

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LARECHERCHES CIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

N°:...../INST/ 2020



DOMAINE:SCIENCES ET TECHNOLOGIE

FILIERE:ÉLECTRONIQUE

OPTION:INSTRUMENTATION

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

Par: BISSAR Mourad

Intitulé

**Commande tolérante aux défauts d'un onduleur
dans le filtrage actif**

Soutenu devant le jury composé de:

.....

Dr. Mostefa TABBAKH

.....

Université M'sila

Université M'sila

Université M'sila

Président

Rapporteur

Examineur

Année universitaire: 2019/2020

Dédicace

A mes très chers parents, source de vie, d'amour et d'affection

A mes chers frères e leurs enfants, source de joie et de bonheur

A toute ma famille, source d'espoir et de motivation

A tous mes amis

A vous chers lecteurs

BISSAR Mourad

Remerciements

Notre profonde gratitude et remerciements à notre promoteur :

Dr Mostafa TABBAKH, pour la confiance qu'il a placée en nous en nous proposant ce sujet, pour son aide et précieux conseils, dont il nous a fait part et de ses expériences qui nous ont permis de mener ce projet de fin d'études.

Nous exprimons notre sincère reconnaissance, à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation,

Nous tenons à remercier Messieurs les membres du jury, pour avoir accepté d'examiner notre travail,

Nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la contribution de notre travail.

Résumé

Dans un réseau électrique, les harmoniques, les déséquilibres de courant et de tension, et les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Dans cette mémoire, nous avons abordé les structures de filtre actif en vue d'étudier la compensation de tous les types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique. Les défaillances d'un convertisseur, qu'elles proviennent d'un des composants de puissance commandables, conduisent à la perte du contrôle des courants de phase. Ces défaillances peuvent provoquer de graves dysfonctionnements du système, voire conduire à sa mise hors tension. Par conséquent, afin d'empêcher la propagation de défauts aux autres composants et assurer la continuité de service en présence de défaut, des méthodes efficaces et rapides de détection et de compensation de défauts doivent être mises en œuvre. Dans ces travaux de thèse nous avons étudié un convertisseur triphasé à structure tension "fault tolerant". Ce convertisseur assure la continuité de service, en mode normal, en présence de défauts éventuels d'un semi-conducteur. Nous avons choisi comme cas d'application le filtre (UPQC) afin de valider la continuité de service du convertisseur "fault tolerant" lors de défauts. Nous avons proposé une nouvelle méthode basée sur le RNA, permettant de détecter, d'identifier automatiquement le défaut, et de le compenser après changement de l'architecture. La méthode proposée détecte l'apparition du défaut concerné et identifie le composant défectueux. Ensuite, les modules de compensation modifient la structure du convertisseur. L'efficacité de cette méthode réside dans le choix des caractéristiques pour l'apprentissage. Les résultats expérimentaux montrent les performances et efficacités du convertisseur "fault tolerant" proposé.

Abstract

In an electrical network, harmonics, current and voltage imbalances, and voltage dips have adverse effects on electrical equipment. In this thesis, we have discussed active filter structures in order to study the compensation of all types of disturbances likely to appear in the electrical network. Failures of a converter, whether from one of the controllable power components, lead to the loss of control of the phase currents. These failures can cause serious malfunctions of the system, or even lead to its shutdown. Therefore, in order to prevent the propagation of faults to other components and to ensure continuity of service in the presence of faults, efficient and rapid methods of fault detection and compensation must be

implemented. In these thesis works we studied a three-phase converter with a "fault tolerant" voltage structure. This converter ensures continuity of service, in normal mode, in the presence of any faults in a semiconductor. We have chosen the filter (UPQC) as an application case in order to validate the continuity of service of the " " converter during faults. We have proposed a new method based on the RNA, allowing to detect, to identify automatically the defect, and to compensate for it after change of the architecture. The proposed method detects the appearance of the fault concerned and identifies the faulty component. Then, the compensation modules modify the structure of the converter. The effectiveness of this method lies in the choice of characteristics for training. The experimental results show the performances and efficiencies of the proposed "fault tolerant" converter.

ملخص

في الشبكة الكهربائية ، يكون للتوافقيات ، واختلال التيار والجهد ، وانخفاضات الجهد تأثيرات سلبية على المعدات الكهربائية. في هذه الأطروحة ، ناقشنا هياكل المرشح المدمجة (UPQC) من أجل دراسة تعويض جميع أنواع الاضطرابات التي يحتمل أن تظهر في الشبكة الكهربائية. يؤدي فشل المحول ، سواء من أحد مكونات الطاقة التي يمكن التحكم فيها ، إلى فقدان التحكم في تيارات الطور. يمكن أن تتسبب هذه الإخفاقات في حدوث أعطال خطيرة في النظام ، أو حتى تؤدي إلى إيقاف تشغيله. لذلك ، من أجل منع انتشار الأعطال إلى المكونات الأخرى ولضمان استمرارية الخدمة في ظل وجود الأعطال ، يجب تنفيذ طرق فعالة وسريعة للكشف عن الأعطال والتعويض عنها. في هذه الأطروحة درسنا محول ثلاثي الأطوار بهيكل جهد كهربائي "متسامح مع الخطأ". يضمن هذا المحول استمرارية الخدمة ، في الوضع العادي ، في حالة وجود أي أعطال في أشباه الموصلات. في هذا العمل ، اخترنا المرشح (UPQC) كحالة تطبيق للتحقق من استمرارية خدمة المحول "المتسامح مع الخطأ" أثناء الأعطال. لقد اقترحنا طريقة جديدة تعتمد على شبكة الأعصاب الدماغية (RNA) تسمح بالكشف عن العيب وتحديد تلقائياً والتعويض عنه بعد تغيير البنية. الطريقة المقترحة تكشف عن ظهور الخطأ المعني وتحدد المكون الخاطئ. بعد ذلك ، تقوم وحدات التعويض بتعديل بنية المحول. تكمن فعالية هذه الطريقة في اختيار خصائص التعويض وتظهر النتائج التجريبية أداء وكفاءة محول "تحمل الخطأ" المقترح

