

V_1 : Désigne la valeur efficace de v_1 .

Ainsi, plus les impédances Z_{cc}^h ($h > 1$) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible.

II.2.4.2 Le facteur de puissance

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\phi_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \quad (\text{II.3})$$

En présence des harmoniques, on définit la notion de puissance déformante D permettant de rendre compte des harmoniques. Son expression est donnée par l'équation suivante

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{II.4})$$

La puissance Déformante D est une puissance supplémentaire et donnée par la relation (II.5) apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (II.1).

$$D = 3v \sqrt{\sum_{h=2}^{52} i_h^2} \quad (\text{II.5})$$

Où, v représente la valeur efficace de la tension du réseau électrique.

Le facteur de puissance devient :

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \phi_1 \cos \gamma \quad (\text{II.6})$$

On voit bien que la puissance déformante dégrade le facteur de puissance.

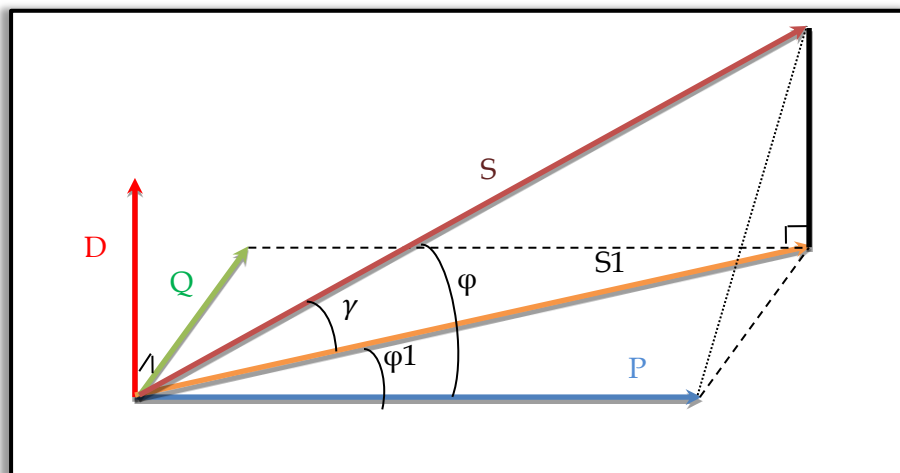


Figure II.1 : Diagramme de Fresnel des puissances

Avec :

φ : Déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S .

φ_1 : Déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S .

γ : Déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système linéaire et celle-là dans le cas d'un système non-linéaire.

On voit bien que les harmoniques affectent aussi le facteur de puissance.

On remarque qu'en régime sinusoïdal la puissance déformante est nulle et le facteur de puissance s'exprime tout simplement par :

$$F.P = \cos \varphi_1 \quad (\text{II.7})$$

II.3 Solutions traditionnelles de réduction des perturbations

II.3.1. Solutions classiques

II.3.1.1 Agir sur la structure de l'installation

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [30].

II.3.1.2 Augmentation de la puissance de court-circuit

L'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible en ce point. Aussi l'impact des harmoniques sera d'autant plus réduit si la puissance de court-circuit est grande [31].

II.3.1.3 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leurs tenues aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée. Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation [30].

II.3.1.4 Compensation de la puissance réactive

La puissance réactive est majoritairement consommée par les moteurs asynchrones et plus récemment par des dispositifs à base d'électronique de puissance. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin [32].

II.3.1.5 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, un filtre résonnant série [Figure (II.2.a)] est placé en parallèle sur le réseau. Cependant, ce type de filtre est très sélectif. Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti [Figure (II.2.b)] du second ordre est préférable. Le dimensionnement de ces filtres dépend des harmoniques à éliminer, des performances exigées, de la structure du réseau et de la nature des récepteurs. Par cette technique, il est en général plus aisé de rejeter les harmoniques de rang élevé que celles de rang faible.

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

- Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire ;
- les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre ;
- le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées ;
- équipements volumineux ;
- inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent [30].

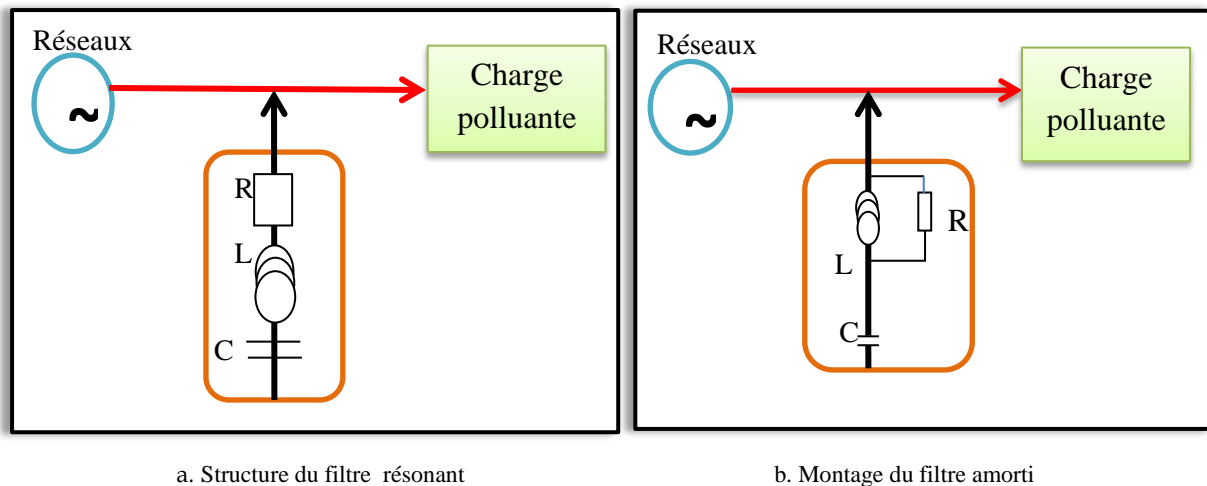


Figure II.2 : filtrage passif

II.3.2. Nouvelles solutions de dépollution

II.3.2.1 Les redresseurs à MLI

Grâce à la stratégie de modulation de largeur d'impulsion, un convertisseur AC- DC à absorption sinusoidale a été rendu possible. C'est une solution très efficace, cependant elle doit être généralisée, ce qui n'est pas le cas malheureusement de nos jours. Dans le cas monophasé, la structure la plus répandue est une mise en parallèle d'un pont redresseur monophasé à diode et d'un hacheur, tandis que dans le cas triphasé, c'est la structure en pont triphasé à base de GTO ou IGBT qui est la plus répandue. Cette solution permet de réduire les harmoniques produits par les convertisseurs AC- DC et il ne peut agir sur les harmoniques créés par d'autres sortes de charges polluantes [31].

II.3.2.2 Filtres actifs

Les progrès réalisés durant ces dernières années dans le domaine des composants semi-conducteurs commandés ont rendu l'utilisation des filtres actifs intéressante. Ce sont aussi des convertisseurs à commutation forcée, utilisés pour la dépollution harmonique des réseaux. Cette pollution a pour origine deux sources. Les harmoniques provenant du côté charge qui se comporte comme des sources de courant harmonique i_{Dh} et ceux provenant du côté réseau qui sont des sources de tension harmonique V_{rh} .

Les avantages de ces filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants [33] :

- le volume physique du filtre est plus réduit ;
- la capacité de filtrage est supérieure ;
- la flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils possèdent aussi quelques inconvénients [34] :

- leur coût élevé a limité leur implantation dans l'industrie ;
- l'absence de réglementation spécifique n'incite pas leur intégration ;
- les pertes sont légèrement plus élevées.

Le but de ces filtres est d'engendrer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension soient rendus sinusoïdaux [29]. Le filtre actif est connecté en série ou en parallèle suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques.

II.3.2.3 Filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle, appelé aussi compensateur shunt SAPF, Il est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il est commandé de façon à injecter au réseau des courants harmoniques égaux à ceux générés par la charge polluante mais de phases opposées, le courant côté réseau est alors sinusoïdal [32]. Sur la Figure (II.3) apparaît le synoptique d'un filtre actif parallèle. Le filtre actif est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur donne la nature de source de courant au filtre actif. La capacité joue le rôle d'une source de tension continue, la tension à ses bornes doit obligatoirement être régulée.

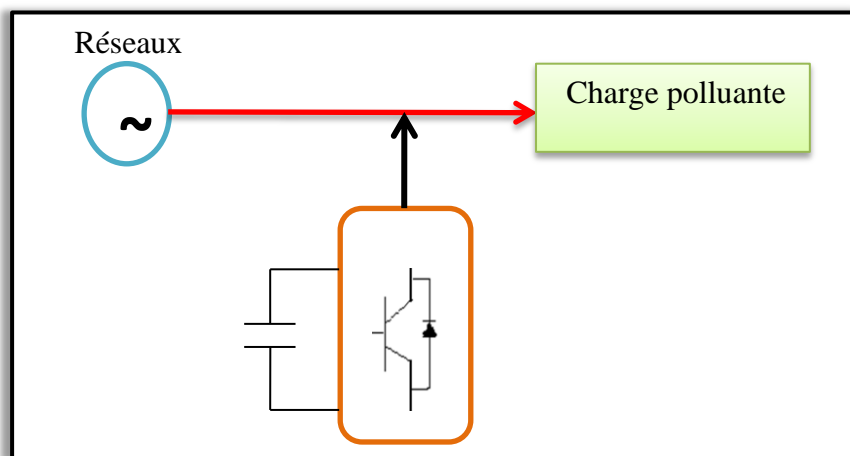


Figure II.3 : Filtre actif parallèle

II.3.2.4. Filtre actif série

Dans cette configuration, le filtre est placé en série sur le réseau comme le montre la Figure (II.4). 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 perturbations provenant du réseau telles que les

harmoniques en tension, les surtensions, etc. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge [29].

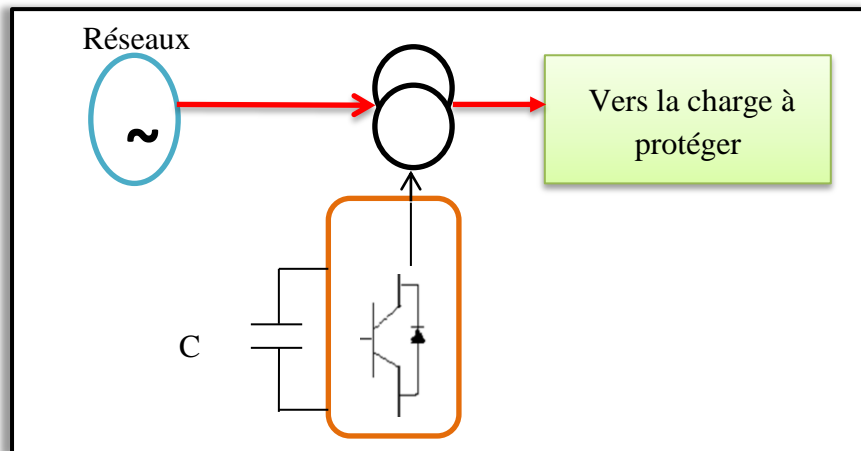


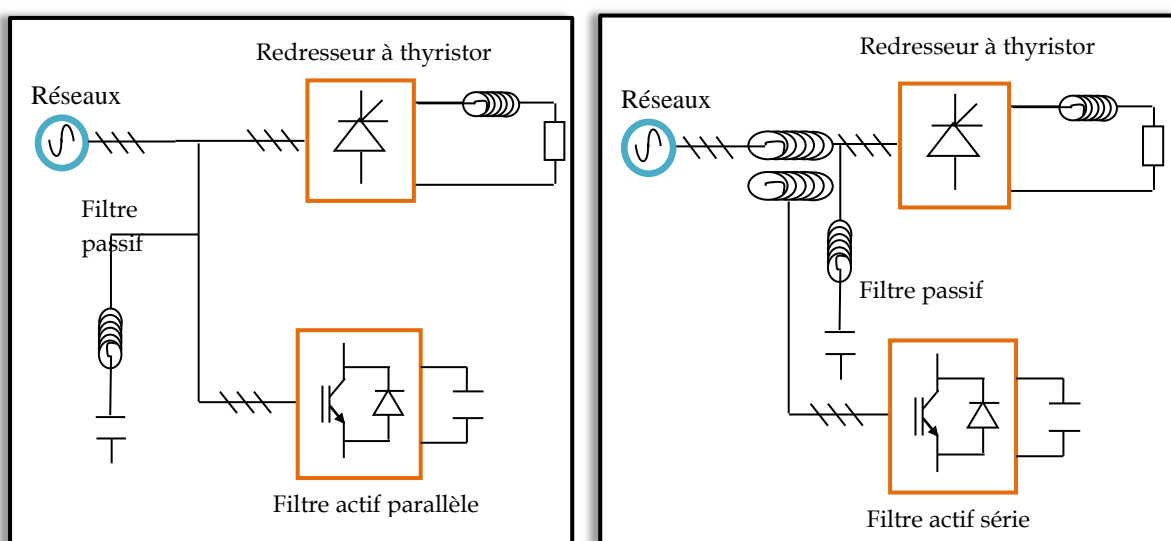
Figure II.4 : Filtrage actif série

II.3.2.5 Filtrage actif hybride

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le prix des filtres actifs, l'association de filtres actifs de faible puissance à des filtres passifs peut être une solution. Plusieurs configurations sont possibles combinant éléments passifs et filtre actif série ou parallèle [35] :

- le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles ;
- le filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles ;
- le filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

La Figure (II.5) montre l'une des configurations les plus récentes [36].

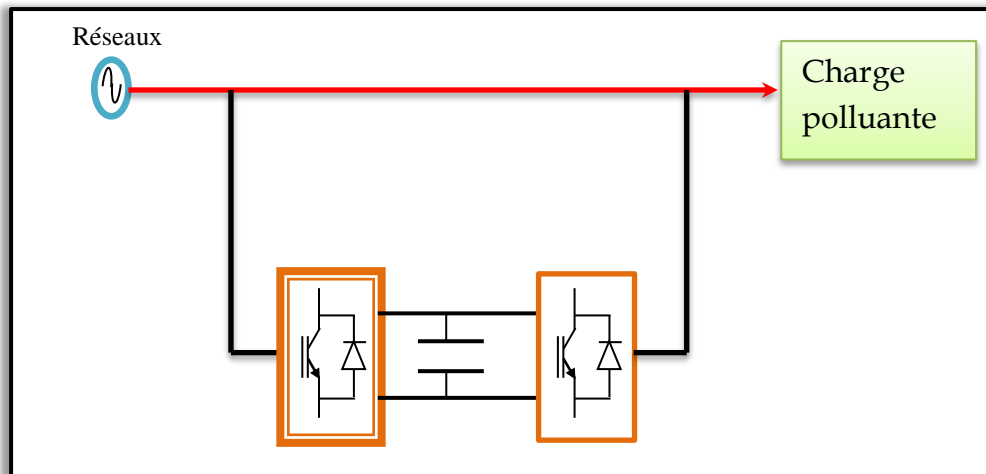


a. Filtre combiné actif parallèle

Et passif parallèle

b. filtre combiné actif

Série et passif parallèle



d. Combinaison parallèle-série

Figure II.5 : Filtre actif hybride

II.4 Applications des filtres actifs parallèles

La principale charge polluante, le redresseur à diodes ou à thyristors, est très utilisée que cela soit pour alimenter des charges continues à partir du réseau ou comme un élément d'interfaçage au réseau dans une conversion à étage intermédiaire continu. De plus en plus de dispositifs de ce type se connectent au réseau électrique. De ce fait, les filtres actifs parallèles sont un champ d'utilisation naturel dans les applications de réseau, notamment dans les réseaux avec plusieurs charges polluantes et dans les réseaux à courant continu en haute tension [37]. Les filtres actifs sont également utilisés dans des applications industrielles, afin de dépolluer une zone avec plusieurs charges non linéaires (redresseurs, certains éclairages, etc.).

En fin, le filtrage actif est également employé dans les applications tertiaires car les filtres actifs peuvent être intéressants dans les bâtiments commerciaux, hôpitaux, etc. dans lesquels il y a de nombreuses charges polluantes comme des ordinateurs, éclairage économique. Ces filtres actifs compensent les courants harmoniques, les courants réactifs et les déséquilibres des charges [37]. Les applications réseau, industrielles, tertiaires, domestiques et en télécommunications apparaissent comme des environnements particulièrement pollués par les harmoniques. Les filtres permettent une compensation globale des harmoniques, souvent jusqu'à l'harmonique 50.

Ces filtres actifs, en plus de réduire les courants harmoniques, améliorent le facteur de puissance et équilibrent les charges triphasées. L'utilisation de ces filtres produit une réduction des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie de l'installation [38].

II.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exposé une idée générale sur la notion d'harmoniques, et principalement sur leurs sources, leurs caractéristiques, et leurs conséquences sur les réseaux électriques. Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions existantes, notamment les techniques de filtrage et compensation à base d'éléments passifs présentent de nombreux inconvénients qui peuvent être l'origine de problèmes d'harmoniques supplémentaires. Afin de palier à ces problèmes, nous avons présente les différentes structures de filtre actif parallèle et série avec leurs combinaisons.

Chapitre III

Etude du Filtre Actif Parallèle à Deux Niveaux

III.1 Introduction

Nous avons rappelé dans le chapitre précédent, les différentes origines des perturbations des réseaux électriques, notamment les perturbations harmoniques et les solutions de dépollution existantes. Le filtre actif parallèle, comme moyen de compensation de ces harmoniques, c'est le plus utilisé pour réaliser des interfaces de dépollution entre les réseaux électriques et les récepteurs polluants. Ce compensateur actif de puissance est composé de deux parties, à savoir une partie puissance et une partie commande. La partie puissance se compose d'un onduleur, d'un filtre de couplage et d'un élément passif lui servant de source d'énergie. La partie commande, sert au contrôle de la commutation des éléments semi-conducteurs formant l'onduleur de la partie puissance. Cependant, l'efficacité du filtre actif se résume dans son algorithme implanté qui est capable de réaliser les deux fonctions suivantes :

- ✓ générer les courants de référence à l'aide d'algorithmes d'identification ;
- ✓ contrôler l'onduleur afin de reproduire exactement ces courants harmoniques.

Ce chapitre contient trois parties, la première partie décrit la structure générale du filtre actif parallèle à deux niveaux. La deuxième partie, consiste à étudier la méthode de calcul des courants de référence. Nous traitons dans la dernière partie le contrôle des courants du filtre actif par un procédé classique.

III.2 Principe de filtrage actif parallèle

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la Figure (III.1), est le plus souvent commandé comme un générateur de courant [23]. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du filtre actif parallèle (F.A.P) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et

déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, située en amont du point de connexion du filtre actif.

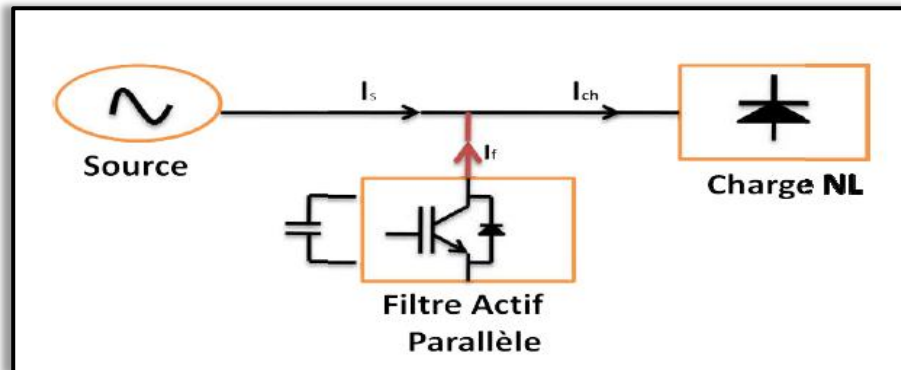


Figure III.1 : Raccordement du FAP avec le réseau

Nous distinguons donc deux types de filtres actifs parallèles, le filtre actif à structure tension et le filtre actif à structure courant. Nous nous intéressons uniquement au filtrage actif parallèle à structure tension. Le filtre actif se compose de deux parties distinctes: La partie puissance et la partie commande. La partie puissance est constituée d'un élément de stockage d'énergie, d'un pont onduleur triphasé et d'un filtre de sortie généralement du premier ordre. Pour la partie commande, on a le bloc d'identification des courants de références, le contrôle des courants injectés au réseau ainsi que la commande des interrupteurs. Le schéma synoptique d'un FAP est présenté à la Figure (III.2).