TABLE DES MATIERES

Abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

INTRODUCTION GENERALE..... 1

CHAPITRE I : LES PERTURBATIONS HARMONIQUES DANS LES RESEAUX ELECTRIQUES

I.1.INTRODUCTION	3
I.2. LES PERTURBATIONS ELECTRIQUES	3
I.2.1. Creux et coupure de tension	4
I.2.2. Les Surtensions	5
I.2.3. Variation des fréquences	6
I. 2.4. Fluctuations de tension	7
I.2.5. Harmoniques et inter-harmoniques	8
I.2.5.1. Harmoniques	8
I.2.5.2. Inter-harmoniques	8
I.2.6. Déséquilibres de tension	9
I.3. CARACTERISTIQUE DE LA POLLUTION HARMONIQUE	10
I.3.1. Le taux harmonique de rang h	10
I.3.2. Le taux global de distorsion harmonique.....	10
I.3.3. Les Normes Imposées Sur Le THD	10
I.3.4. Facteur de puissance	11
I.4 LES SOLUTIONS DE DEPOLLUTION DES RESEAUX ELECTRIQUES.....	12
I.4.1. Les solutions traditionnelles de dépollution.....	12
I.4.1.1. Les Filters passifs.....	12
I.4.1.2. Principe des filtres passifs	12
I.4.2. Les solutions modernes de dépollution.....	13
I.4.2.1. Le filtre actif série (F.A.S)	14
I.4.2.2. Le filtre parallèle (F.A.P)	15
I.4.2.3. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)	15
I.4.2.4. La combinaison hybride actif et passive	16
I.5. CONCLUSION.....	17

CHAPITRE II : TOPOLOGIES ET STRATEGIES DE COMMANDE DES FILTRES ACTIFS PARALLELES

II.1. INTRODUCTION	18
II.2. LE FILTRE ACTIF PARALLELE	18
II.2.1. Topologies de FAP à structure tension reliés à un réseau électrique à trois fil.....	20
II.2.2. circuit de puissance	20
II.2.3. Circuit de commande	21
II.2.4. Dimensionnement des condensateurs	21
II.2.5. Dimensionnement du filtre de sortie	22
II.3. ALGORITHMES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES ET TECHNIQUE DE COMMANDE DE REGULATION DES FILTRES ACTIFS.....	23
II.3.1. Domaine fréquentiel.....	23
II.3.2. Domaine temporel.....	23

II.3.2.1. Théorie de la puissance instantanée réactive.....	24
II.3.2.1.1. Cas d'un filtre actif parallèle	26
II.3.2.2. Algorithme du référentiel synchrone	27
II.4. TECHNIQUES DE COMMANDE.....	29
II.4.1. MLI à Bande d'hystérésis	29
II.4.2. Technique de la commande vectorielle d'un onduleur de tension deux Niveaux	30
II.4.2.1. Modélisation de l'onduleur.....	30
II.4.2.2. Application de la commande vectorielle	33
II.5. CONCLUSION.....	36

CHAPITRE III : DEFAUTS ET DEFAILLANCES DES FILTRES ACTIFS

III.1. INTRODUCTION.....	37
III.2. LES DEFAUTS DANS UN SYSTEME.....	37
III.2.1. La défaillance d'un système.....	38
III.2.2. Les Causes de défaillance	38
III.3. LA DEFAILLANCE DU FILTRE ACTIF.....	38
III.3.1. Causes de destruction de modules IGBT.....	39
III.3.2. Défaut de type court-circuit.....	40
III.3.3. Défaut de type circuit ouvert.....	40
III.4. ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU CONVERTISSEUR FAP EN PRESENCE DU DEFAUT DE CIRCUIT OUVERT.....	41
III.4.1. Etude générale de l'influence d'un défaut type circuit ouvert sur le réseau.....	41
III.4.1.1. Influence d'un défaut type circuit ouvert coté FAP sur le réseau électrique.....	42
III.4.2. Analyse détaillée de l'influence d'un défaut de type circuit ouvert	43
III.4.2.1. Analyse de l'influence d'un défaut de type circuit ouvert au niveau du FAP.....	43
III.5. CONCLUSION.....	52

CHAPITRE IV : FILTRE ACTIF UPQC A COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS

IV.1. INTRODUCTION.....	53
IV.2. LA COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS.....	53
IV.2.1. Classification des méthodes de la commande tolérante aux défauts.....	54
IV.2.1.1. Approche passive.....	55
IV.2.1.2. Approche active.....	56
IV.2.2. Topologies "faulttolérant" pour les filtre actifs.....	58
IV.3. STRATEGIE DE DIAGNOSTIC APPLIQUEE AU SYSTEME DE FILTRAGE ACTIF PARALLEL.....	59
IV.3.1. Partie diagnostic d'un défaut type circuit ouvert.....	61
IV.3.1.1. Extraction des caractéristiques pour l'apprentissage du RNA	61
IV.3.1.2. L'architecture du réseau de neurones artificiel.....	63
IV.3.1.3. Critères d'évaluation pour le système de diagnostic automatique.....	64
IV.3.1.4. Performances du système de diagnostic.....	65
IV.3.2. Partie commande tolérante du défaut.....	66
IV.3.3. Compensation d'un défaut de type circuit ouvert au niveau du FAP.....	67
IV.4. CONCLUSION.....	74
CONCLUSION GENERALE.....	79
BIBLIOGRAPHIE.....	80

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Creux et coupures de tension.	5
Figure I.2 : Surtension transitoire.	6
Figure I.3 : variation de fréquence.....	7
Figure I.4 : la fluctuation de la tension.....	7
Figure I.5 : Décomposition d'un signal périodique.....	8
Figure I.6 : Représentation des harmoniques, inter-harmonique et infra-harmonique.....	9
Figure I.7 : Système triphasés déséquilibré.....	9
Figure I.8 : diagramme vectorielle du facteur de puissance.....	11
Figure I.9 : Filtre passif résonant.....	13
Figure I.10 : structure du filtre passif amorti.....	13
Figure I.11 : structure d'un filtre actif série.....	14
Figure I.12 : filtre actif parallèle.....	15
Figure I.13 : combinaison parallèle série actifs.....	16
Figure II.1 : Structure générale d'un FAP à structure tension.....	19
Figure II.2 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle deux niveaux proposé.....	20
Figure II.3 : Diagramme de transformation du référentiel $a-b-c$ au référentiel $\alpha-\beta$	24
Figure II.4 : Diagramme de blocs de génération des courants de référence selon l'algorithme du référentiel synchrone.....	27
Figure II.5 : Diagramme de blocs d'une PLL.....	28
Figure II.6 : Modulateur MLI à bande d'hystérésis. (a). Schéma global. (b). Principe...	29
Figure II.7 : Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le Constituer.....	30
Figure II.8 : Hexagones des tensions et courants définis dans le plan $\alpha-\beta$ (a). Hexagone des tensions. (b). Hexagone des courants.....	33
Figure II.9 : Circuit monophasé équivalent d'un filtre actif parallèle.....	34
Figure III.1 : Défauts actionneurs, capteurs et système.....	37
Figure III.2 : Défaillance de type court-circuit.....	40
Figure III.3 : Défaillance de type circuit ouvert.....	41
Figure III.4 : Représentation de l'ensemble des courants\tensions présent sur le réseau électrique lors d'un défaut de type circuit ouvert intervient sur le FAP.....	42

Figure III.5 : Forme des différents courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T1 FAP.....	44
Figure III.6 : Forme des courants injectés dans le cas d'un circuit ouvert de T1 FAP....	45
Figure III.7 : THD des courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T1 FAP...	46
Figure III.8 : Forme des différents courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T2 FAP.....	47
Figure III.9: Forme des courants injectés dans le cas d'un circuit ouvert de T2 FAP.....	47
Figure III.10 : THD des courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T2 FAP.	48
Figure III.11 : Forme des différents courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T4 FAP.....	49
Figure III.12 : Forme des courants injectés dans le cas d'un circuit ouvert de T6 FAP.	50
Figure III.13 : THD des courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T6 FAP.	51
Figure IV.1: Principe d'un système de commande tolérante aux défauts.....	54
Figure IV.2: Classification des commandes tolérante aux défauts.....	55
Figure IV.3 : Schéma de principe d'une loi de commande FTC passive.....	56
Figure IV.4: Schéma de principe d'une loi de commande FTC active.....	57
Figure IV.5 : Topologies "faulttolerant": (a) avec bras redondant; (b) sans bras Redondant.....	58
Figure IV.6 : Structure du système de diagnostic.....	59
Figure IV.7: Organigramme de diagnostic par RNA.....	60
Figure IV.8 : Ligne de production électrique et filtre actif FAP.....	62
Figure IV.9 : Architecture d'un filtre actif avec bras redondant sous SIMULINK.....	66
Figure IV.10 : Evolution de la THD du courant du réseau électrique sans la présence d'un défaut.....	67
Figure IV.11 : Compensation du défaut circuit ouvert après détection dans le cas d'un circuit ouvert de T1 FAP.....	68
Figure IV.12 : Forme des courants injectés dans le cas de la compensation du défaut type circuit ouvert de T1 FAP.....	69
Figure IV.13 : Evolution de la THD du courant de source du réseau électrique avec présence d'un défaut T1.....	69
Figure IV.14 : Compensation du défaut circuit ouvert après détection dans le cas d'un circuit ouvert de T2 FAP.....	70
Figure IV.15 : Forme des courants injectés dans le cas de la compensation du défaut	71

type circuit ouvert de T2 FAP

Figure IV.16 : Evolution de la THD du courant de source du réseau électrique avec présence d'un défaut T2.....	71
Figure IV.17 : Compensation du défaut circuit ouvert après détection dans le cas d'un circuit ouvert de T6 FAP.....	72
Figure IV.18 : Forme des courants injectés dans le cas de la compensation du défaut type circuit ouvert de T6 FAP.....	73
Figure IV.19 : Evolution de la THD du courant de source du réseau électrique avec présence d'un défaut T6.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 : les deux niveaux de tension en fonction des états des interrupteurs.....	31
Tableau II.2 : les deux niveaux de tension pour toutes les combinaisons possibles.....	31
Tableau II.3 : Les coordonnées α - β de sortie de l'onduleur deux niveaux.....	33
Tableau IV.1: Architecture propose pour le RNA.....	63
Tableau IV.2 : la sortie désirée pour l'état sain et défectueux du système FAP.....	63
Tableau IV.3 Matrice de confusion.....	65
Tableau IV.4. Performances statistiques du modèle RNA choisit.....	65

ABREVIATIONS

FAP : Filtre Actif Parallèle

FAS : Filtre Actif Série

UPQC : Unified power quality conditioner

THD: (Total harmonic distortion) Le taux de distorsion harmonique.

CC : Courant continu

CA : Courant alternatif

MOSFET : Métal oxyde semi-conductor field effect transistor

IGBT : (Insulated Gate Bipolar Transistor), transistors bipolaires à grille

SPWM :(sinus pulse modulation) modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale

Flicker : Papillotement de la tension

PLL : (Phase Locked Loop), boucle à verrouillage de phase

FPB : Filtre passe bas

SPWM :(sinus pulse modulation) modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

PWM: (pulse width modulation)

PFTCS : les approches passives (Passive FaultTolerant Control Systems)

AFTCS : les approches actives (Active FaultTolerant Control Systems)

FDI : (Faults Detection and Isolation)

FFT: La transformé de Fourier Rapide

RNA : réseau de neurones artificiel

FTC : commande tolérante aux défauts

L'électronique de puissance est un domaine relativement nouveau et en pleine croissance. Durant ces dernières décennies, l'évolution technologique importante a impliqué une utilisation accrue des dispositifs d'électronique de puissance moderne dans diverses applications, comme les variateurs de vitesse des machines alternatives, les alimentations sans interruption et les filtres actifs.

La sécurité de ces systèmes, leur fiabilité, leurs performances, la qualité de l'énergie et la continuité de service a mobilisé les scientifiques académiques d'une part et d'autre part les industriels qui ont apporté des améliorations précieuses dans la technologie des interrupteurs de puissance à base de semi-conducteurs et à leurs commandes. Ces avancées ont permis une large diffusion à tout niveau de puissance et dans de très nombreux secteurs d'activités.

Les défaillances d'un convertisseur statique, qu'elles proviennent des drivers de sa commande rapprochée, d'un des composants de puissance commandables ou d'un des capteurs mis en œuvre, conduisent à la perte totale ou partielle du contrôle des courants de phase. Ces défaillances peuvent provoquer de graves dysfonctionnements du système, voire conduire à sa mise hors tension.