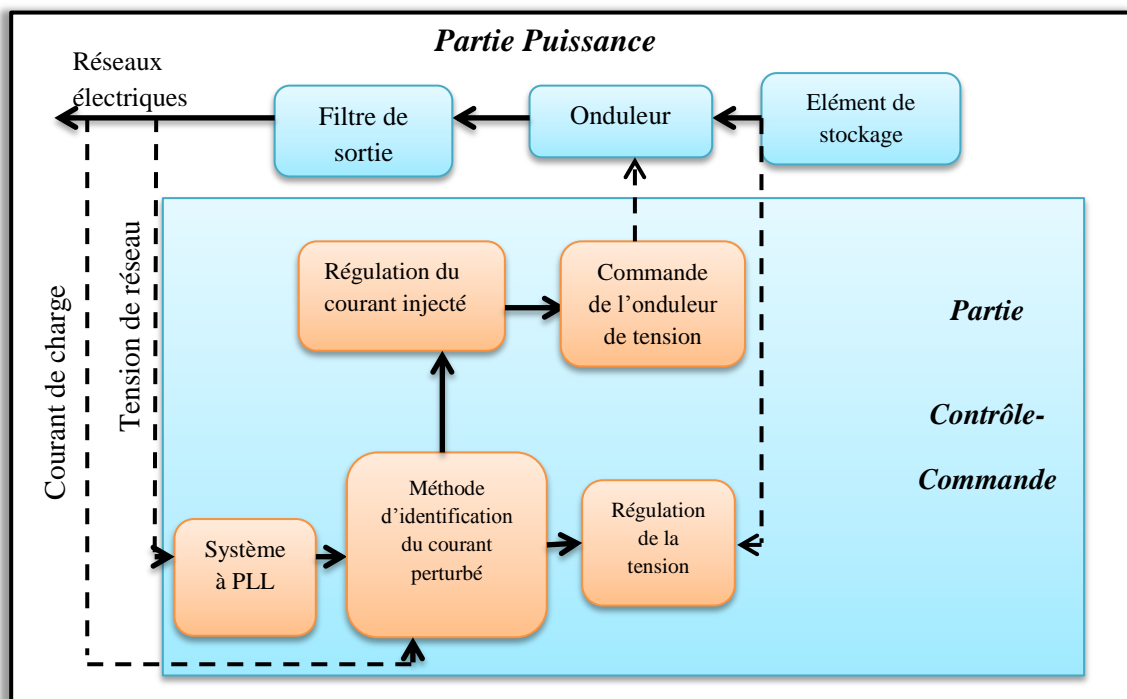


Figure III.2 : schéma synoptique d'un filtre actif parallèle

III.3 Structure générale du filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension à deux niveaux

III.3.1. Topologie générale

La Figure (III.2) donne la structure générale du FAP, laquelle se présente sous la forme de deux parties, partie puissance et partie commande

III.3.1.1 Partie commande

- de la méthode d'identification des courants perturbés ;
- du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants ;
- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie ;
- de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension ;
- de la commande de l'onduleur de tension.

III.3.1.2 Partie puissance

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

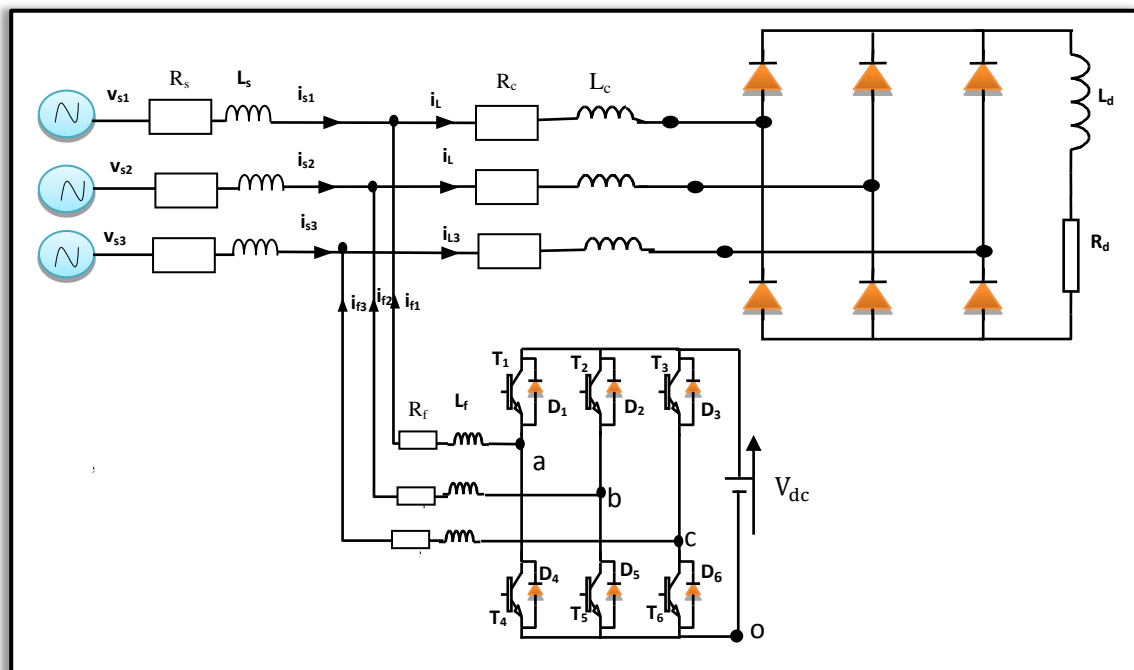


Figure III.3 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle à deux niveaux

III.3.2. Onduleur de tension à deux niveaux

III.3.2.1 Structure générale

L'onduleur triphasé de tension à deux niveaux à base d'IGBT est composée de six interrupteurs bidirectionnels en courant (commandés à l'amorçage et au blocage) conduisant le courant dans les deux directions grâce aux diodes en antiparallèles. Il est associé généralement à deux étages passifs l'un du côté alternatif et l'autre du côté continu L'étage passif du côté alternatif, a comme fonction principale le filtrage, il est constitué d'inductance de sortie. Celui du côté continu assure le stockage de l'énergie par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} .

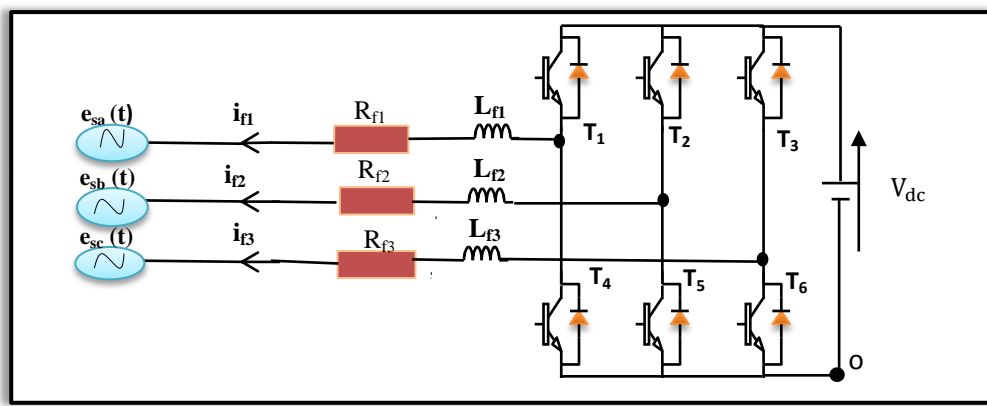


Figure III.4 : Onduleur de tension triphasée

III.3.2.2 Tension générées par l'onduleur

L'onduleur de tension deux niveaux délivre, en sortie, deux niveaux de tensions V_{dc} et 0, en fonction des états des interrupteurs. En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la Figure (III.3) dépendent de l'état de trois signaux de commande [39]. Pour chaque interrupteur bidirectionnel en courant (T_i , D_i avec $i=1$ à 6), on définit une fonction de commutation S_{ki} (avec k est l'indice de phase ou de bras d'onduleur $k=a, b, c$) :

$$S_{ki} = \begin{cases} 1 & \text{si } T_i \text{ ou } D_i \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } T_i \text{ et } D_i \text{ est ouvert} \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

La complémentarité entre les deux interrupteurs de chaque bras impose l'équation suivante:

$$S_{k(i+3)} = 1 - S_{ki} \quad (\text{III.2})$$

Les tensions triphasées de sortie par rapport à la référence de la source continue « o » peuvent être exprimées par :

$$\begin{bmatrix} V_{ao} \\ V_{bo} \\ V_{co} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} \\ S_{b1} \\ S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{III.3})$$

Les tensions composées entre les phases sont données par:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bo} - V_{co} \\ V_{co} - V_{ao} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{a1} - S_{b1} \\ S_{b1} - S_{c1} \\ S_{c1} - S_{a1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{III.4})$$

Ainsi, on peut facilement exprimer les tensions V_{kn} ($k=a, b, c$) en fonction des fonctions de commutation S_{ki} comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} V_{ab} - V_{ca} \\ V_{bc} - V_{ab} \\ V_{ca} - V_{bc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2S_{a1} - S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} - 2S_{b1} - S_{c1} \\ -S_{a1} - S_{b1} - 2S_{c1} \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{III.5})$$

Puisque les variables S_{ai} , S_{bi} et S_{ci} prennent chacune deux valeurs, il en résulte huit combinaisons de commande, qui sont présentées dans le Tableau (III.1).

S_{a1}	S_{b1}	S_{c1}	V_{an}	V_{bn}	V_{cn}
0	0	0	0	0	0
1	0	0	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
1	1	0	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$
0	1	0	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$
0	1	1	$-2V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$	$V_{dc}/3$
0	0	1	$-V_{dc}/3$	$-V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
1	0	1	$V_{dc}/3$	$-2V_{dc}/3$	$2V_{dc}/3$
1	1	1	0	0	0

Tableau III.1 : Tensions en sortie de l'onduleur du FAP

III.3.2.3 Représentation vectorielle des tensions générées

Le fonctionnement de l'onduleur de tension, en particulier en ce qui concerne les tensions de phases, il est commode de représenter les tensions fournies par l'onduleur dans un repère orthogonal (α, β) [40].

Dans le plan (α, β) , on aura:

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

La Figure (III.5) présente les tensions générées par l'onduleur sous forme d'un vecteur, il y a huit positions possibles, six se trouvent aux sommets d'un hexagone (v_1 à v_2) de module $\sqrt{2/3}v_{dc}$ et deux positions à l'origine, de module nul (v_0 et v_7).

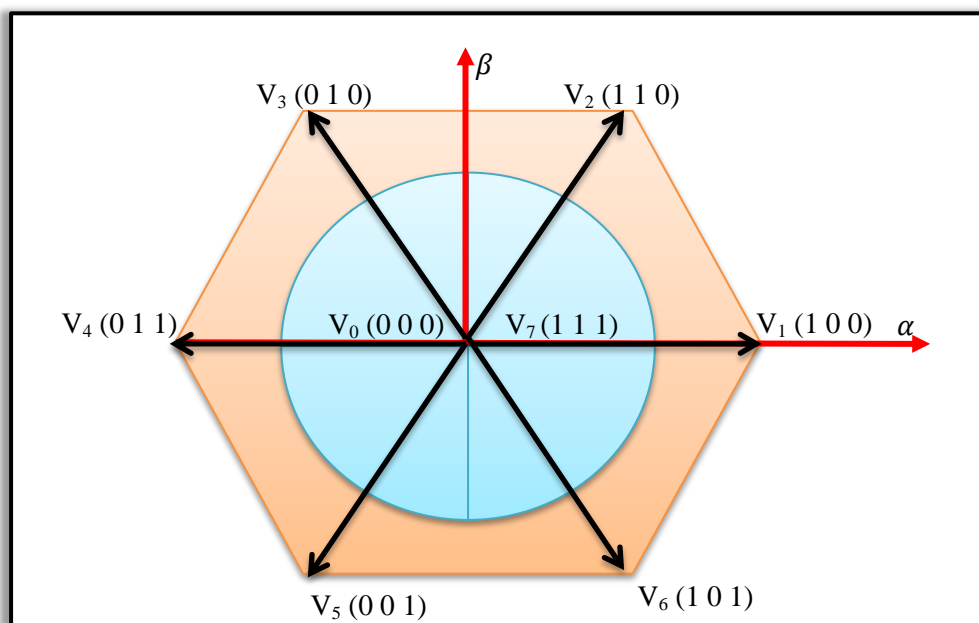


Figure III.5 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur

III.4 Contrôle du FAP à base d'onduleur de tension à deux niveaux

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

- l'identification des courants de référence (courants harmoniques) ;
- la régulation du courant injecté sur le réseau par de l'onduleur de tension ;
- la régulation de la tension continue (pour le FAP autonome).

III.4.1. Identification des courants harmoniques par méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

Parmi toutes les méthodes présentées dans la littérature, nous avons choisi de mettre en œuvre la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées, car elle est d'une grande souplesse en permettant de choisir la perturbation à compenser avec précision,

rapidité et facilité d'implantation [32]. La méthode des puissances instantanées introduite par H. Akagi et al [41], exploite la transformation de Concordia des tensions aux points de raccordement du filtre actif parallèle et des courants absorbés par la charge polluante, afin de calculer les puissances réelle et imaginaire instantanées.

Notons respectivement par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales de Concordia associées aux tensions du réseau V_{sk} T_{ki} ($k=a, b, c$) et aux courants de la charge polluante I_{ck} . La transformation de Concordia permet d'écrire, les deux relations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ca} \\ I_{cb} \\ I_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8})$$

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

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ -V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

En remplaçant les tensions et les courants diphasés par leurs homologues triphasés, nous obtenons :

$$p = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta = V_{sa} I_{ca} + V_{sb} I_{cb} + V_{sc} I_{cc} \quad (\text{III.10})$$

De même, pour la puissance imaginaire on a :

$$\begin{aligned} q &= V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{sc} - V_{sb}) I_{ca} + (V_{sa} - V_{sc}) I_{cb} + (V_{sb} - V_{sa}) I_{cc}] \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

Les composantes des puissances réelle et imaginaire instantanées s'expriment comme la somme d'une composante continue et d'une composante alternative, ce qui nous permet d'écrire [42] :

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Où :

\bar{p} , \bar{q} Sont les composantes continues de p et q .

\tilde{p} , \tilde{q} Sont les composantes alternatives de p et q .

L'inverse de l'équation (III.9) des puissances active et réactive permet d'établir la relation (III.13) des courants I_α et I_β :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 - V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

En considérant les équations (III.12) et (III.13), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α, β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et somme des harmoniques. Ceci conduit à :

$$\begin{bmatrix} I_{c\alpha} \\ I_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & 0 \\ \hat{V}_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_{dc} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{q} \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

Maintenant, si on souhaite également compenser la puissance réactive, ainsi que les courants harmoniques générés par les charges non linéaires, le signal de référence du filtre actif parallèle doit inclure \tilde{p} , \bar{q} , et \tilde{q} . Dans ce cas, les courants de référence sont calculés par:

$$\begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

Les courants triphasés sont obtenus à partir des courants diphasés $I_{ref\alpha}$ et $I_{ref\beta}$ par la transformation inverse de Concordia. Ces courants représentent les perturbations et deviennent les courants de référence qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques.

$$\begin{bmatrix} I_{refa} \\ I_{refb} \\ I_{refc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ref\alpha} \\ I_{ref\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

Il est évident, d'après la relation (III.16), que pour identifier une des trois composantes, par exemple les courants harmoniques, les parties alternatives des puissances réelles et imaginaires doivent être séparées des parties continues. Cette séparation peut être réalisée en utilisant deux filtres, le premier pour isoler la partie \bar{P} de la puissance active instantanée, le second pour isoler la partie \bar{q} de la puissance réactive instantanée, comme le présente la Figure (III.6).

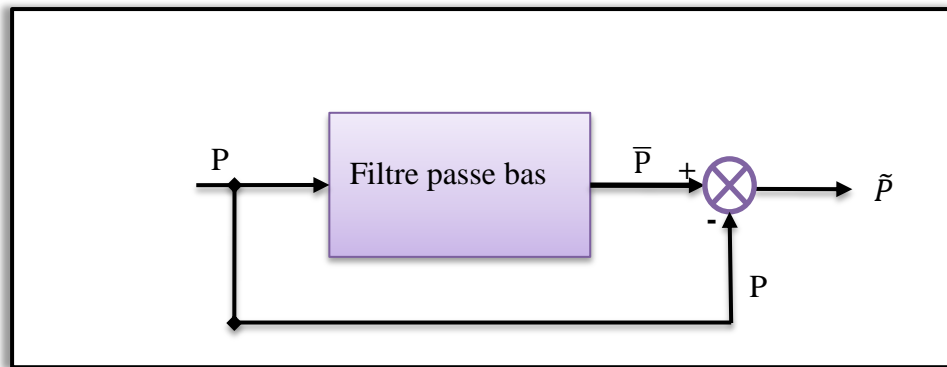


Figure III.6 : Schéma représentant le principe de séparation des puissances

La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre :

$$F(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi\omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{III.17})$$

Avec:

$\omega_c = 2\pi f_c$, f_c : Est la fréquence de coupure du filtre ;

s : Est l'opérateur de Laplace ;

ξ : Est le coefficient d'amortissement.

Le schéma de la figure (III.7) illustre les différentes étapes permettant l'obtention des courants de référence par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées.

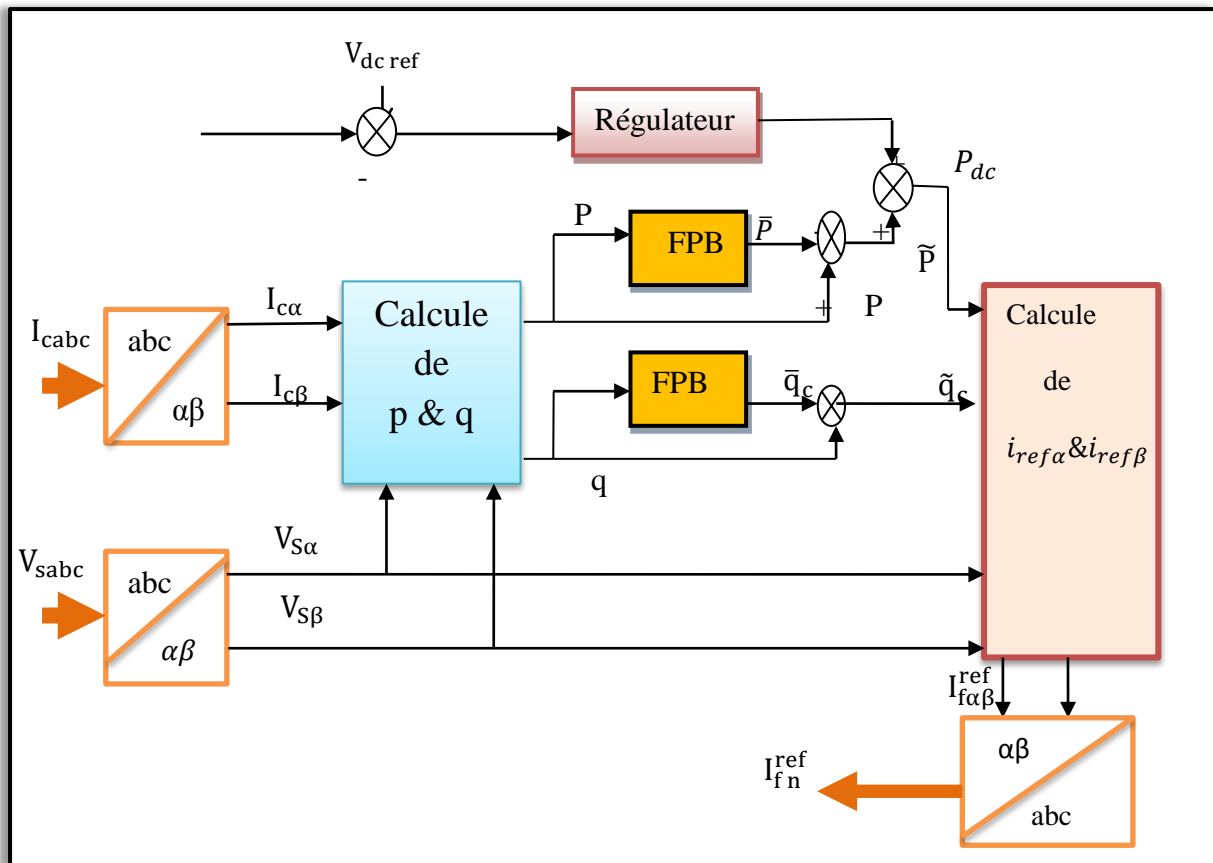


Figure III.7 : Schéma de principe d'identification des courants harmoniques par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées

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 (III.2) résume les modes de compensations possibles [42].