Pour faire face à tous ces problèmes, les filtres passifs constituent une solution possible et usuelle. Plus particulièrement, les filtres passifs LC sont exploités pour la réduction des taux d'harmoniques alors que les condensateurs seuls permettent la correction du facteur de puissance. Par contre, ces dispositifs ont montré leurs limites et inconvénients comme : une compensation fixe, taille et volume importants, résonance et dépendent des

De nombreuses solutions de filtres actifs pour la dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature. Celles qui répondent le mieux aux contraintes industrielles d'aujourd'hui sont les filtres actifs parallèle ou, série et les combinaisons parallèle-série (appelés aussi Unified Power Quality Conditioner-UPQC). Dans le cas où les courants de source sont non linéaires, le filtre actif parallèle est considéré comme la meilleure solution pour la réduction des courants harmoniques dans les applications de faible à moyenne puissance. Le filtrage actif est plus avantageux où une réponse rapide est nécessaire en présence de charges non linéaires.

L'objectif principal de ces travaux de Thèse est l'étude d'un filtrage actif triphasé à structure tension "fault tolerant". Ce convertisseur doit assurer la continuité de service, en mode normal, en présence de défauts éventuels d'un semi-conducteur. Ce filtrage actif triphasé "fault tolerant" peut être indifféremment mis en œuvre dans toute application de conversion de l'énergie électrique.

De façon à atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est divisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une rétrospective des perturbations dans les réseaux électrique, les caractéristiques, les origines et les conséquences ainsi que les solutions classiques et modernes de dépollution.

Le second chapitre de ce mémoire sera consacré à l'étude de quelques algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence, les techniques de commande spécialement celles à base de la MLI. Un intérêt particulier sera accordé à la MLI vectorielle avec un développement original d'une théorie associée aux onduleurs trois niveaux, constituant notre contribution dans le domaine du filtrage actif

Le troisième chapitre contiendra l'étude et la simulation de l'influence d'un défaut de type circuit ouvert sur un système à base de FAP conduit à conclure que le défaut existe mais il peut être immédiatement identifiable lors de l'observation du courant de source. Le but étant de diagnostiquer le défaut de type circuit ouvert au niveau de la ligne de production électrique en présence d'un système de filtrage FAP.

Le quatrième chapitre montrera d'une part l'intérêt de l'introduction des techniques intelligentes , Les analyses et les résultats de simulation présentés dans ce chapitre ont montré que la configuration tolérante du filtre UPQC permet d'assurer la continuité de service en présence d'un défaut éventuel d'un des semi-conducteurs et de permettre un fonctionnement en mode normal, même en présence de défaut.

I.1. INTRODUCTION

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

Les principales sources à l'origine des harmoniques sont les appareils d'éclairage fluorescent, les appareillages informatiques, les appareils domestiques (téléviseurs, appareils électroménagers en grand nombre), les arcs électriques et tous les convertisseurs statiques raccordés aux réseaux tels que les redresseurs et les onduleurs.

Tous ces systèmes contribuent à la pollution harmonique du réseau auquel ils sont connectés. En effet, ces systèmes absorbent des courants non sinusoïdaux, même s'ils sont alimentés par une tension sinusoïdale.

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers ou non entiers de la fréquence fondamentale.

I.2. LES PERTURBATIONS ELECTRIQUES

Les perturbations électriques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont en général rangées en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées :

- Basse fréquence (< 9 kHz),
- Haute fréquence (≥ 9 kHz),
- De décharges électrostatiques.

La mesure de QEE consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau) [01] :

- Creux de tension et coupures
- Surtensions
- Variations de la fréquence d'alimentation

- Fluctuations de tension.
- Harmoniques et interharmoniques.
- Déséquilibres de tension.
- Tension continue dans les réseaux alternatifs.
- Tensions de signalisation.

Il n'est en général pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations.

Elles peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension.

Plusieurs de ces caractéristiques sont souvent modifiées simultanément par une même perturbation.

Elles peuvent aussi être classées selon leur caractère aléatoire (foudre, court-circuit, manœuvre...) permanent ou semi permanent.

I.2.1. Creux et coupure de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10% et 90% de la tension nominale [01] [02] pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes.

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation des réseaux électriques.

Ils apparaissent également lors de manœuvre d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs transformateurs, etc.).

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur supérieure à 90% de la tension nominale, disparition totale pendant une durée comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves, supérieure à une minute pour les coupures longues. La plus part des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms [2].

La figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

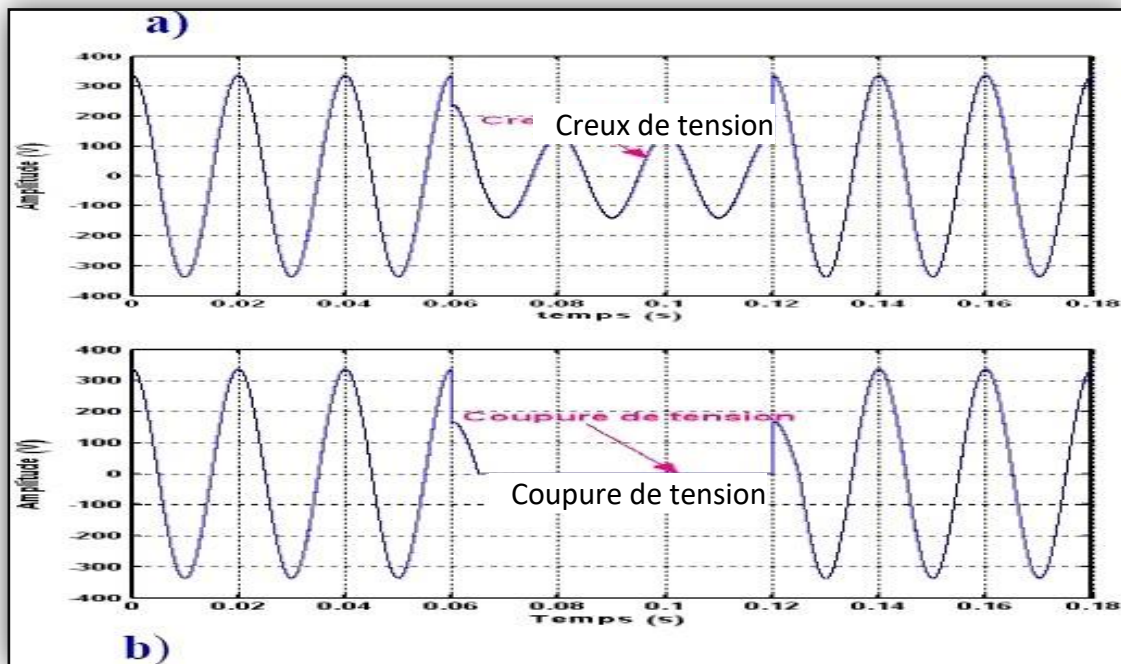


Figure I.1 : Creux et coupures de tension.

- **Conséquences :**

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

I.2.2. Les Surtensions

La surtension est une augmentation brutale du niveau de tension en tout point d'une ligne de transmission de puissance ou d'une installation électrique (figure I.2).

Ce phénomène est dangereux pour l'état d'isolation des équipements électriques et, par conséquent, constitue une menace pour l'équipement et la santé des personnes.

Les surtensions transitoires sont généralement dues à la foudre, à des manœuvres ou au fonctionnement de fusibles. Le temps de montée du front des surtensions transitoires peut varier de moins d'une microseconde à quelques millisecondes [3].

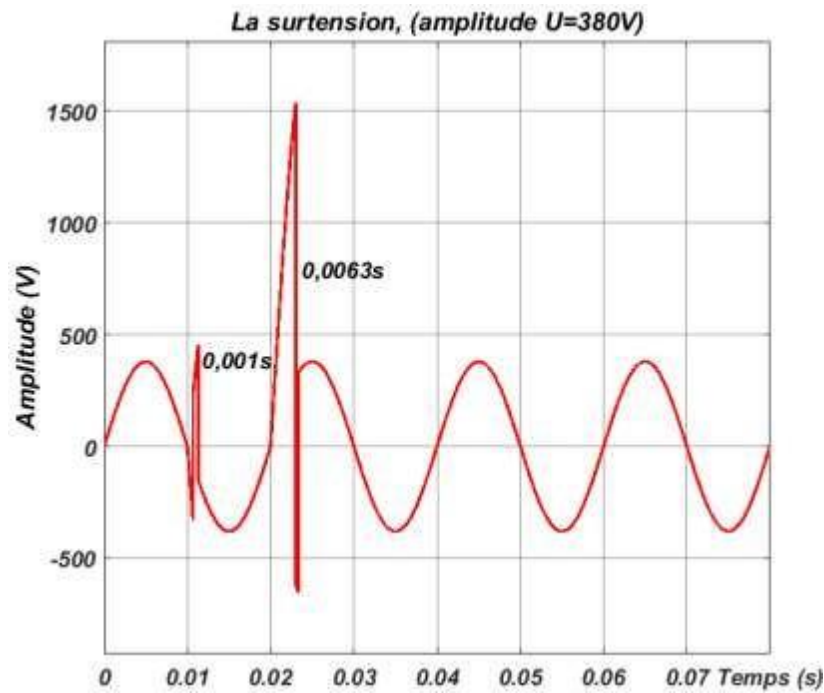


Figure I.2 : Surtension transitoire

- **Conséquences :**

Les surtensions transitoires peuvent provoquer des dégâts importants, dysfonctionnement des appareils sensible, cette sensibilité a augmenté avec le développement de l'électronique de contrôle, commande et de puissance.

I.2.3. Variation des fréquences

Une variation sensible de la fréquence de réseau peut apparaitre sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique, comme le montre la figure I.3.

Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelle comme dans le cas de certains défauts graves sur les réseaux.

Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$. [4]

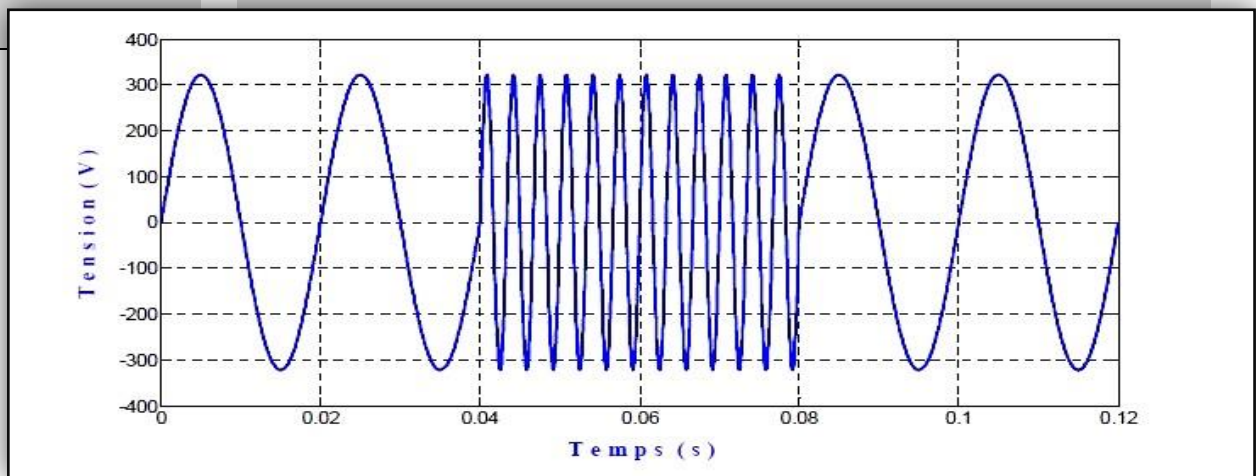


Figure I.3 : variation de fréquence

I. 2.4. Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension qui se produisent à des intervalles de temps de quelques centièmes de secondes.

L'amplitude de la tension doit se situer dans une bande de $\pm 10\%$ de sa valeur nominale.

Ces fluctuations entraînent des variations de flux lumineux pour les lampes à incandescence créant un papillotement de la lumière. [5]

La figure I.4 montre un exemple d'une fluctuation de tension.