Paramètres de contrôle	
Compensation des harmoniques de courant	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = \tilde{q}$
Compensation de l'énergie réactive	$p_f = 0$ et $q_f = \bar{q}$
Compensation des harmoniques de courant et de l'énergie réactive	$p_f = \tilde{p}$ et $q_f = q$

Tableau III.2 : Les modes de compensation de la commande des puissances instantanées

III.4.2. Régulation du courant du filtre actif parallèle

Le but de la boucle de régulation du courant est de contrôler le courant à la sortie de l'onduleur. La mise au point d'un régulateur doit prendre en compte les conditions suivantes [43] :

- ❖ la bande passante du régulateur doit être assez large afin de ne pas introduire un retard important;
- ❖ le fonctionnement de la régulation ne doit pas être perturbé par les harmoniques dus aux découpages de l'onduleur. Ces harmoniques doivent être atténués à la sortie du régulateur.

III.4.2.1 Modèle mathématique du FAP dans le repère

La Figure (III.8) montre le modèle électrique équivalent par phase d'un filtre actif parallèle, à base d'un onduleur de tension à deux niveaux, connecté entre un réseau alternatif et une charge non linéaire.

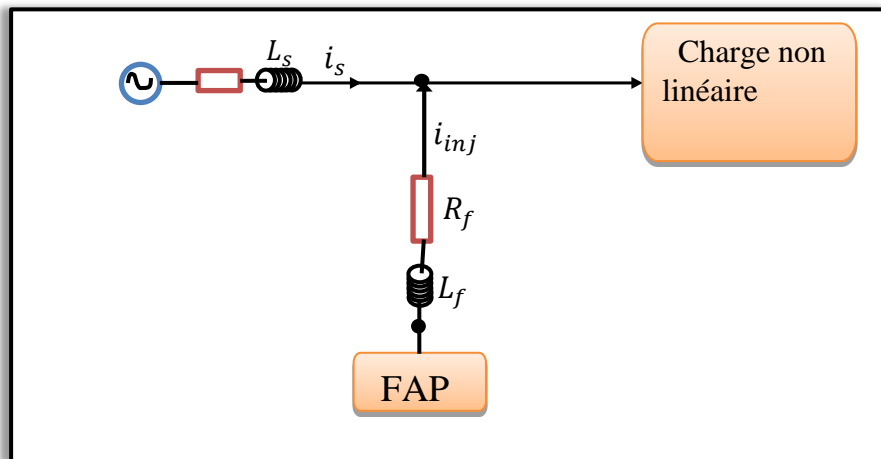


Figure III.8 : Circuit monophasé équivalent d'un filtre actif parallèle

L'équation qui relie le courant et la tension du filtre actif s'exprime par:

$$V_f = L_f \frac{dI_{inj}}{dt} + V_s \quad (\text{III.18})$$

Avec:

L_s , I_s et V_s : Inductance, courant et tension au point de raccordement côté source d'alimentation

L_f , I_{inj} et V_f : Inductance de sortie, courant et tension du filtre actif.

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

$$\Delta I = I_{ref} - I_{inj} \quad (III.19)$$

Des équations (III.18) et (III.19), on obtient:

$$\begin{aligned} L_f \frac{d}{dt} \Delta I &= (V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref}) - V_f \\ &= V_{fref} - V_f \end{aligned} \quad (III.20)$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (III.20) est défini comme tension de référence (V_{fref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{fref} = V_s + L_f \frac{dI_{ref}}{dt} \quad (III.21)$$

En réalité, le vecteur (V_{fref}) est la tension permettant de générer un courant I_{inj} égal à I_{ref} .

III.4.2.2 Synthèse du régulateur du courant

Nous utilisons simplement pour chacune des phases un régulateur proportionnel suivi d'un filtre passe bas du premier ordre. Le rôle de ce filtre est d'atténuer les signaux hautes fréquences venant de la MLI. Le schéma de régulation du courant est représenté sur la Figure (III.9).

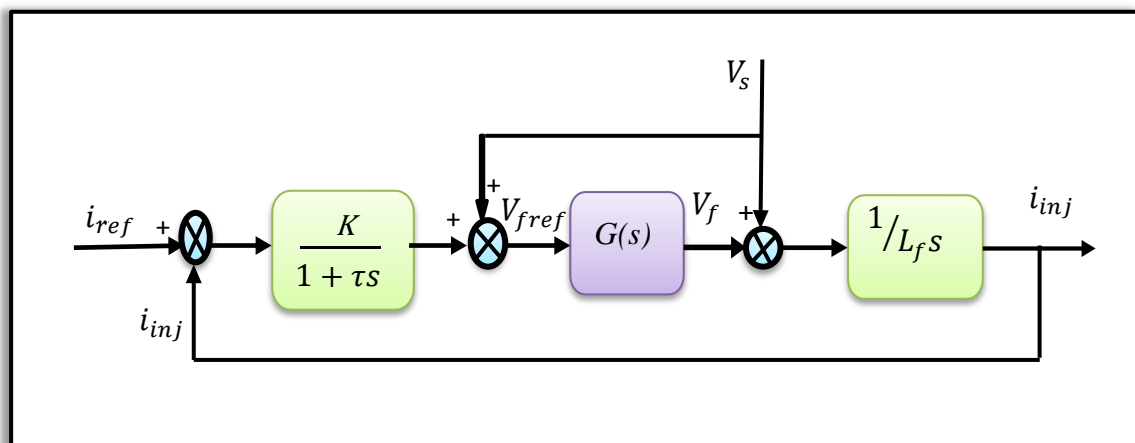


Figure III.9 : Schéma de la régulation des courants du SAPF

L'onduleur de tension à commande MLI est modélisé par un gain G_0 [43] :

$$G_0 = \frac{V_{dc}}{2V_p} \quad (\text{III.22})$$

Avec

V_{dc} : Tension côté continu de l'onduleur ;

V_p : Amplitude de la porteuse triangulaire.

Pour que v_f soit égale à v_{fref} , nous choisissons G_0 égale à 1. Le schéma de la régulation de courant peut alors se simplifier comme indiqué sur la figure (III.10).

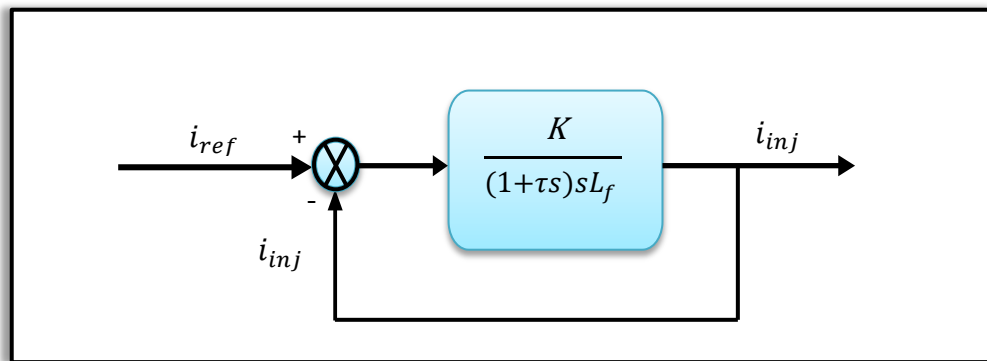


Figure III.10 : Schéma simplifié de la régulation

La fonction de transfert de la boucle fermée est:

$$\frac{i_{inj}}{i_{ref}} = \frac{\omega_i^2}{s^2 + 2\xi_i \omega_i s + \omega_i^2} \quad (\text{III.23})$$

Avec:

$$\omega_i = \sqrt{\frac{K}{L_f \tau}} \quad \text{Et} \quad \xi_i = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{L_f}{K \tau}}$$

III.4.3. Régulation de la tension continue

Pour les petites et moyennes puissances, l'élément de stockage de l'énergie le plus adapté est une capacité placée du côté continu de l'onduleur qui a deux tâches essentielles [33] :

- ❖ en régime permanent, il maintient la tension du bus continu v_{dc} constante avec des faibles oscillations ;
- ❖ il sert comme élément stockage d'énergie pour compenser la différence de la puissance réelle entre la charge et la source lors des périodes transitoires.

III.4.3.1 Principe de la régulation

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur constante. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne v_{dc} aux bornes du bus continu sont les suivants [44]:

- ❖ les pertes dans les interrupteurs;
- ❖ les pertes dans les filtres de sortie L_f ;
- ❖ l'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

Sur la Figure (III.7), nous remarquons que suite à un écart entre v_{dcref} et v_{dc} , la puissance p_{dc} à la sortie du régulateur de tension s'ajoute, à un signe près à la puissance active harmonique et donne lieu à un courant fondamental actif supplémentaire corrigeant la tension continue v_{dc} [30].

III.4.3.2 Synthèse du régulateur de tension

Afin d'obtenir la quantité p_{dc} représentant la puissance active nécessaire pour maintenir v_{dc} proche de sa référence v_{dcref} on peut utiliser un simple régulateur type proportionnel [32]. En régime permanent les courants référence ne contiennent pas de composantes fondamentales et la puissance nécessaire pour compenser les pertes est faible. Dans ce cas, un simple gain est suffisant et pour filtrer les fluctuations à 300Hz, nous proposons d'ajouter un filtre passe-bas du premier ordre en sortie du régulateur [44].

La fonction de transfert du régulateur est donnée par:

$$\xi_c = \sqrt{\frac{C v_{dcref}}{K_c \tau_c}} \quad (III.24)$$

Avec :

K_c : Gain du régulateur;

τ_c : Constant de temps.

En négligeant les pertes par commutation dans le filtre actif ainsi que l'énergie stockée dans le filtre de sortie L_f , la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension continue v_{dc} s'exprime par:

$$p_{dc} = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C v_{dc}^2 \right) \quad (\text{III.25})$$

Pour des faibles variations de v_{dc} autour de $v_{dc\text{ref}}$, l'équation (III.25) peut s'écrire:

$$p_{dc} = C v_{dc\text{ref}} \frac{d}{dt} (v_{dc}) \quad (\text{III.26})$$

Des équations (III.24) et (III.26), la boucle de régulation de la tension continue v_{dc} peut être fonctionnellement représentée par la Figure (III.11).

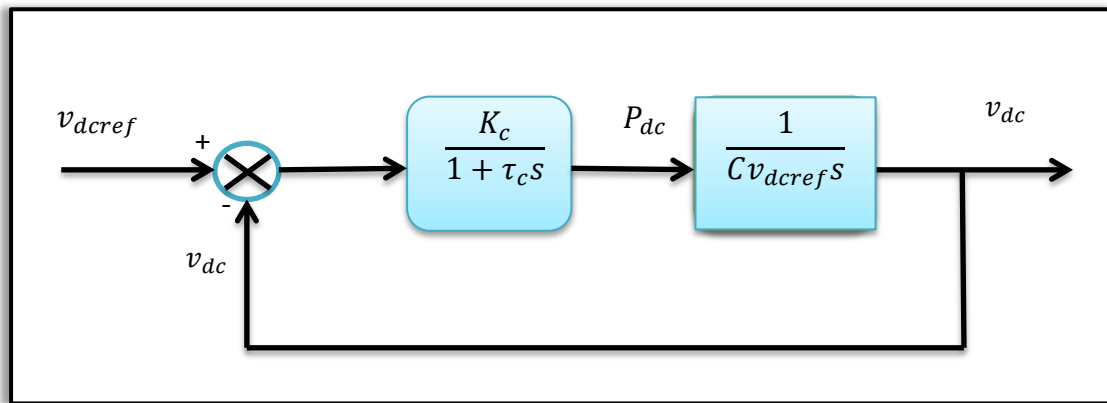


Figure III.11 : Boucle de régulation de la tension continue

La fonction de transfert en boucle fermée est alors:

$$F(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\xi_c \omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{III.27})$$

Avec :

$$\omega_c = \sqrt{\frac{K_c}{C v_{dc\text{ref}} \tau_c}} \quad (\text{III.28})$$

$$\xi_c = \sqrt{\frac{C v_{dc\text{ref}}}{K_c \tau_c}} \quad (\text{III.29})$$

En général, la régulation est stable, mais pour obtenir un amortissement suffisant, le produit $K_c \tau_c$ doit être limité.

III.4.4. Stratégie de commande de l'onduleur à deux niveaux

Les performances du filtre actif, notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des courants de référence, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension. Différentes commandes sont recensées dans la littérature [32]. Deux stratégies principales de commande sont couramment mises en œuvre, à savoir :

- ✓ la commande par hystérésis;
- ✓ la commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

L'objectif de la commande, que ce soit à MLI ou par hystérésis, est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de manière à ce que le courant du filtre actif soit le plus proche de sa référence. On trouve diverse variantes de contrôle par MLI : MLI calculée, MLI à échantillonnage naturel et MLI vectorielle.

III.4.4.1 Commande par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur [23]. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Figure (III.12), est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations.

Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la *commande par hystérésis modulée (MLI)*. Mais dans cette stratégie de commande, il est difficile de définir la largeur de la bande de l'hystérésis. De plus, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

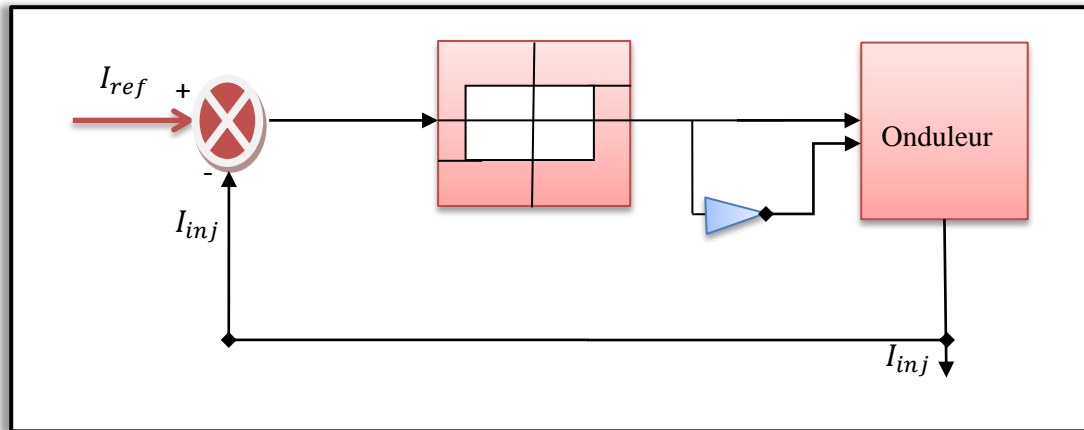


Figure III.12 : Principe de commande des courants par hystérésis

III.4.4.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la *commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)*. La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI intersective*. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par la Figure (III.13).

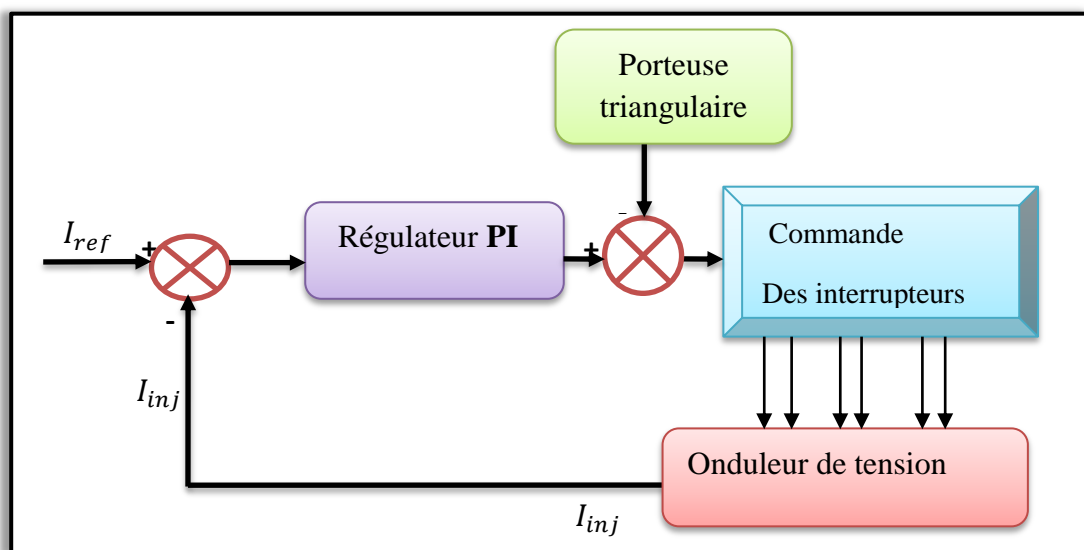


Figure III.13 : Principe de commande des courants par MLI

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

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

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié les performances des algorithmes de commande du filtre actif parallèle appliqué sur la charge non linéaire. Aussi nous avons étudié leur fonctionnement à deux niveaux : sa structure et les différents modèles. Ensuite nous avons présenté la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants de référence. La tension appliquée dans la méthode d'identification est une tension triphasée fournie par le réseau. La tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée), pour que la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées soit applicable. Dans sa forme classique, cette ne permet pas la détermination d'un courant harmonique d'un rang particulier. Etant donné que la tension du réseau est souvent déséquilibrée et/ou déformée et afin de généraliser l'application de cette méthode pour l'adopter à tout type de tension.

Chapitre IV

Simulations et interprétation des Résultats

IV.1 Introduction

La simulation numérique est un outil nécessaire pour appréhender les phénomènes complexes liés au non linéarité des éléments semi-conducteurs qui constituent les convertisseurs statiques et à l'interdépendance des divers organes de l'association réseau – convertisseur – charge – commande.

Dans le cadre de l'étude du comportement du filtre actif parallèle commandé par hystérésis, nous avons utilisé le logiciel de simulation Matlab.

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats de simulation de l'ensemble réseau, charge non-linéaire avant et après le filtrage. Ensuite nous avons étudié deux états de simulations : état sain et état défaillant lors le fonctionnement de l'onduleur.

Dans ce chapitre nous allons présenterons les résultats de simulation de l'ensemble réseau, charge non-linéaire du FAP en mode de fonctionnement sain et mode dégradé (transistor maintenu ouvert) pour choisir les variables indicateurs de défaut et proposer une méthode de détection et localisation de défaut au niveau du FAP.

IV.2 Résultats de simulation

Pour évaluer les performances, en mode sain, du filtre actif parallèle à base d'un onduleur de tension à deux niveaux, nous avons procédé à la simulation de l'association Réseau électrique équilibré-Charge polluante (redresseur PD3 à diodes)-FAP, tout en adoptant la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées pour l'identification des courants harmoniques, ainsi que la commande par hystérésis pour commander l'onduleur du FAP. La simulation du système global est effectuée sous l'environnement Matlab/Simulink en utilisant également la toolbox « Sim Power Systems ». Lors des simulations, la charge

polluante est constituée par le pont redresseur triphasés PD3 à diodes et le réseau d'alimentation est un réseau triphasé équilibré non-pollué. Le réseau d'alimentation est modélisé par phase par une f.e.m. sinusoïdale en série avec une inductance L_c caractérisant l'impédance de court-circuit du réseau. Les redresseurs débitent dans deux charges RL.

L'inductance L_s à l'entrée des redresseurs modélise l'impédance de ligne et les éventuelles inductances additionnelles mises en œuvre pour limiter les variations brusques de courant. Le filtre actif parallèle est composé d'un onduleur de tension à deux niveaux avec une source de tension continue fixe (filtre actif non-autonome) et une inductance de filtrage L_f . Les paramètres de simulation sont listés dans le tableau suivant.

Paramètre		Valeur numérique
Réseau électrique	E_s	220 V (valeur efficace simple)
	Fréquence f	50 Hz
	Inductance L_s	$14.12 \cdot 10^{-6}$ H
Charge perturbatrice (polluante)	Résistance R	$R_1 = 12.87 \cdot 10^{-3} \Omega$
	Inductance L	$105.98 \cdot 10^{-6}$ H
Filtre actif parallèle	Inductance L_f	$450 \cdot 10^{-6}$ H
	Tension V_{de}	800V

Tableau IV.1: Paramètres de simulation d'un filtre actif parallèle à base d'onduleur de tension à deux niveaux

IV.2.1. Résultats de simulation de l'ensemble réseau, charge non-linéaire avant le filtrage

Dans un premier temps, nous avons modélisé puis simulé le réseau électrique triphasé à trois fils, et sa charge non linéaire, sans connecter le filtre actif. Puisque tous les courants de phase (I_{ch123}) sont d'allures identiques, nous présentons les résultats de simulation pour une seule phase, en l'occurrence la phase1(I_{Ch1}) avant le filtrage et son spectre harmonique.