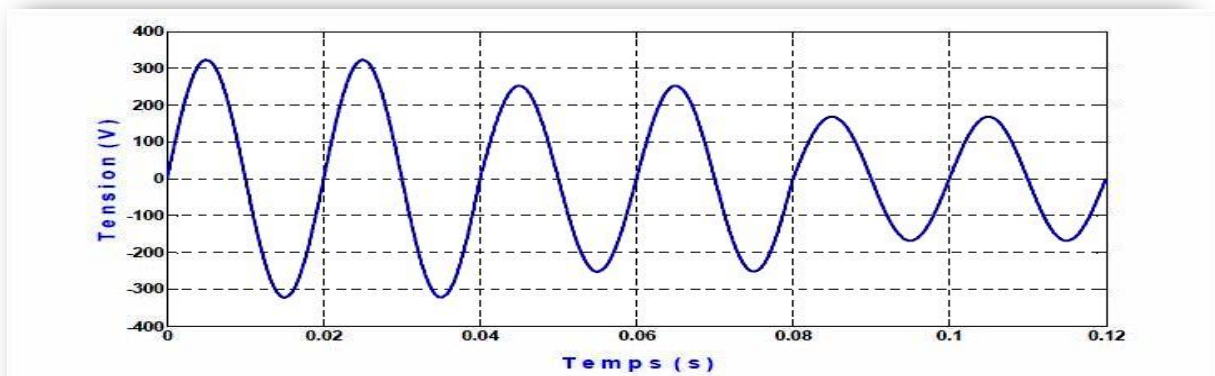


Figure I.4 : la fluctuation de la tension.

I.2.5. Harmoniques et inter-harmoniques :

Toute fonction périodique (de fréquence f) peut se décomposer en une somme de sinusoïdes de fréquence $h \times f$ (h : entier).

h est appelé rang harmonique ($h > 1$).

La composante de rang 1 est la composante fondamentale comme le montre la figure I.5.

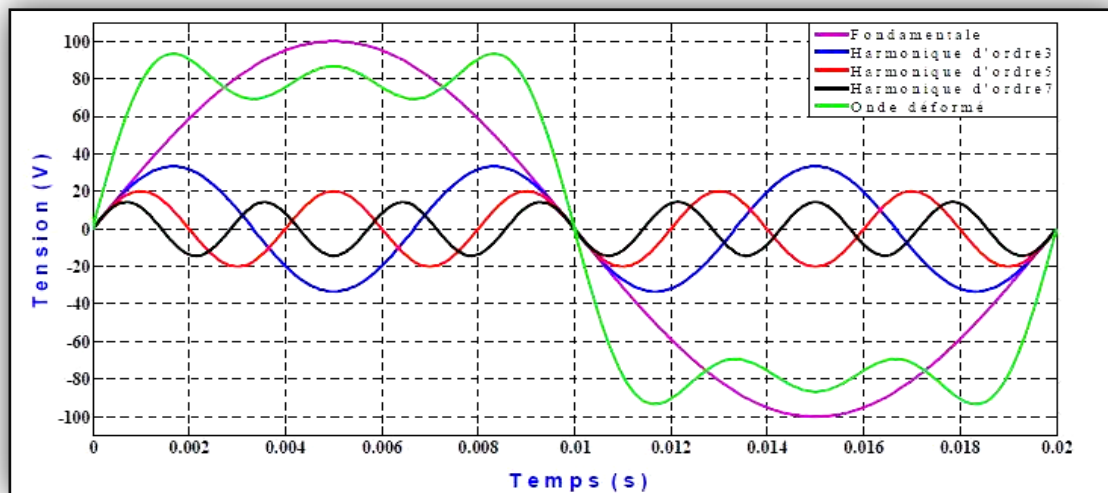


Figure I.5 : Décomposition d'un signal périodique

I.2.5.1. Harmoniques

La présence de la distorsion de forme d'onde de tension et de courant est généralement exprimée en termes de fréquences harmoniques qui sont des multiples entiers de la fréquence générée [6].

Lorsqu'elles sont combinées à la tension ou au courant fondamental sinusoïdal, les harmoniques provoquent la distorsion de la forme d'onde de la tension ou du courant figure I.6.

I.2.5.2. inter-harmoniques

Ce sont des composantes sinusoïdales d'une grandeur qui n'est pas une fréquence multiple entière de celle du fondamental.

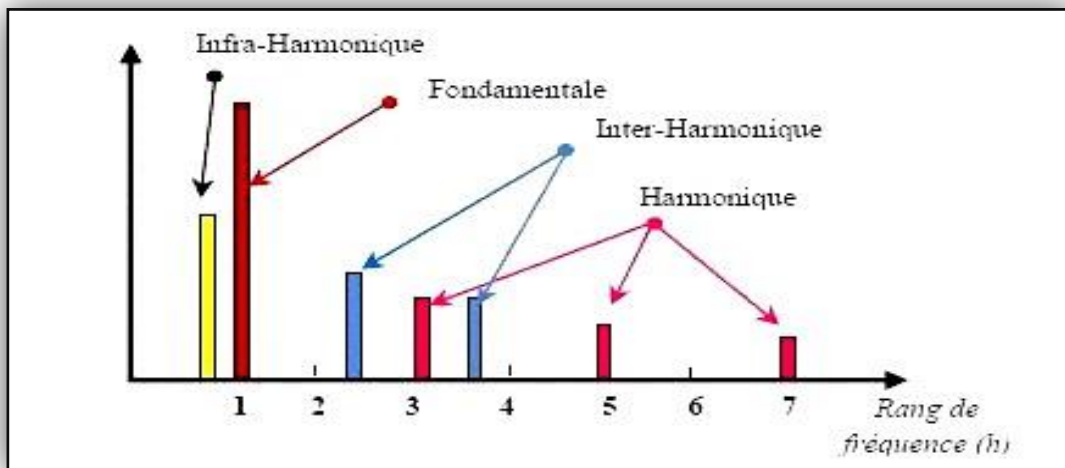


Figure I.6: Représentation des harmoniques, inter-harmonique et infra-harmonique.

I.2.6. Déséquilibres de tension

Le déséquilibre de récepteurs électriques (*triphasés ou monophasés*) alimentés par un réseau triphasé s'observe lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou lorsqu'elles sont déphasées de 120° les unes par rapport à l'autre figure I.7.

Ces déséquilibres sont essentiellement dus à la circulation de courant non équilibré par les impédances de réseau et ont pour conséquence des couples de freinage parasites et des échauffements qui conduisent à une dégradation prématurée des équipements tels que des moteurs ou toute autre machine asynchrone [7].

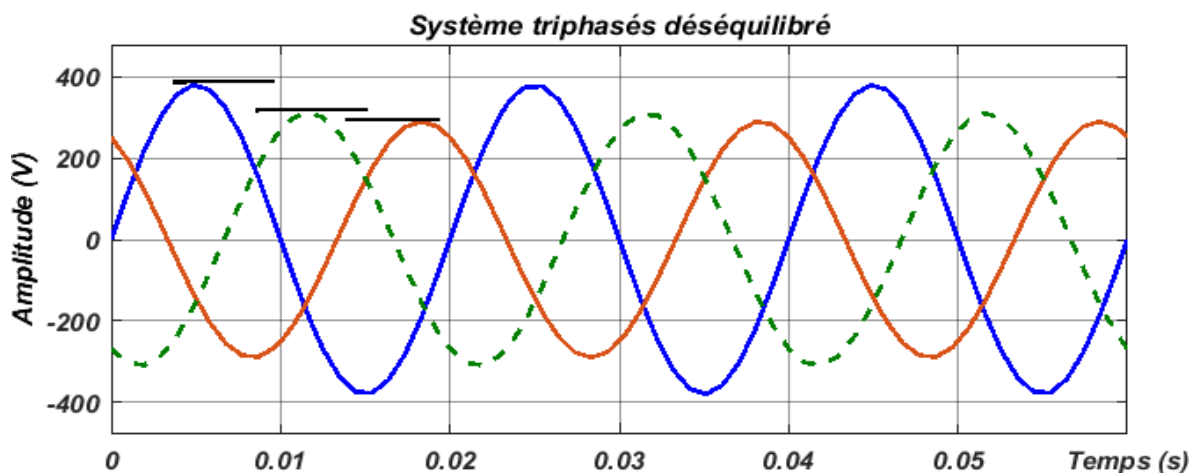


Figure I.7 : Système triphasés déséquilibré.

I.3. CARACTERISTIQUE DE LA POLLUTION HARMONIQUE

Différentes grandeurs sont définies pour chiffrer ces perturbations. Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

- **I.3.1. Le taux harmonique de rang h** : Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation de la grandeur alternative :

$$S_h = C_h / C_1 \quad (I.1)$$

Où C_h représente la composante harmonique de rang h et C_1 représente la composante fondamentale.

- **I.3.2. Le taux global de distorsion harmonique** :

$$THD = \sqrt{\sum_2^{\infty} \frac{C_h^2}{C_1^2}} \quad (I.2)$$

Avec C_1 la valeur efficace du courant/tension fondamental et C_h les valeurs efficaces des différentes harmoniques du courant/tension.

I.3.3. Les Normes Imposées Sur Le THD

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies [8] [9] :

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

En effet, ces normes ont été établies par des groupes d'experts internationaux, qui représentent les constructeurs, les utilisateurs de matériels, ainsi que par des représentants de laboratoires d'essais, des consultants et des universitaires spécialistes du domaine considéré.

I.3.4. Facteur de puissance

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

Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante (D), donnée par la relation (I. 3), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure I.7.

$$D = 3 \cdot V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2} \quad (\text{I. 3})$$

Le facteur de puissance ($F.P$) devient :

$$F.P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} = \cos \varphi_1 \cdot \cos \gamma \quad (\text{I. 4})$$

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

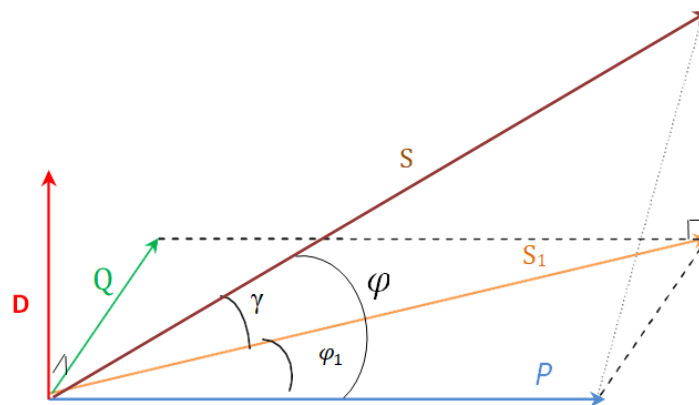


Figure I.7 : diagramme vectorielle du facteur de puissance.

φ_1 : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente.

γ : Le déphasage entre la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire S_1 et la puissance apparente dans le cas déséquilibré non linéaire S .

φ : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S

I.4 LES SOLUTIONS DE DEPOLLUTION DES RESEAUX ELECTRIQUES

Les systèmes d'électronique de puissance utilisée pour l'amélioration de la qualité de l'énergie sont essentiellement des systèmes de compensation.

Ils travaillent en combinaison avec le réseau, en superposant leur énergie à celle de ce dernier. Deux types de solutions sont envisageables :

- Les solutions traditionnelles (filtres passifs) qui sont les plus utilisés.
- Les solutions modernes (filtres actifs de puissance).

I.4.1. Les solutions traditionnelles de dépollution

I.4.1.1. Les filtres passifs

IL s'agit des premières diapositives utilisées pour l'élimination de certains ordres harmoniques. Composés d'éléments passifs (inductances, condensateurs et résistances). En général, ils sont connectés en parallèle avec les charges génératrices d'harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électriques).

La fonction d'un filtre passif consiste à piéger les harmoniques (ordres spécifique) pour empêcher qu'ils ne se propagent dans le reste du réseau. Les filtres passifs peuvent être classés selon leur mode de raccordement au circuit principal, et les fréquences de leur résonance. [10].

I.4.1.2. Principe des filtres passifs

Le principe du filtrage passif consiste à insérer en amont de la charge, un ou plusieurs circuits accordés sur l'ordre harmonique à rejeter. Ainsi pour filtrer un signal à une fréquence particulière, un filtre résonnant série est placé en parallèle sur le réseau figure I.8. Cependant, ce type de filtre est très sélectif.