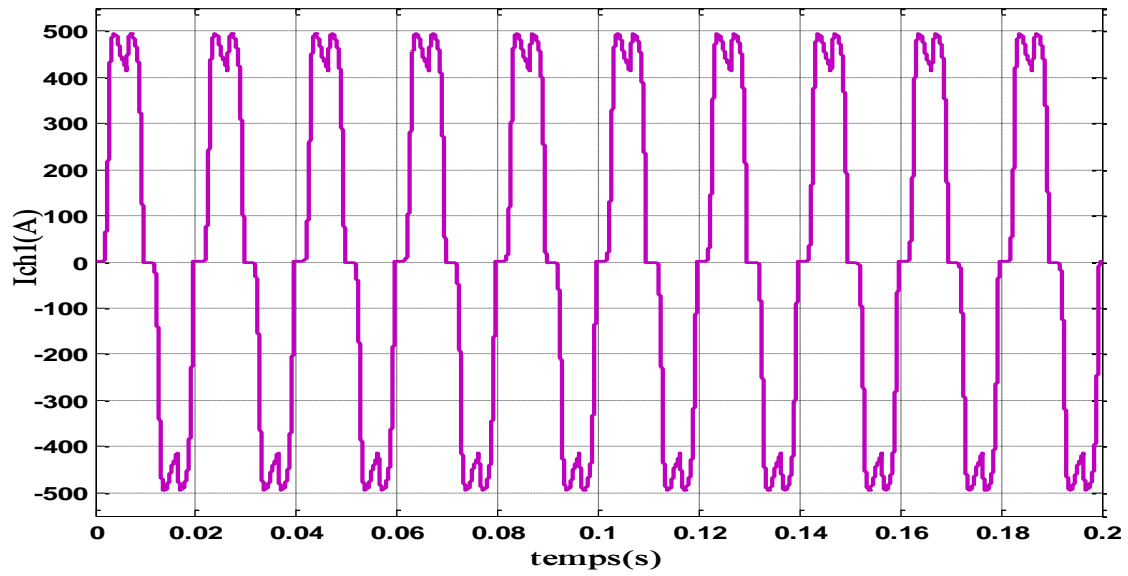


Figure IV.1 : Le courant de ligne généré par la charge non linéaire

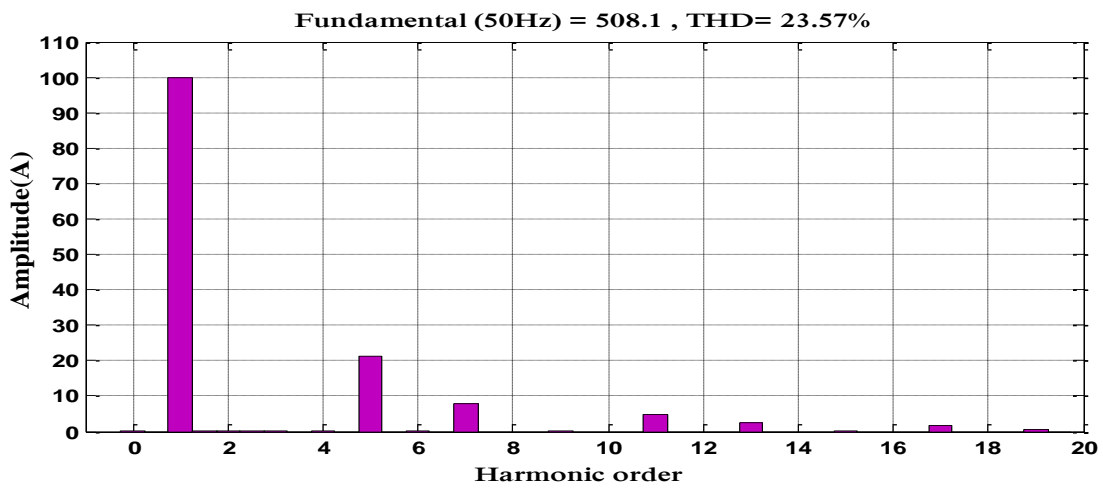


Figure IV.2 : Spectre harmonique du courant de ligne généré par la charge non linéaire

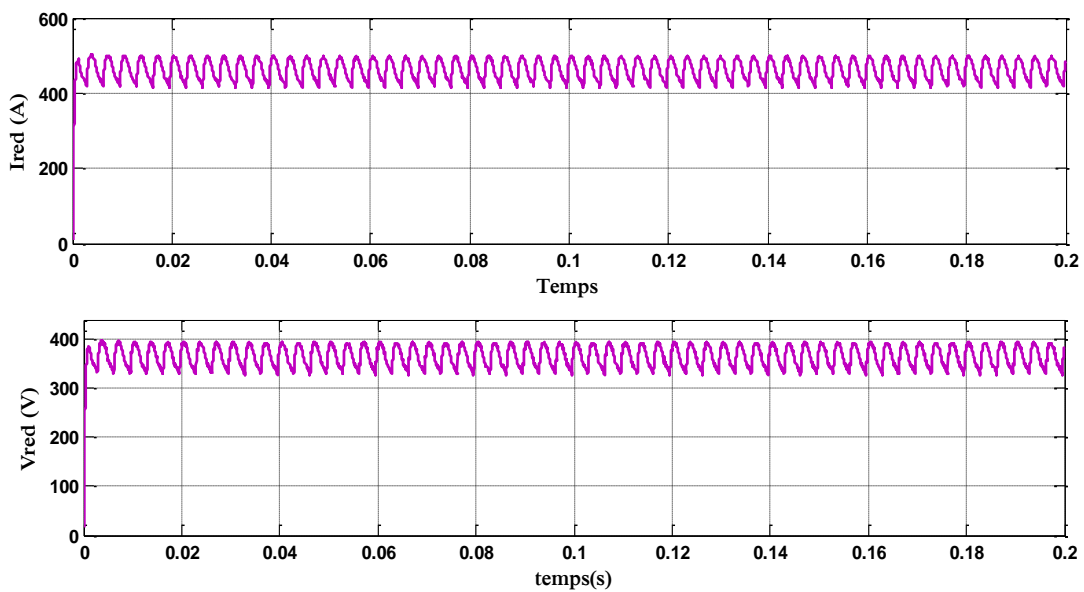


Figure IV.3 : Le Courant et la tension à la sortie des redresseurs

IV.2.2. Résultats de simulation de l'ensemble réseau, charge non-linéaire après le filtrage en mode de fonctionnement sain

Les résultats de simulation obtenus par la méthode $p-q$, pour la phase (a), sont données par les Figures suivantes : Le taux de distorsion harmonique avant compensation était égal à 23.57 %, après compensation devient 0.93 %.

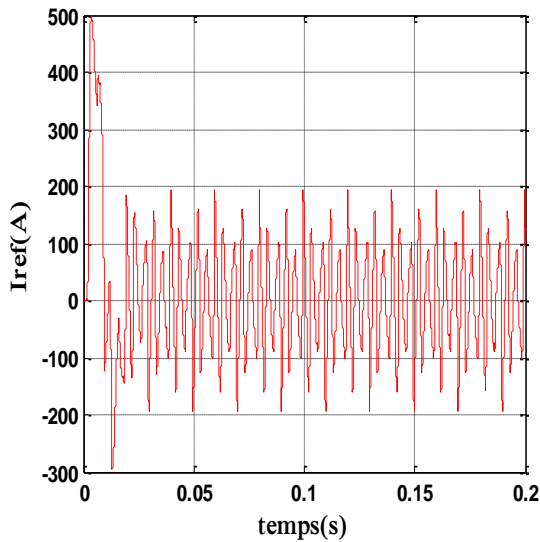


Figure IV.4 : courant de la référence

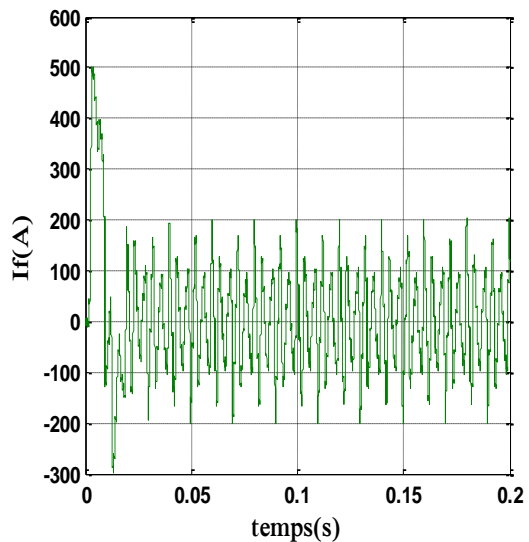


Figure IV.5 : courant injectés par filtre

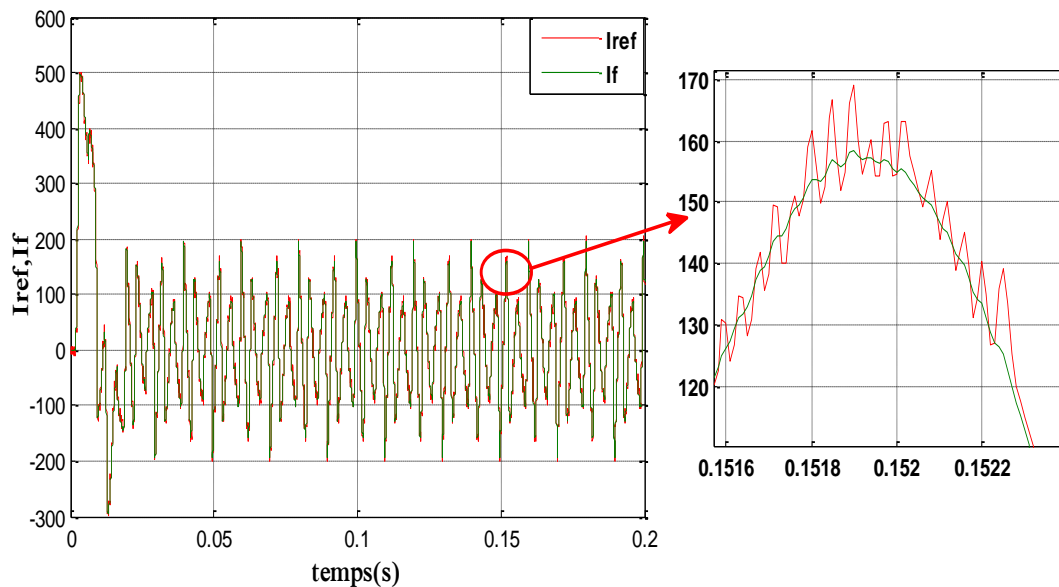


Figure IV.6 : courants harmonique et référence

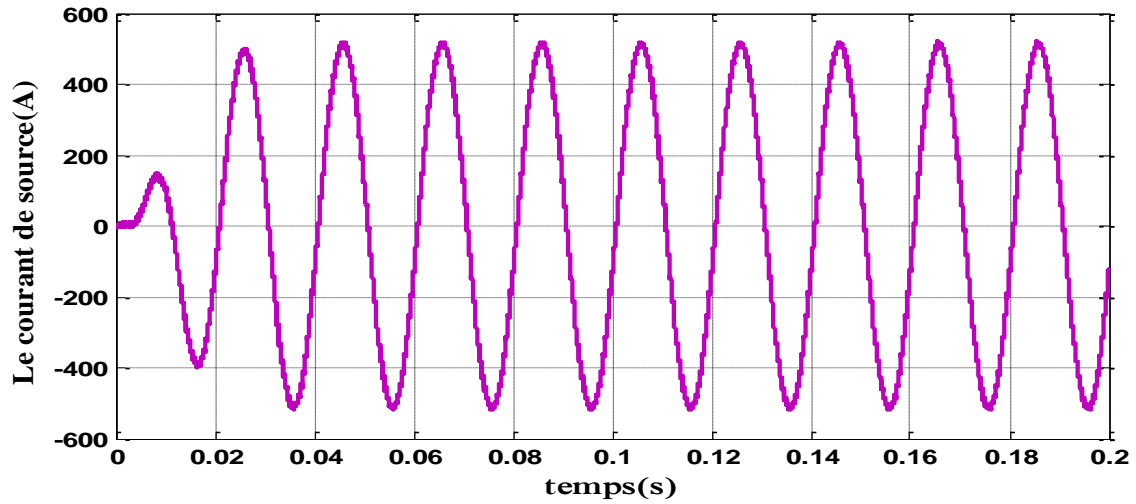


Figure IV.7 : Le courant de source après filtrage

Fundamental (50Hz) = 512.8 , THD= 1.03%

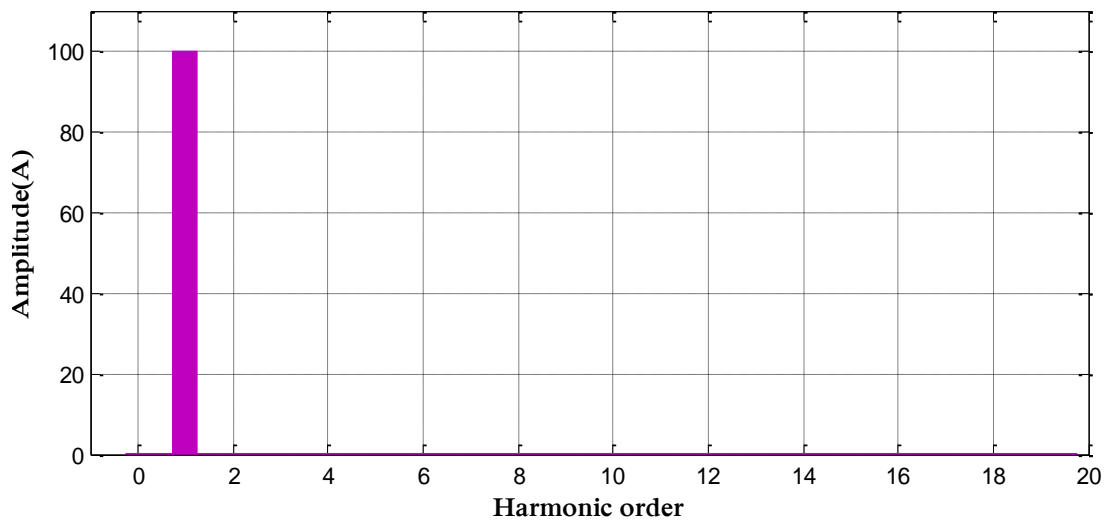


Figure IV.8 : spectre harmonique du courant de source après compensation

❖ *Les courants injectés par le filtre :*

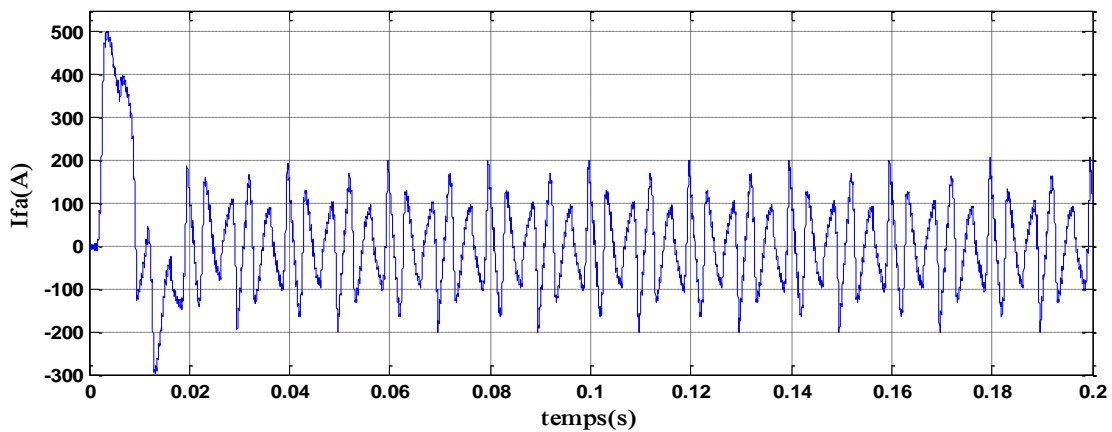


Figure IV.9 : courant Ifa de filtre

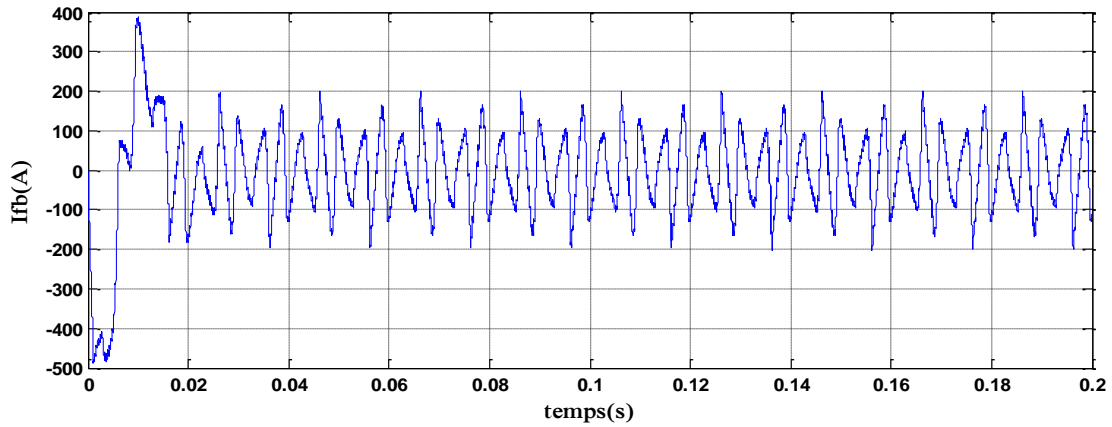


Figure IV.10 : courant Ifb de filtre

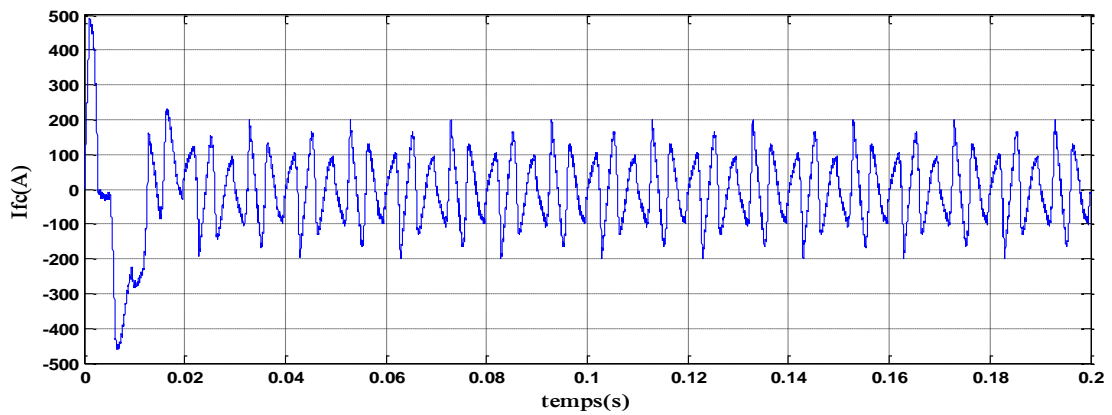


Figure IV.11 : courant Ifc de filtre

❖ *les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre :*

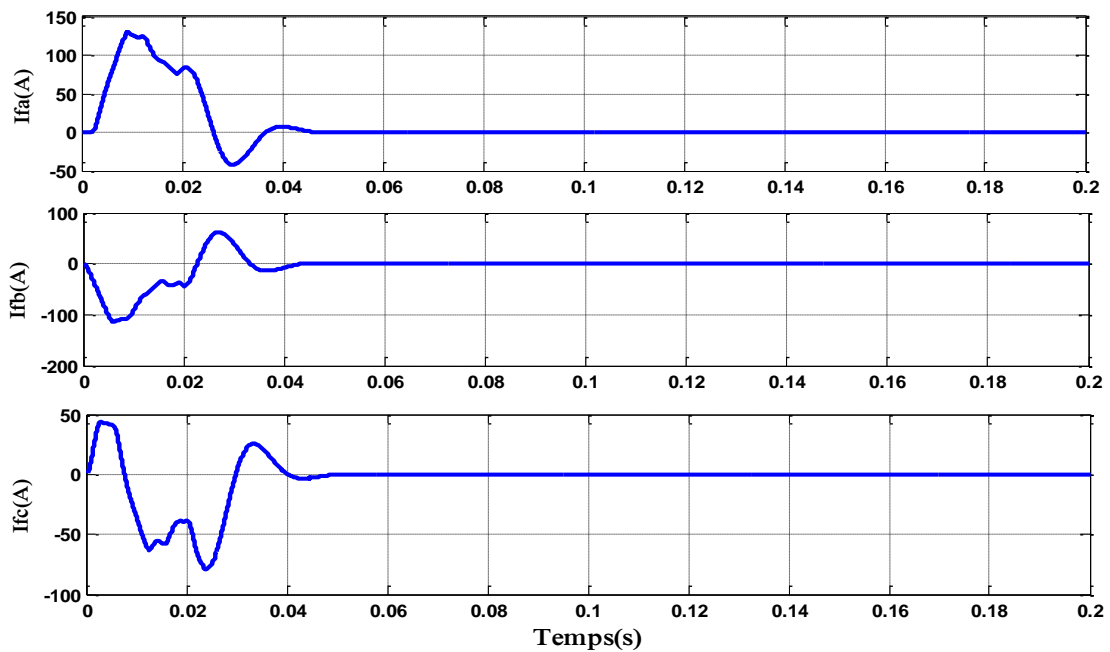


Figure IV.12 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc

✓ *Interprétation*

- La Figure IV.2 illustre l'évolution du taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la phase 1 de la charge polluante. Ce THD varie entre et 23,57%.

- La Figure IV.8 l'évolution du taux de distorsion harmonique (THD) du courant de la phase 1 du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à deux niveaux. Ce THD est 1,03%.

- Les courants triphasés du réseau électrique après filtrage par un FAP à base d'onduleur de tension à 2 niveaux sont présentés dans la figure IV.7. Ils sont quasi-sinusoïdaux.

- Les Figures IV.6 présentent les courants harmoniques triphasés identifiés par la méthode des puissances réelle et imaginaire instantanées et les Figures IV.9, IV.10, IV.11 présentent les courants triphasés injectés par le FAP à base d'onduleur de tension à deux niveaux, on remarque que le courant du FAP suit sa référence pour chaque phase. On remarque aussi que ces courants présentent une forme d'onde symétrique.

- La Figure IV.12 montre les valeurs moyennes des courants de phase injectés par le FAP à base d'onduleur de tension à deux niveaux. Ils évaluent que ces valeurs sont nulles, en régime permanent, car les courants injectés par le FAP sont symétriques.

IV.2.3. Résultats de simulation de l'ensemble réseau, charge non-linéaire après le filtrage en mode dégradé (défaillant)

Si Ta1 défaillant:

❖ *les courants injectés par le filtre :*

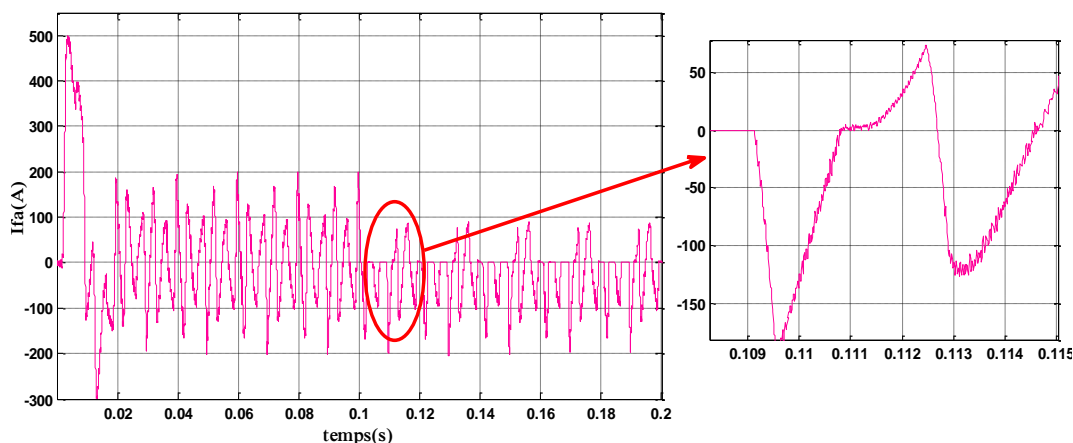


Figure IV.13 : courant Ifa de filtre

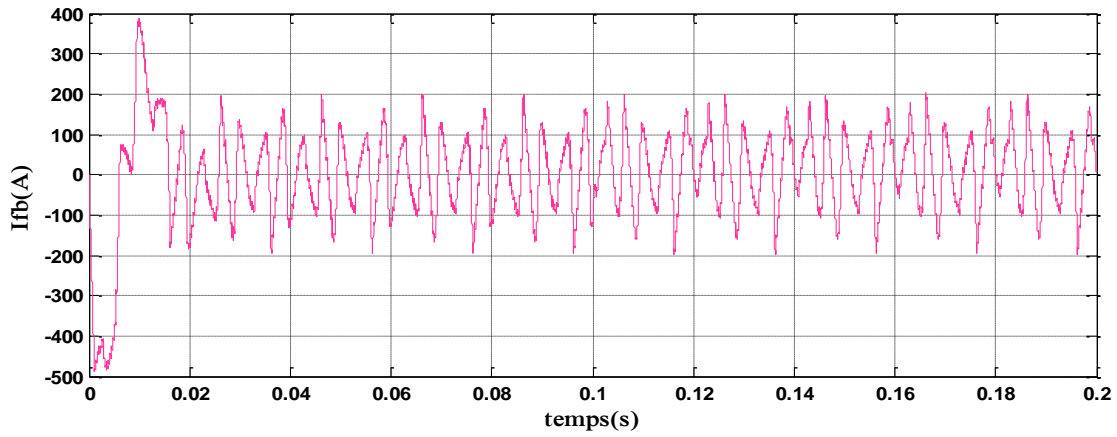


Figure IV.14 : courant Ifb de filtre

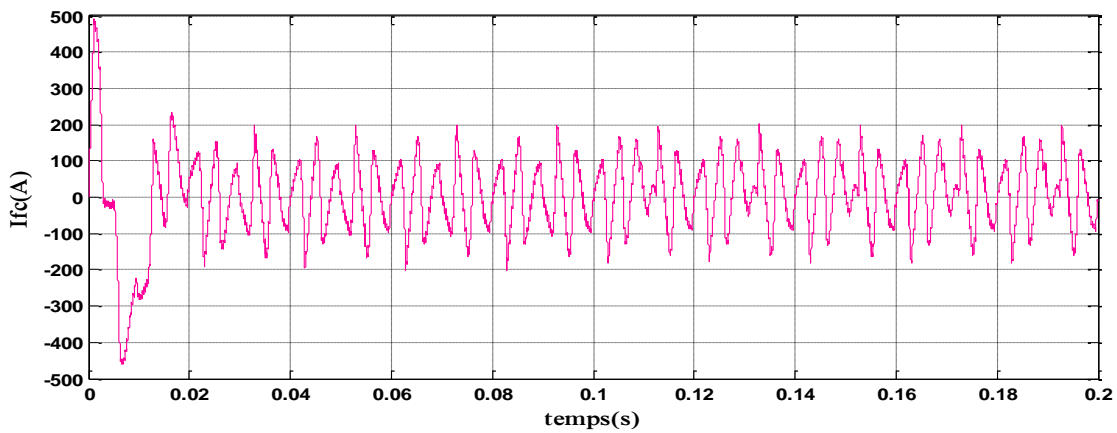


Figure IV.15 : courant Ifc de filtre

❖ *les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre :*

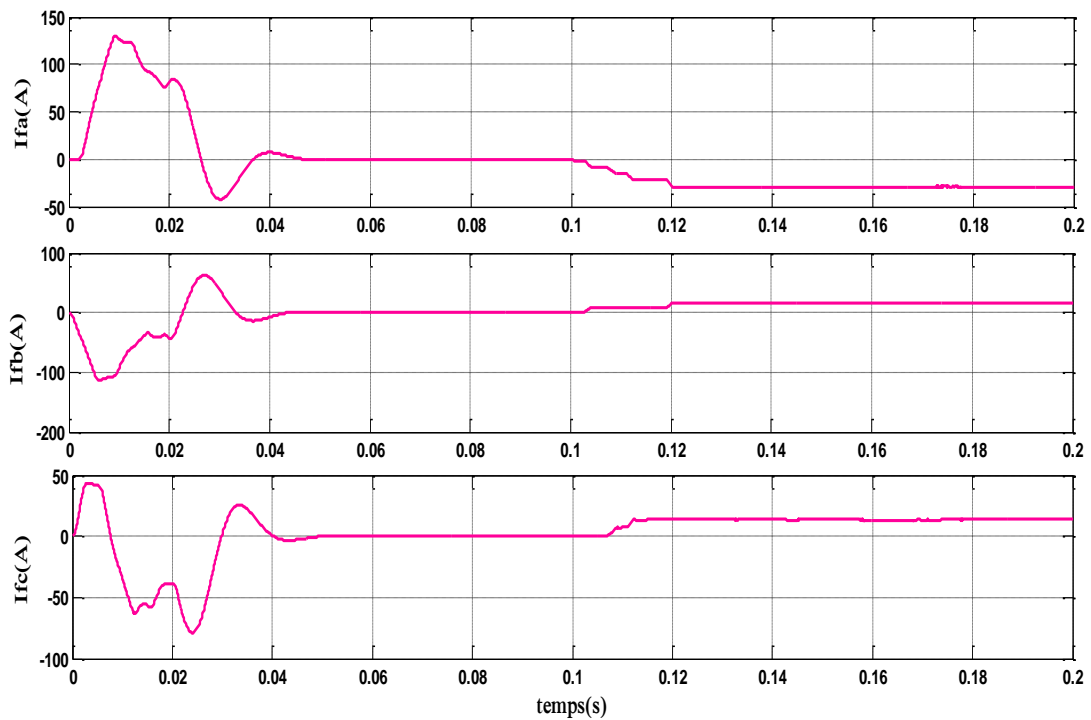


Figure IV.16 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc

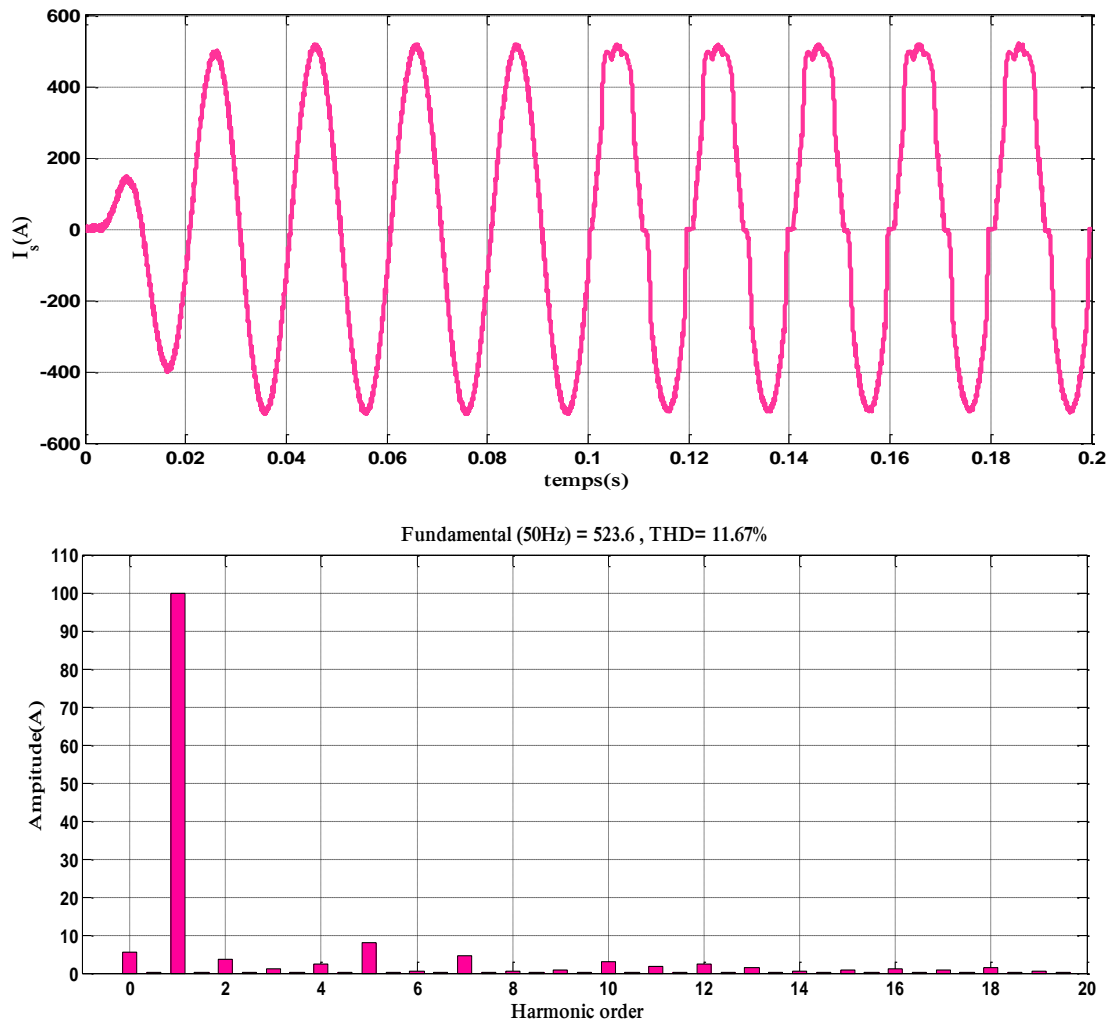


Figure IV.17 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique

✓ *Interprétation*

Contrairement à son courant de référence, on constate que le courant de la phase 1 du FAP perd une grande partie de la partie positive de sa forme d'onde (figure IV.13). Cela conduit les courants des phases 2 et 3 du FAP à perdre une partie des parties négatives de leurs formes d'ondes (figure IV.14, IV.15). Autrement dit, le courant de la phase 1 est négativement asymétrique, alors que les courants des phases 2 et 3 sont positivement asymétriques. Par conséquent, la valeur moyenne du courant de la phase 1 est négative et les valeurs moyenne des courants des phases 2 et 3 sont positives (figure IV.16).

Si Ta2 défaillant:

❖ les courants injectés par le filtre :

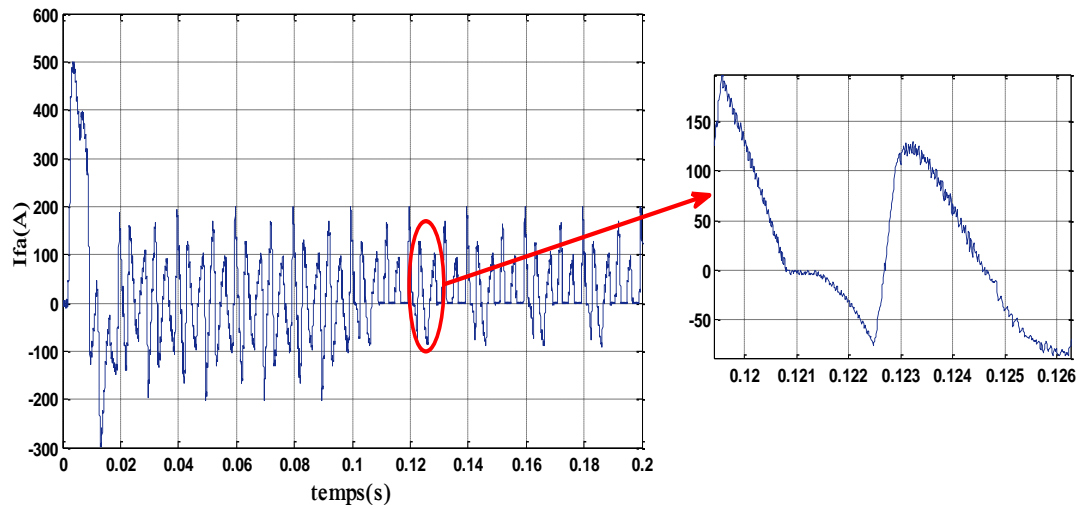


Figure IV.18 : courant I_{fa} de filtre

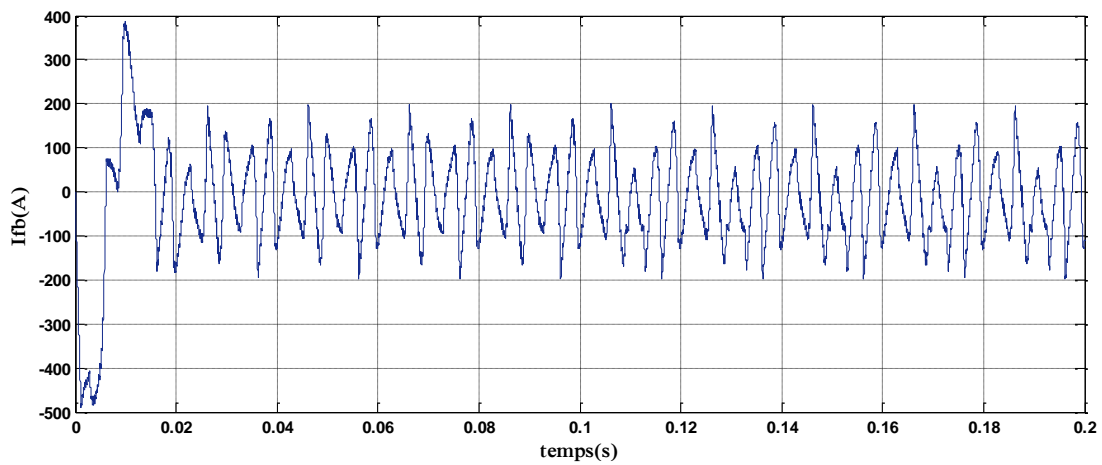


Figure IV.19 : courant I_{fb} de filtre

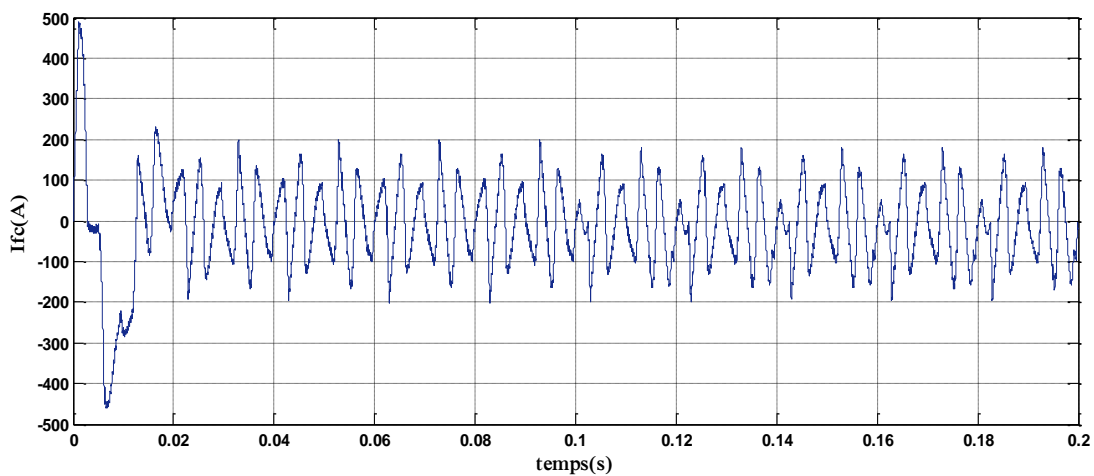


Figure IV.20 : courant I_{fc} de filtre

❖ les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre

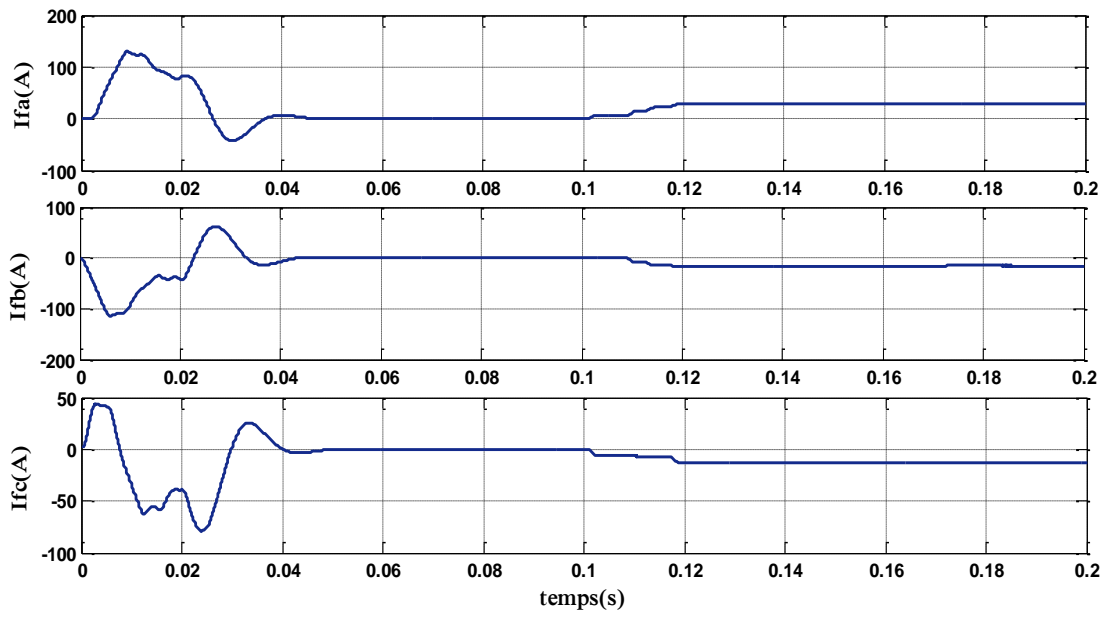
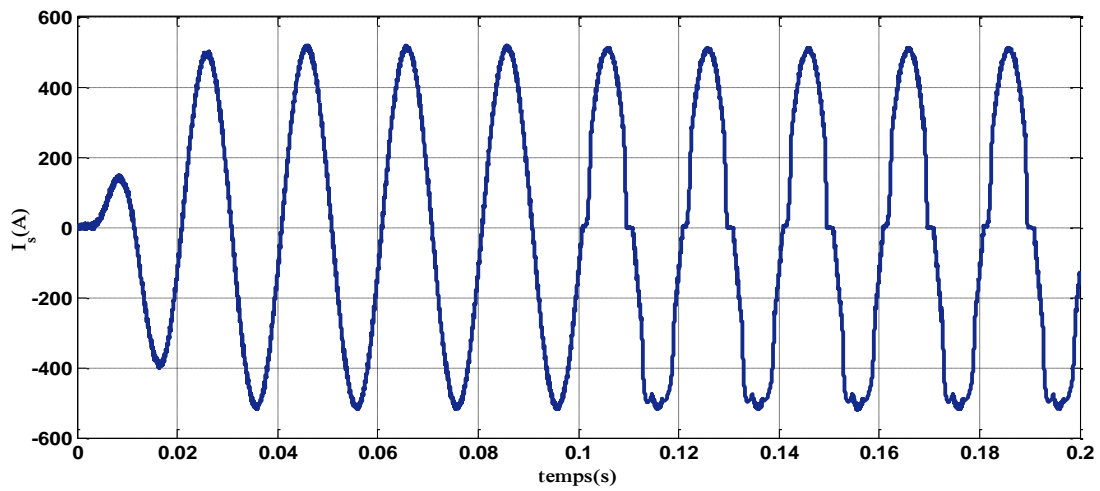


Figure IV.21 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre I_{fa} , I_{fb} , I_{fc}



Fundamental (50Hz) = 523.3 , THD= 11.92%

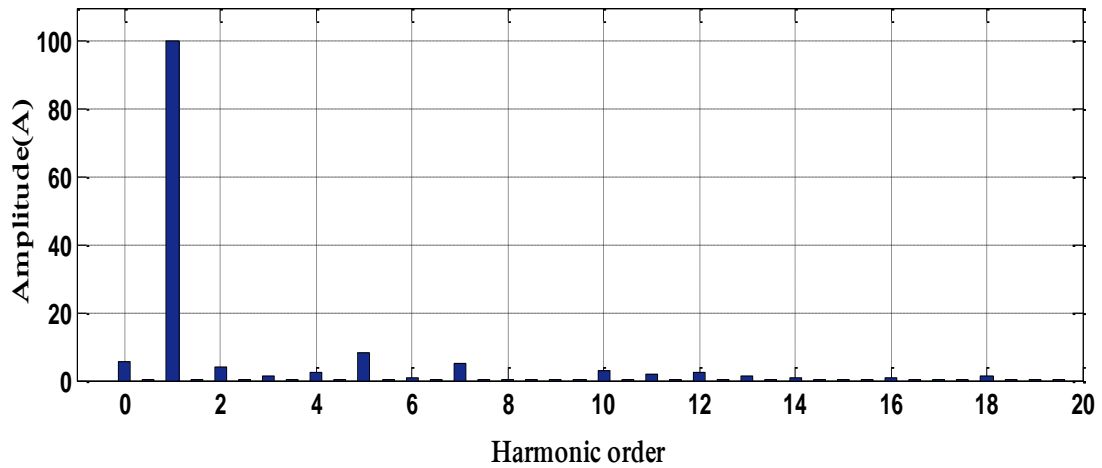


Figure IV.22 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique

✓ *Interprétation*

Contrairement à son courant de référence, on constate que le courant de la phase 1 du FAP perd une grande partie de la partie négative de sa forme d'onde (figure IV.18). Cela conduit les courants des phases 2 et 3 du FAP à perdre une partie des parties positives de leurs formes d'ondes (figure IV.19, 20). Autrement dit, le courant de la phase 1 est négativement asymétrique, alors que les courants des phases 2 et 3 sont positivement asymétriques. Par conséquent, la valeur moyenne du courant de la phase 1 est positives et les valeurs moyenne des courants des phases 2 et 3 sont négative (figure IV.21).

Si Tb1 défailant:

❖ *les courants injectés par le filtre :*

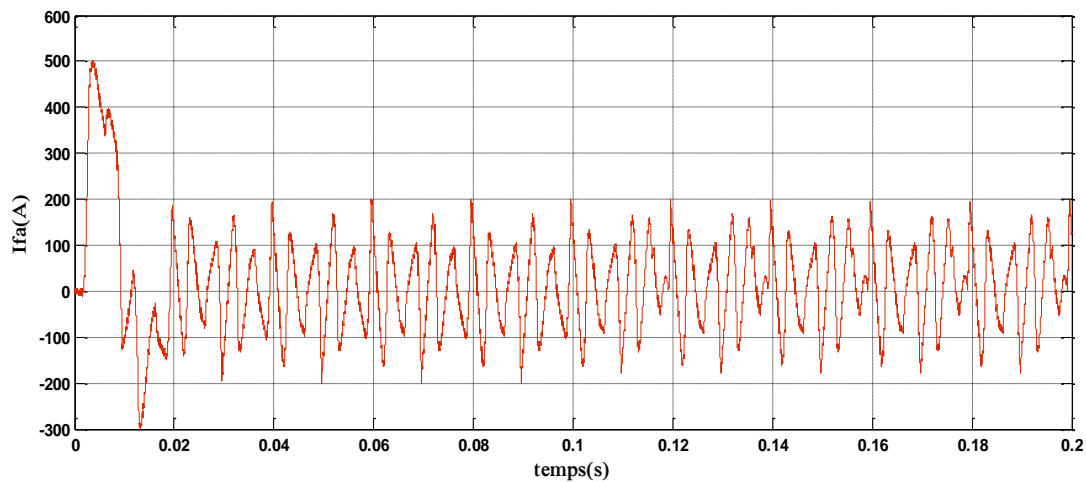


Figure IV.23 : courant Ifa de filtre

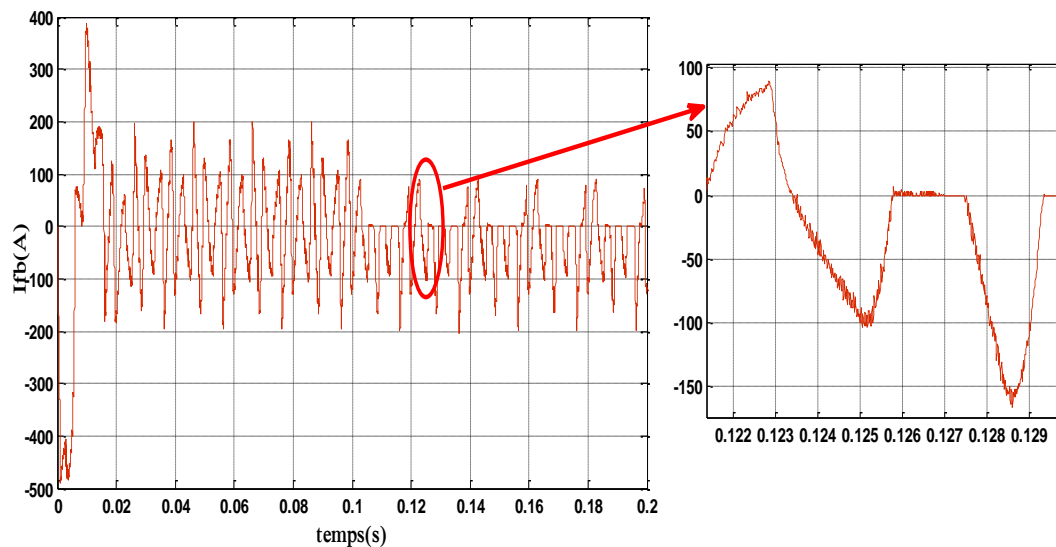


Figure IV.24 : courant Ifb de filtre

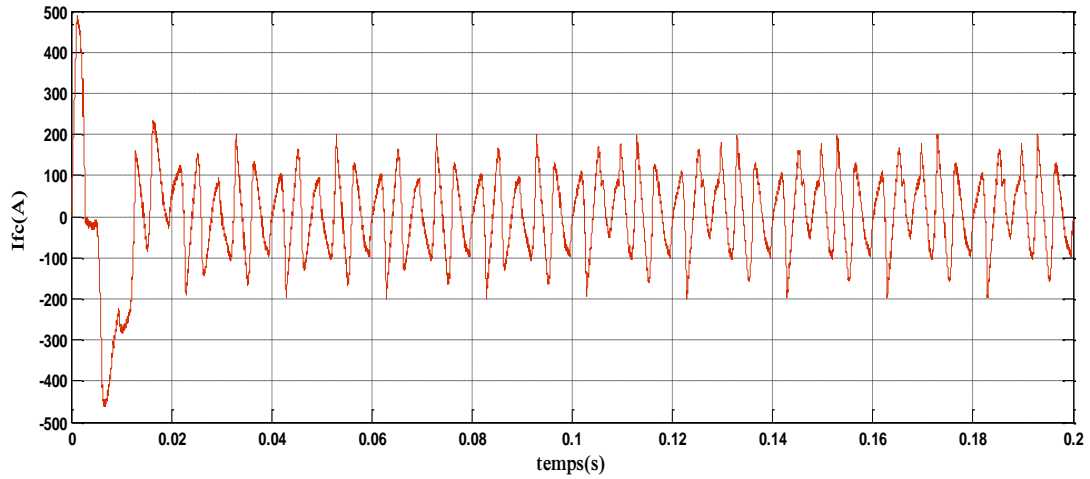


Figure IV.25 : courant Ifc de filtre

❖ *les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre :*

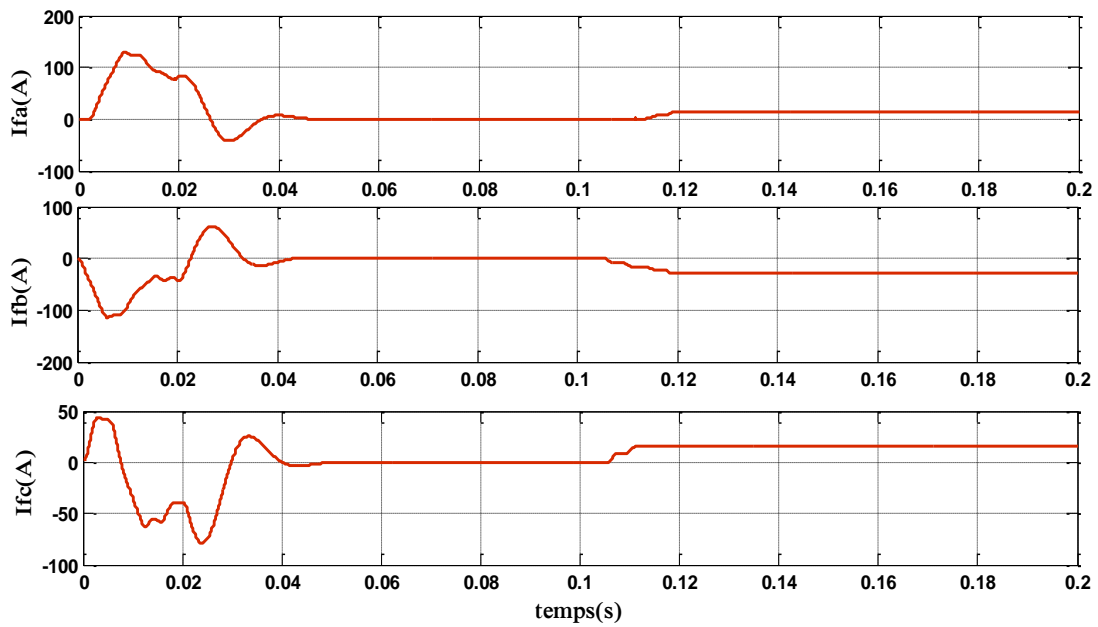
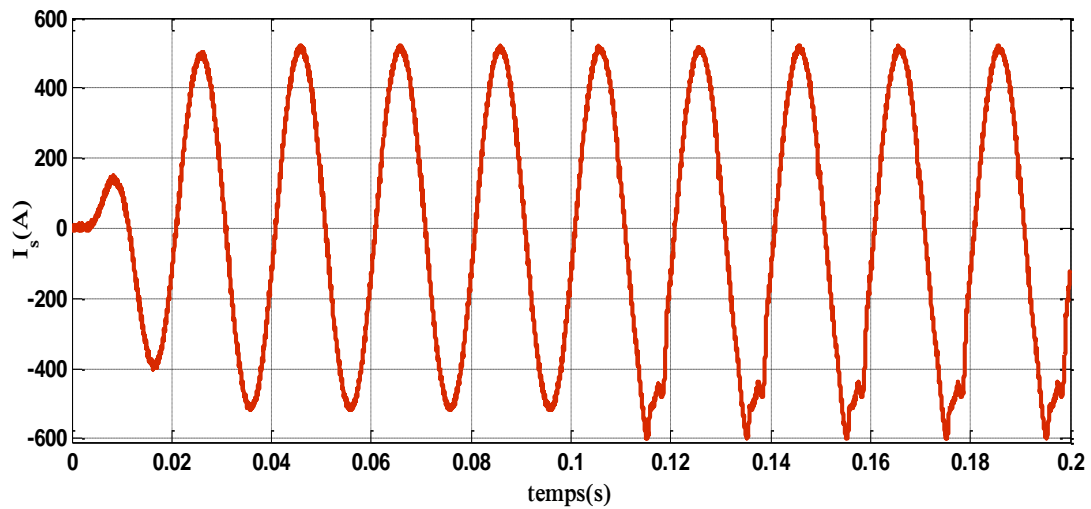


Figure IV.26 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc



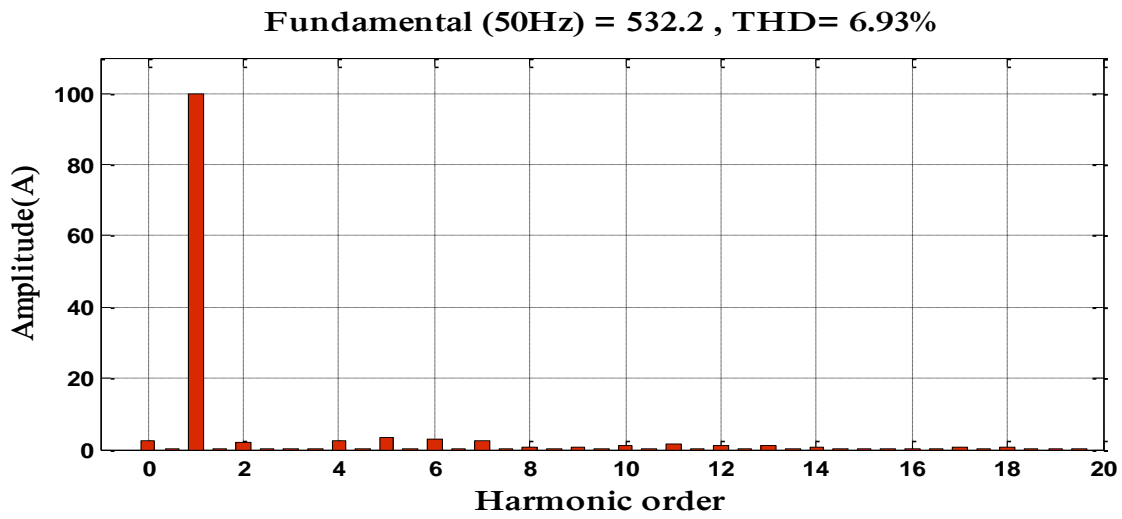


Figure IV.27 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique

Si Tb2 défaillant:

❖ les courants injectés par le filtre :

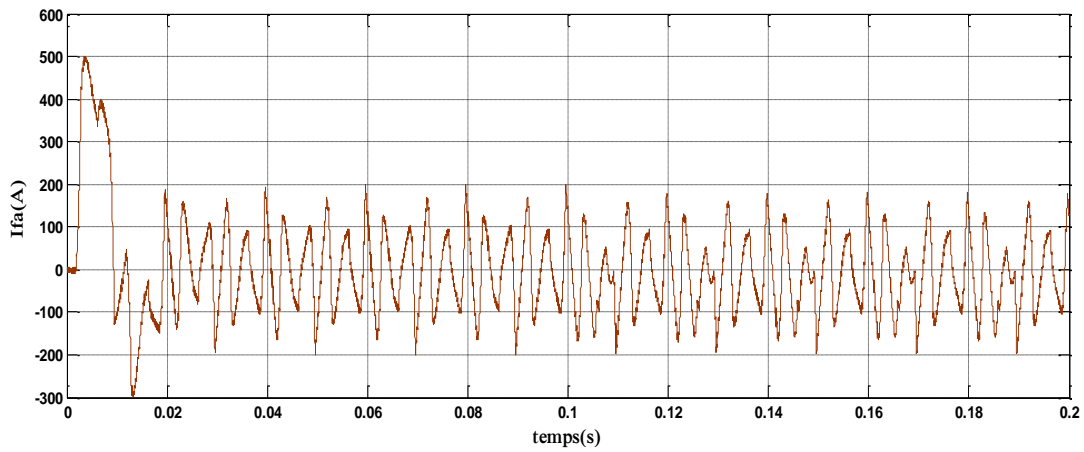


Figure IV.28 : courant I_{fa} de filtre

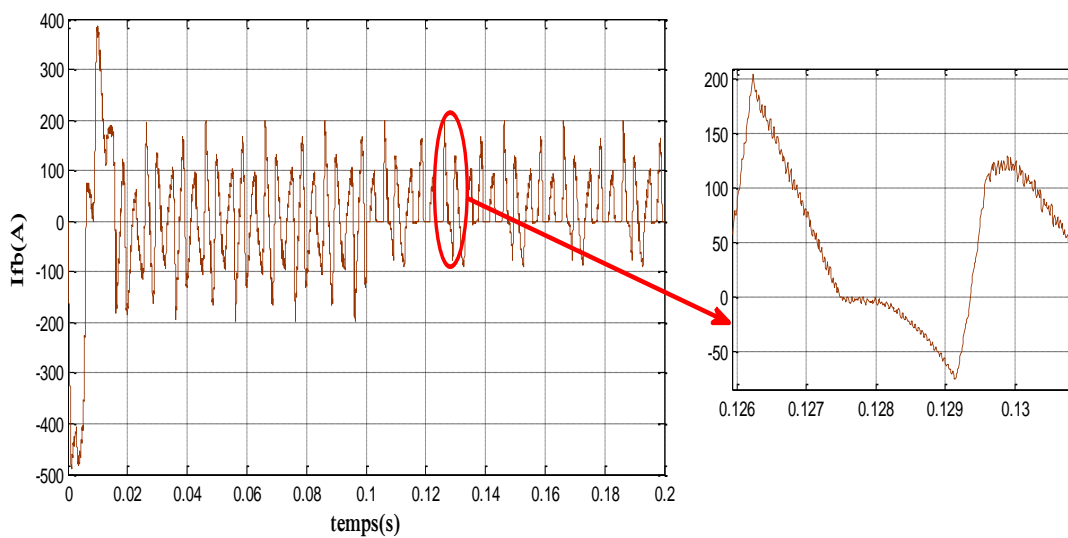


Figure IV.29 : courant I_{fb} de filtre

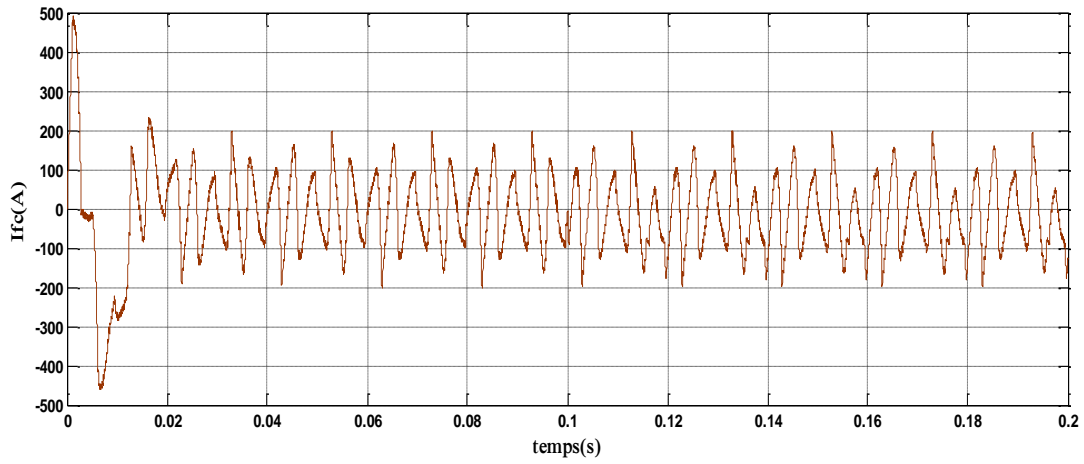


Figure IV.30 : courant I_{fc} de filtre

❖ les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre :

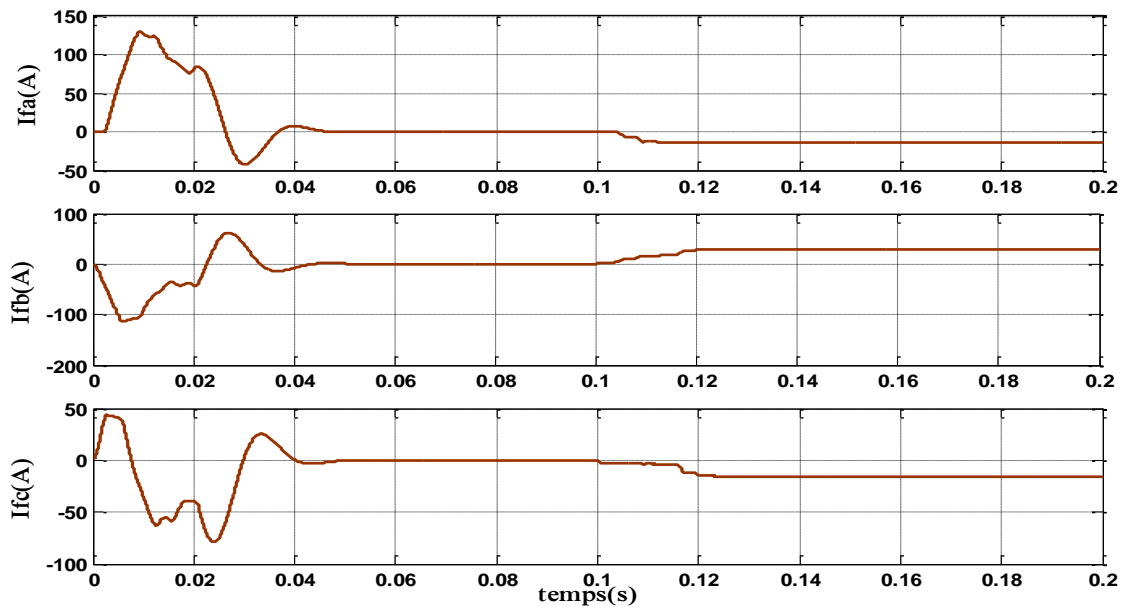
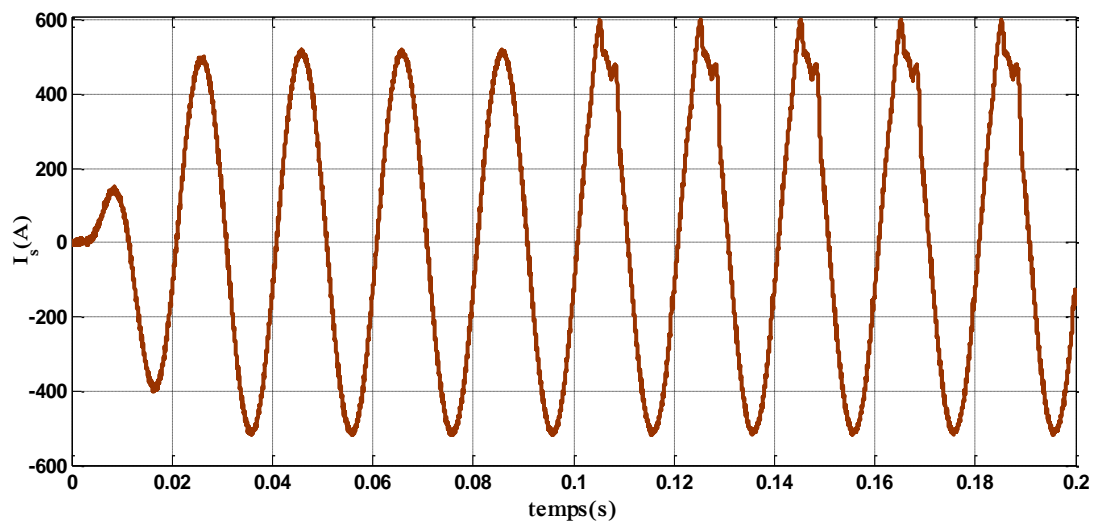


Figure IV.31 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre I_{fa} , I_{fb} , I_{fc}



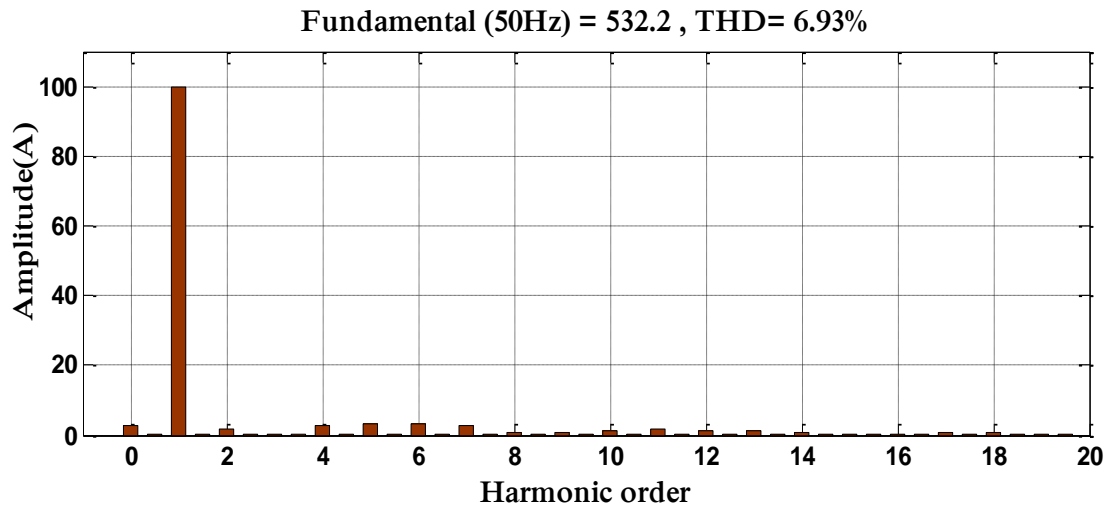


Figure IV.32 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique

Si Tc1 défaillant:

❖ *les courants injectés par le filtre :*

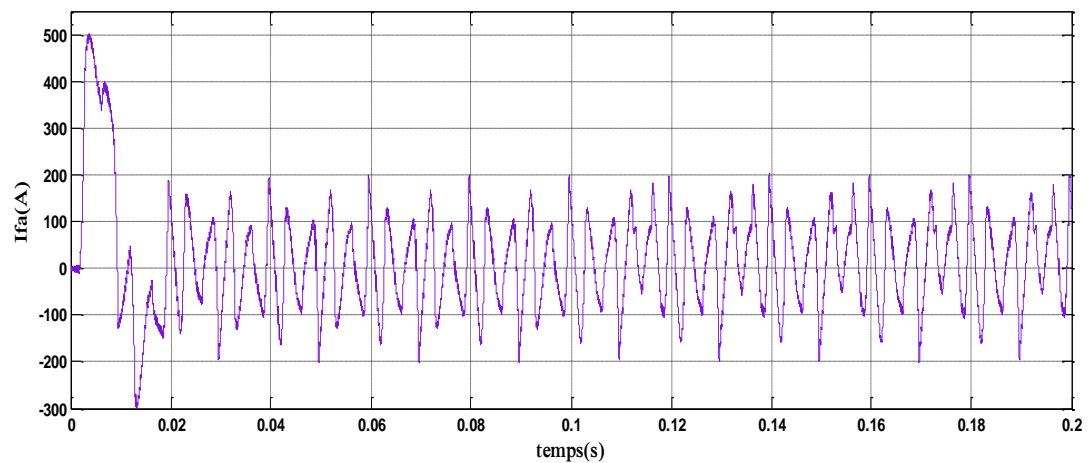


Figure IV.33 : courant Ifa de filtre

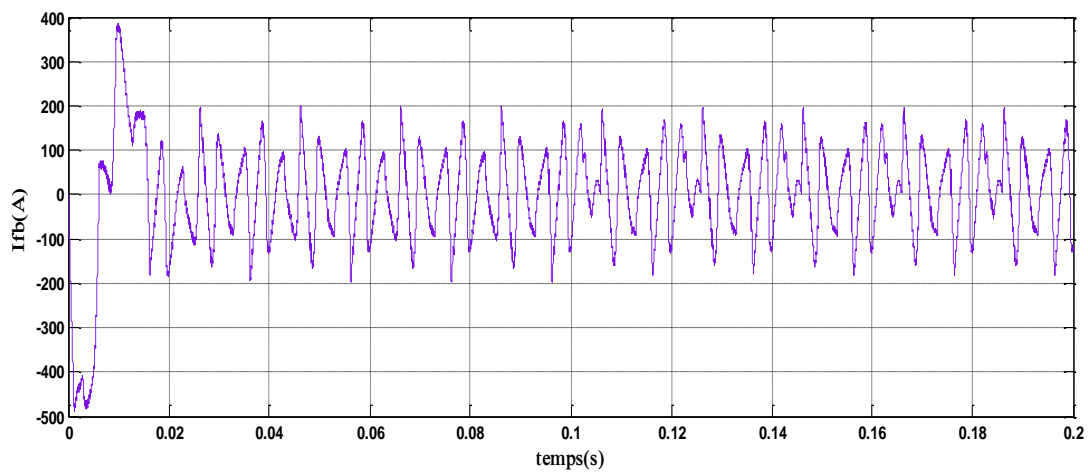


Figure IV.34 : courant Ifb de filtre

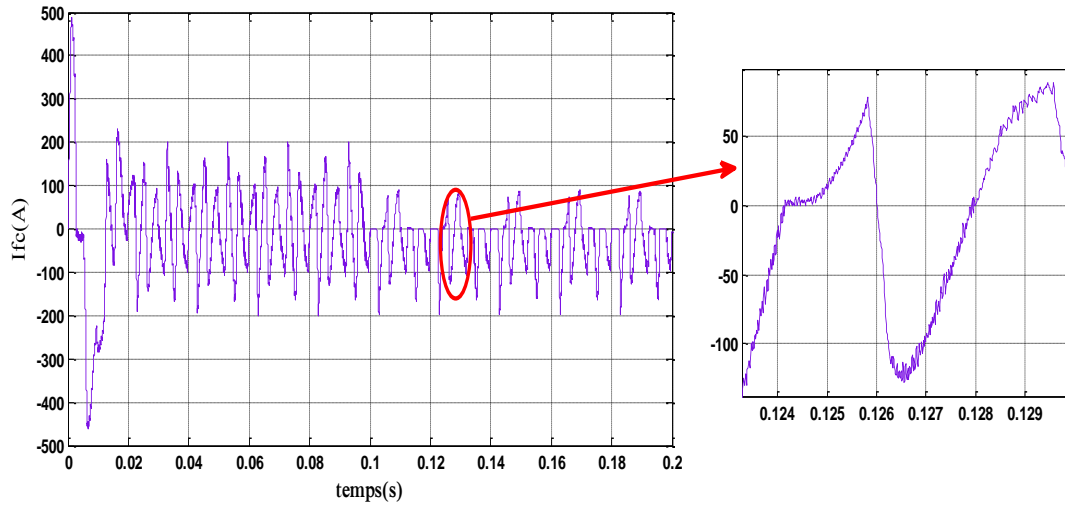


Figure IV.35 : courant Ifc de filtre

❖ *les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre :*

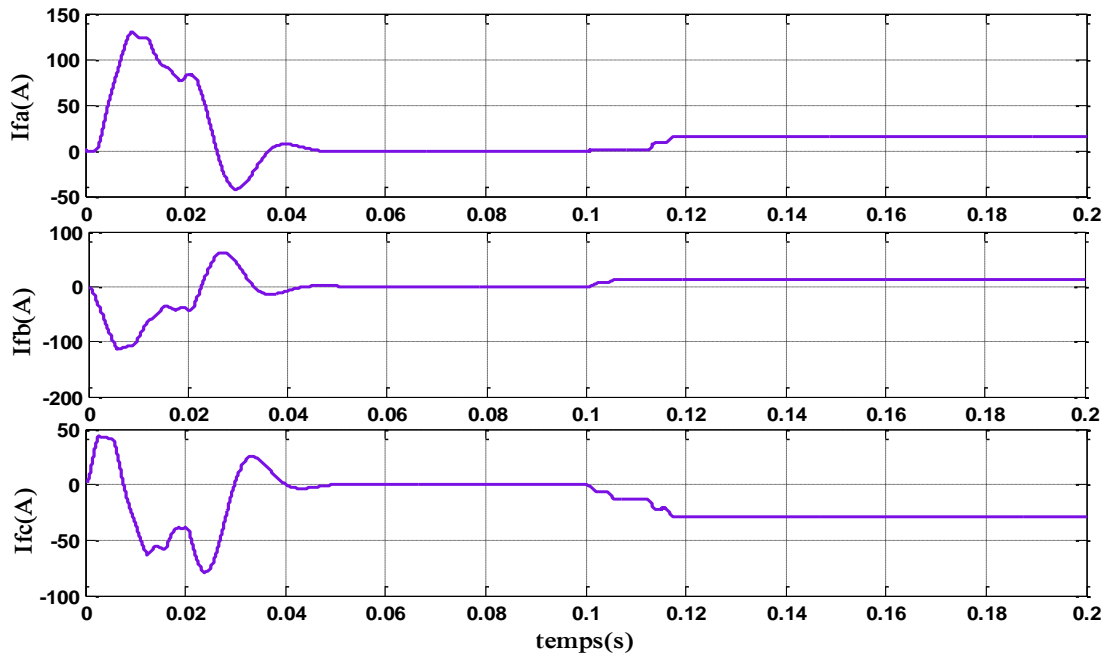
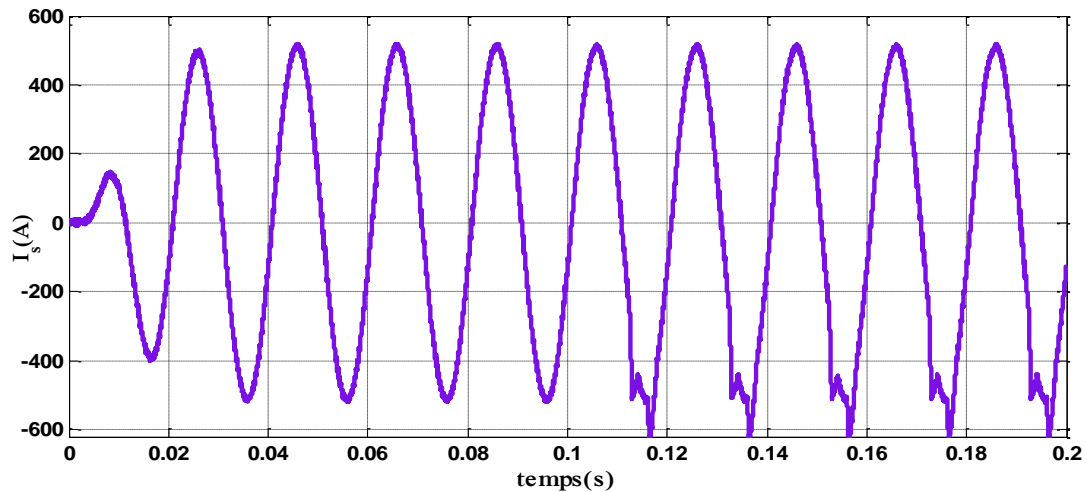


Figure IV.36 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc



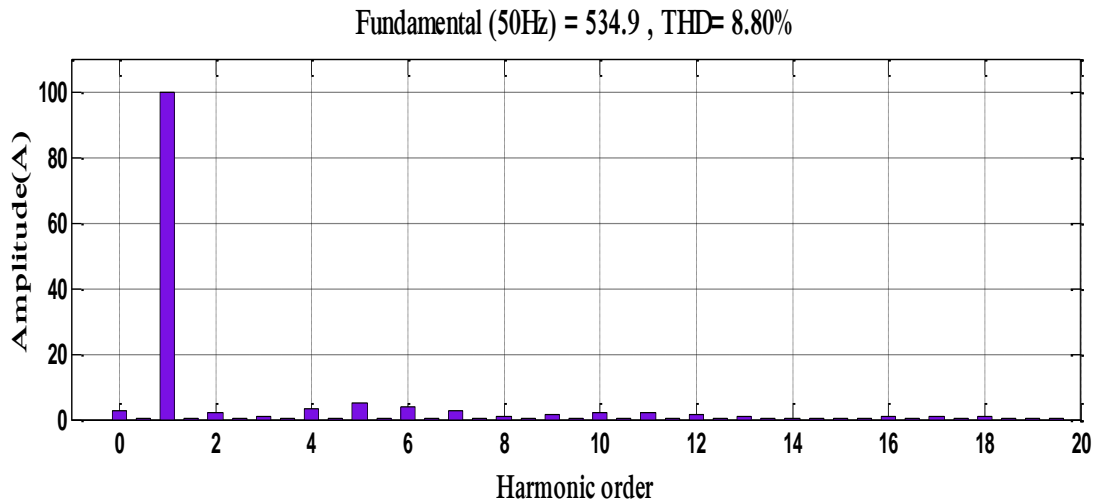


Figure IV.37 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique

Si Tc2 défaillant:

❖ *les courants injectés par le filtre :*

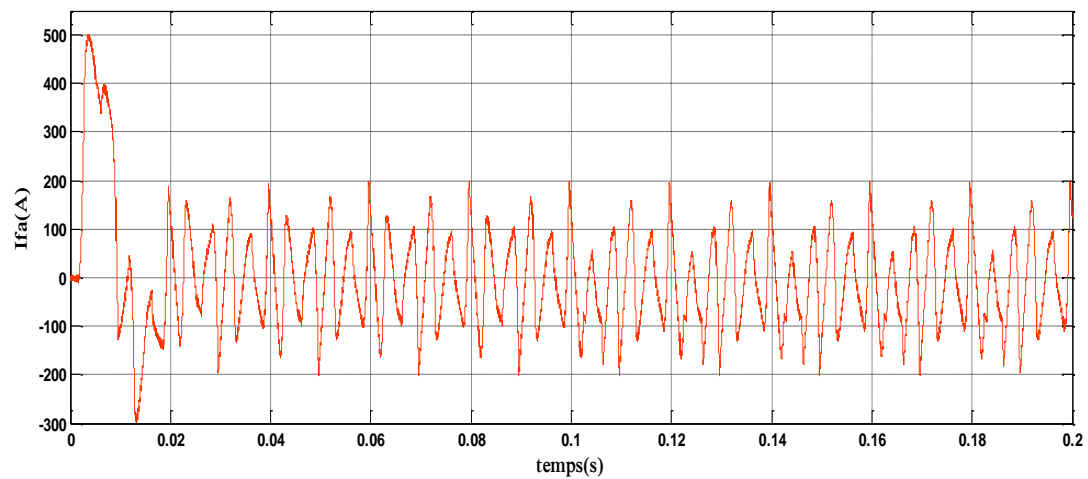


Figure IV.38 : courant I_{fa} de filtre

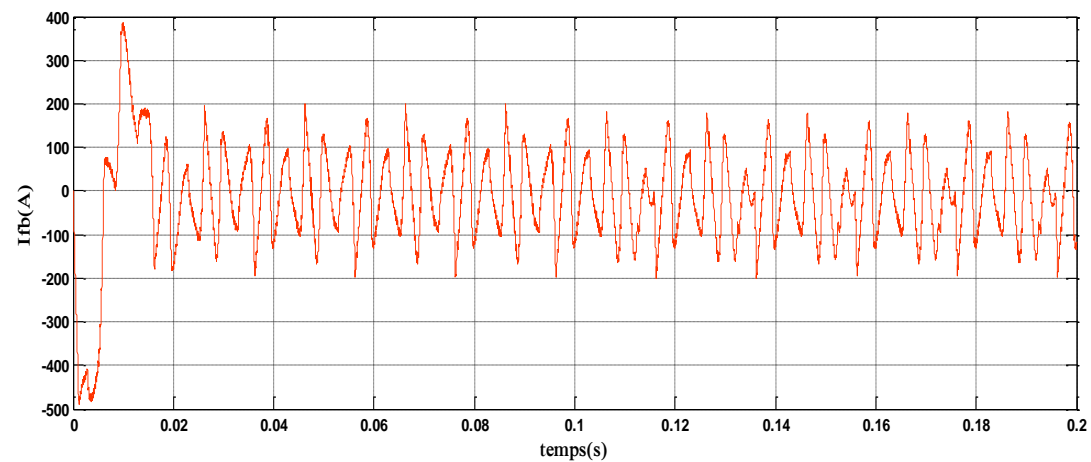


Figure IV.39 : courant I_{fb} de filtre

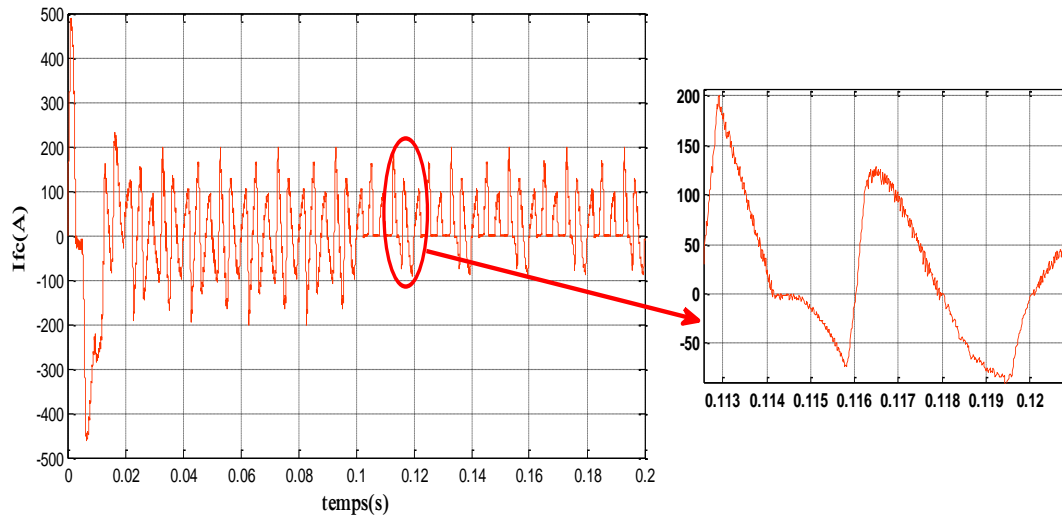


Figure IV.40 : courant Ifc de filtre

❖ les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre :

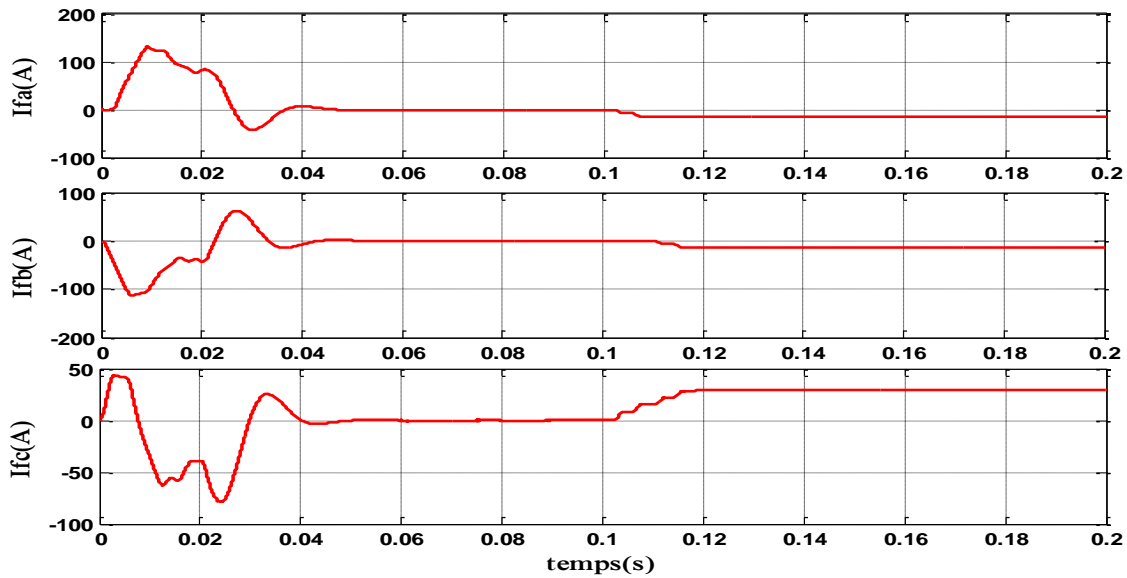
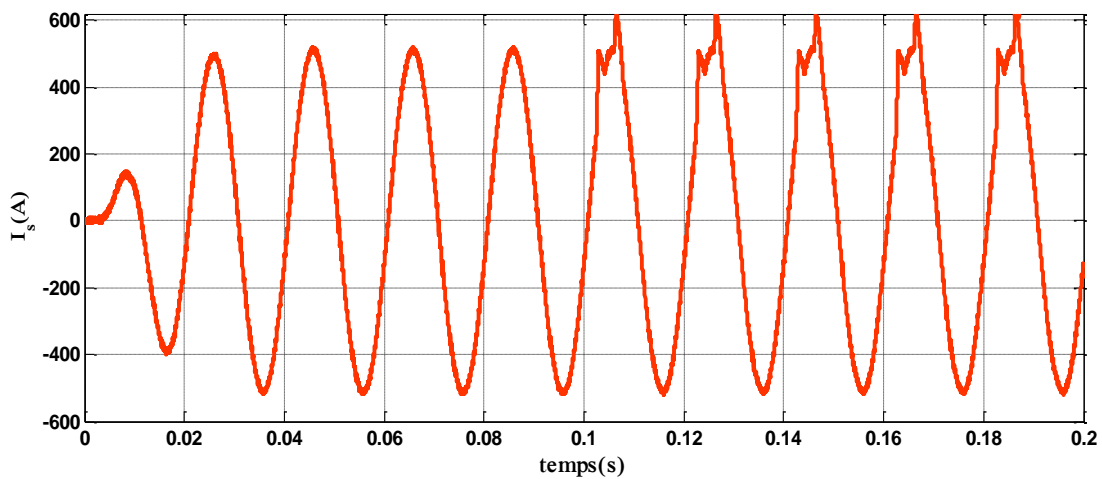


Figure IV.41 : les valeurs moyennes des courants injectés par le filtre Ifa, Ifb, Ifc



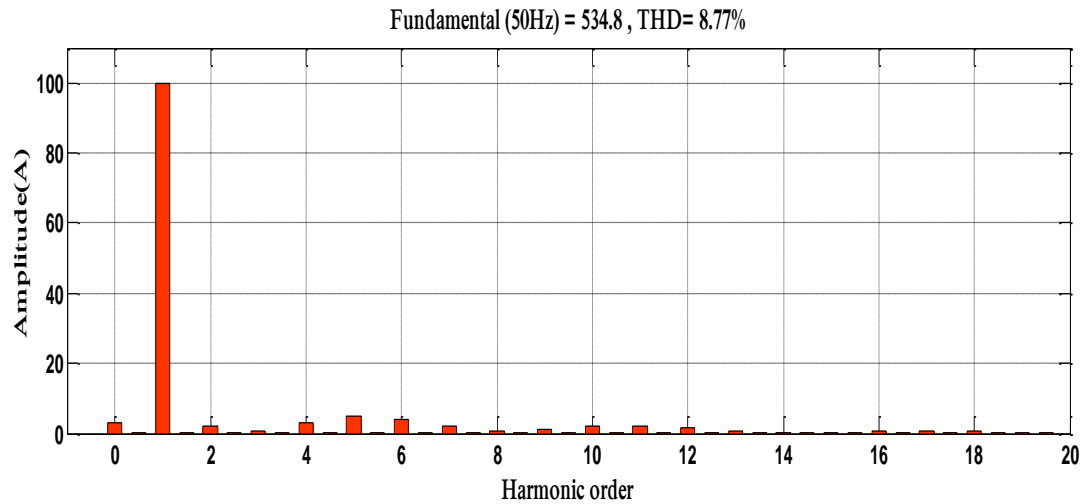


Figure IV.42 : Le courant de source après filtrage et son spectre harmonique

IV.2.4. Les résultats de simulation en état sain et en état défaillant

Suite à l'analyse précédente, on peut mettre les Caractéristiques des indicateurs (tableau (IV-1)) de défaut de type transistor maintenu ouvert pour un FAP à base d'onduleur de tension à 2 niveaux.

	<i>I_{fa}</i>	<i>I_{fb}</i>	<i>I_{fc}</i>
	<i>RMS</i>	<i>RMS</i>	<i>RMS</i>
<i>ETAT SAIN</i>	0	0	0
<i>Ta1</i>	-	+	+
<i>Ta2</i>	+	-	-
<i>Tb1</i>	+	-	+
<i>Tb2</i>	-	+	-
<i>Tc1</i>	+	+	-
<i>Tc2</i>	-	-	+

Tableau IV.2 : Les résultats de simulation en état sain et en état défaillant

Avec :

RMS : La valeur efficace du courant.

Ifa : Courant harmonique du filtre du bras a.

Ifb : Courant harmonique du filtre du bras b.

Ifc : Courant harmonique du filtre du bras c.

Ta1: transistor IGBT du bras a en haut.

Ta2: transistor IGBT du bras a en bas.

Tb1: transistor IGBT du bras b en haut.

Tb2: transistor IGBT du bras b en bas.

Tc1: transistor IGBT du bras c en haut.

Tc2: transistor IGBT du bras c en bas.

IV.3 Conclusion

L'étude effectuée dans ce chapitre a été, particulièrement, dédiée à la simulation de fonctionnement en mode sain et dégradé d'un FAP à base d'un onduleur à deux niveaux. Après une analyse détaillée d'évolution des différentes grandeurs électriques du FAP lors des différents défauts, les grandeurs indicatrices de défaut ont été bien choisies. Pour l'onduleur à deux niveaux, les valeurs moyennes des courants de phases du FAP peuvent être considérées comme indicateurs fiables de défaut.

Conclusion générale

La tâche la plus importante dans un système de diagnostic est le choix des variables indicateurs de défaut qui doivent être fiables pour les différentes conditions du système afin d'éviter toute confusion entre un défaut et autre. Dans cette mémoire une analyse est menée dans le but d'identifier ces variables indicateurs pour le diagnostic des défauts de transistor maintenu ouvert dans un FAP à base d'onduleur de tension à 2 niveaux.

L'étude, effectuée dans ce mémoire, du FAP en mode sain et en mode défaut de transistor maintenu ouvert de différentes localisations et pour une charge non-linéaire a montré que :

- Pour le FAP à base d'onduleur à deux niveaux, les valeurs moyennes des courants de phases du FAP peuvent être considérées comme des indicateurs fiables de défaut ;

Comme perspectives à ce travail, nous préconisons d'approfondir les points suivants :

- Etendre et adapter l'approche de diagnostic proposée au FAP autonome (FAP autoalimenté avec régulation de la tension du bus continu) ;

- Proposition de méthodes intelligentes, telle que la logique floue, pour la définition des seuils variables des différentes grandeurs caractéristiques, séparant le mode défaillant et le mode sain de fonctionnement du FAP, notamment pour les régimes transitoires lors des variations de charges ;

- Etendre et adapter l'approche de diagnostic proposée à d'autres types d'applications intégrant des convertisseurs statiques tels que les entraînements électriques, les redresseurs à MLI, les convertisseurs matriciels ;

- La réalisation expérimentale et le développement du système intégral de diagnostic automatique (par l'association des modules d'acquisition et de traitement et d'interprétation de l'information ;

- Intégrer l'algorithme de commande du FAP et l'algorithme de détection de défaut dans les composants FPGA ;

- Considération d'autres types de défauts tels que : le transistor maintenu fermé, capteur de tension défaillant, capteur de courant défaillant, et coupure de phase.

Bibliographie



Bibliographie

- [1] **A. M. S. Mendes, A. J. M. Cardoso**, « Fault diagnosis in a rectifier-inverter system used in variable speed AC drive, by the average current Park's vector approach », European Power Electronics Conference, Lausanne, Suisse, pp. 1-9, 1999.
- [2] **P. Gareth**, « Centroid fault detection method for three - phase inverter-fed induction motor », PhD Thesis, TULANE UNIVERSITY, New Orleans, USA, 2004.
- [3] **V. Didier, B. Gaidon**, « Les Onduleurs pour Systèmes Photovoltaïques Fonctionnement, Etat de l'Art et Etude des Performances », HESPUL, Aout, 2007.
- [4] **A. Boukharoura**, « Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé par l'Approche Bond Graph », mémoire de magister en électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2009.
- [5] **K. Merabet**, « Commande d'un onduleurs triphasés basée sur la dispersion de la tension Triphasée », mémoire présente à l'université du Québec à Trois-Rivières Comme Exigence Partielle de la maîtrise en génie électrique Maîtrise. Université du Québec, 2011.
- [6] **N. MESBAHI**, « Contribution à l'Etude des Performances des Onduleurs Multi-niveaux sur les Réseaux de Distribution » Thèse de Doctorat, Option Réseaux Electriques. Université Badji Mokhtar d'Annaba, 2014.
- [7] **g. seguier**, « Les formation de base et leurs principales application » 7eme édition, Electronique de puissance, Dunod, paris, 1999.
- [8] **F. Berrezzek**, « Etude des Différentes Techniques de Commande des Onduleurs à MLI Associés à une Machine Asynchrone », Mémoire Présenté en vue d'obtention du diplôme de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2006.
- [9] **H. Elferd, M. Zegaar**, « Fonctionnement en mode dégrade d'un onduleur multi niveaux application au filtre actif parallèle », Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique en électromécaniques, Université Mohamed Boudiaf -M'sila, 2017.
- [10] **R. Besson**, « Technologie des composants électroniques »Radio, 6ème édition. Tome 1, 1990.
- [11] **L. Pauling**, « Chimie générale », Dunod. Paris, 1951.
- [12] **Rifa**, « Capacitors. Data sheets », pp.80-85, 1988.
- [13] **P. Baudesson, F. Richardeau, T. Meynard**, « Caractérisation du convertisseur multicellulaire série en présence de défauts de commutation », Congrès Electronique de Puissance du Futur, pp. 129-134, 16-18 décembre 1998.

-
- [14] **T. Benslimane**, « Caractérisation Précise des Défaits d'un Variateur de Vitesse en Vue d'Elaborer un Système Automatique de Surveillance et de Diagnostic », Thèse de doctorat, Université de Boumerdès, 2009.
- [15] **W. T. Thomson**, « A review of on-line condition monitoring techniques for three-phase squirrel-cage induction motors: Past, present and future », Proc. IEEE– Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Espagne pp.3-18, Septembre 1999.
- [16] **A. Nemiri**, « Détection et Diagnostic de Défaits d'un Onduleur », mémoire de master, Université Badji Mokhtar d'Annaba, 2017.
- [17] **N. S. Boukhalfa**, « synthèse d'observateur non linéaires : application au diagnostic de défaut », mémoire magister, université mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.
- [18] **I. Benlaloui**, « commande, observation et diagnostic d'un système non-linéaire : application à la machine asynchrone en présence de défauts », Université de Batna 2 faculté de technologie département d'électrotechnique, 2016.
- [19] **G. Didier**, « modélisation et diagnostic de la machine asynchrone en présence de défaillances », These de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-I, 2004
- [20] **Kh. Bedoud**, « Modélisation et diagnostic de défaillance d'une électrovanne pneumatique », mémoire de magister, Université de Badji Mokhtar, 2010.
- [21] **Dj. Nekkar**, « Contribution à l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option de Commande des Machines Electrique. Université Mohamed Chérif Messaadia de SOUK-AHRAS, 2013-2014.
- [22] **R. Chebabhi, M. Boudraf**, « Modélisation et commande des différentes topologies des filtres actifs parallèles », Université de M'SILA.
- [23] **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 Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Décembre 1998.
- [24] **S.H. Shahalami**, « Filtrage hybride des perturbations harmoniques produites par des systèmes d'entraînement asynchrone à vitesse variable », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, Novembre 2001.
- [25] **T. Ghennam**, « Etude et réalisation d'un compensateur actif de puissance commandé par DSP », thèse de magister. Ecole militaire polytechnique, 2004.
- [26] **K. M. Racim, B. Karim**, « Paramètres de la qualité de la tension d'un réseau électrique etude et analyse, » Mémoire d'ingénieur, Ecole nationale Polytechnique, Alger 2008.
- [27] **F. Mekri**, « Etude et commande d'un filtre actif parallèle à structure de tension », Mémoire de Magister, Université d'Oran, Octobre 2001.

-
- [28] **M. Kamil, S. Nouiri**, « Commandes non linéaires d'un filtre actif parallèle », Mémoire d'Ingéniorat, Université de M'sila, 2010.
- [29] **T. Gouraud**, « Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes, Janvier 1997.
- [30] **Dj. O. 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-Mulhouse, 2005.
- [31] **B. Ketem, N. Mehenni**, « Application des onduleurs multi niveaux au filtrage actif des réseaux ». Mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique de l'USTHB, 2005.
- [32] **M. A. Alali**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension ». Thèse de doctorat, université de Louis Pasteur, Strasbourg I, Septembre 2002.
- [33] **A. Chaoui**, « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [34] **A. Bouafia**, « Techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs à MLI », Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas – Sétif, Octobre 2010.
- [35] **B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra**, « A review of active filters for power quality improvement », IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 46, no. 5, pp. 960–971, October 1999.
- [36] **S. Srianthumrong and H. Akagi**, «A medium-voltage transformerless AC/DC power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter », Industry Applications Conference, IEEE Tran, vol. 39, no. 3, pp. 874– 882, 2002.
- [37] **S. A. tadjer**, « Etude d'un système de compensation d'harmonique en utilisant un générateur photovoltaïque "GPV" », thèse de Magister en Génie Electrique, Option de équipements Electriques Industriels. Université de M'hamed Bouguarra, BOUMERDES, 2008.
- [38] **F. krim, S. Kerrouche**, « Three-phase active power filter based on fuzzy logic », International Journal of Sciences and Techniques, Vol. 3, No.1, pp. 942-955, July 2009.
- [39] **D. Lalili**, « MLI vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multiniveaux : application à la conduite de la machine asynchrone », *Thèse de Doctorat*, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique ENSP Alger, Avril 2009.
- [40] **H. Buhler**, « Convertisseurs statiques », Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne ,1991.
- [41] **H. Djeghloud**, « Filtrage actif de puissance », Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, Décembre 2007.
-

- [42] **H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae**, « Generalized theory of the instantaneous active power in three-phase circuits », in Proc. International Power Electronics Conference, pp. 1375–1386, Tokyo, Japan, 1983.
- [43] **J. Xu**, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Lorraine, Janvier 1994.
- [44] **M. M. Abdusalam**, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », *Thèse de Doctorat*, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME MASTER EN GENIE ELECTRIQUES**

SPECIALITE : RESAUX ELECTRIQUES

Proposé et dirigé par : Dr. BENYETTOU Lotfi

Présenté par : DEMBRI Hadjira

Thème :

***Performance des méthodes de diagnostic des défauts
de circuit ouvert d'un filtre actif parallèle***

Résumé :

Le but du travail, proposé dans ce cadre, est la définition d'indicateurs de défaut qui permettent d'identifier le défaut et le localiser dans un convertisseur statique de tension DC-AC (onduleur de tension à 2 niveaux) intégré dans un filtre actif parallèle pour des charge non-linéaires variables. Finalement, un système de diagnostic est conçu, en se basant sur l'analyse de l'évolution des différents indicateurs de défaut pour chaque défaut.

Mots Clés :

Filtre actif parallèle, onduleur 2 niveaux, transistor ouvert, défaut, valeurs moyennes, diagnostic

N° d'ordre : RS _07