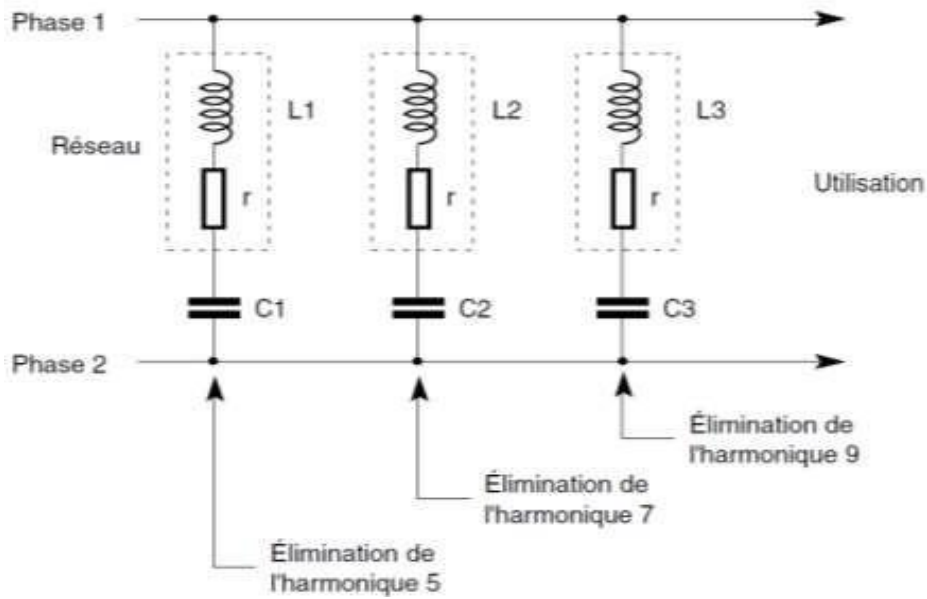


Figure I.8 : Filtre passif résonant

Pour atténuer toute une bande de fréquences, un filtre passif amorti du second ordre Figure I.9. 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.

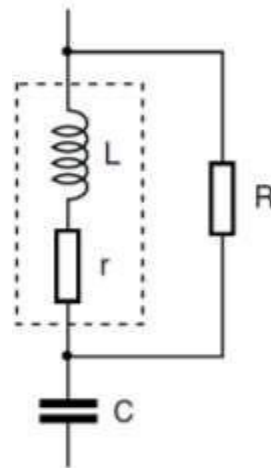


Figure I.9 : structure du filtre passif amorti.

I.4.2. Les solutions modernes de dépollution

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles

comme les filtres passifs (non adaptatifs aux variations de la charge et du réseau, phénomènes de résonance). Parmi toutes les solutions modernes, on trouve deux types de structures classiquement utilisées :

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

Le but de ces filtres actifs est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant ou la tension redevienne sinusoïdal. Le filtre actif est connecté au réseau soit en série (F.A.S), soit en parallèle (FAP) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les tensions ou les courants harmoniques, soit associé à des filtres passifs. Pour fournir aux consommateurs une énergie électrique de qualité, même dans les conditions de fonctionnement les plus perturbées, les filtres actifs sont proposés comme des solutions de dépollution des réseaux électriques, différentes topologies de filtres actifs usuels sont présentées. [1] [11]

I.4.2.1. Le filtre actif série (F.A.S)

Le filtre actif série se comporte dans ce cas, comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) comme le montre la figure I.10.

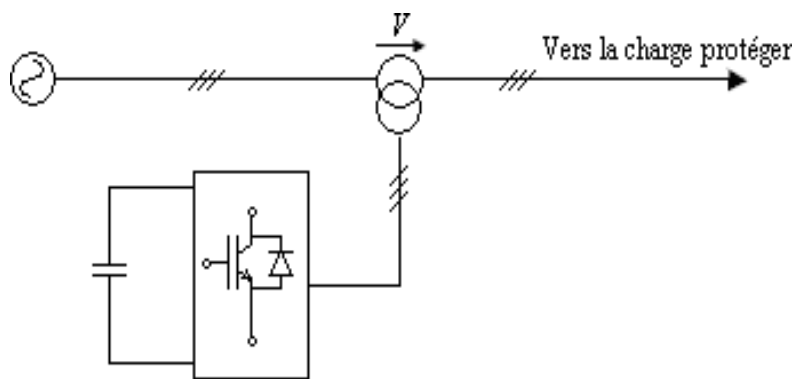


Figure I.10 : structure d'un filtre actif série

Venant de la source et également à celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

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

I.4.2.2. Le filtre parallèle (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, comme le montre la figure I.11, est le plus souvent commandé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant côté réseau est alors sinusoïdal. Ainsi l'objectif du (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.

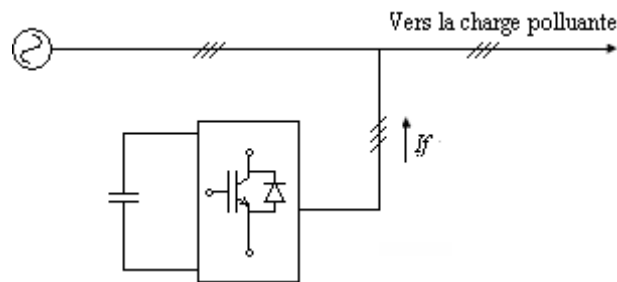


Figure I.11 : filtre actif parallèle.

Les premiers principes de fonctionnement des *filtres actifs parallèles* ont été présentés dans la littérature dès le début des années 1970. En 1976, une première famille de FAP a été conçue à partir d'onduleurs à transistors de puissance commandés en MLI. Ces premiers dispositifs de puissance étaient alors proposés pour la seule compensation des courants harmoniques. Cependant, à cette époque, il était encore difficile de concevoir ce type de système pour des applications industrielles.

I.4.2.3. La combinaison parallèle-série actifs (UPQC)

La combinaison parallèle-série actifs aussi appelée Unified Power Quality Conditioner (*UPQC*), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la Figure I.12. Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'*UPQC* assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci.

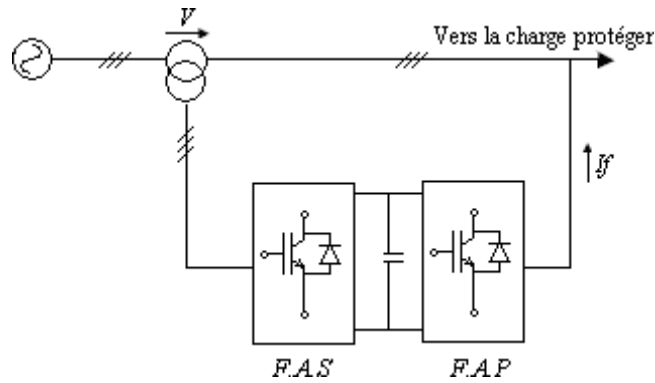


Figure I.12 : combinaison parallèle série actifs

I.4.2.4. La combinaison hybride actif et passive

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. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants permettant de réduire le dimensionnement des filtres actifs qui ne compensent que le reste des perturbations.

Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiées étant :

- 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

I.5. CONCLUSION

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

Cependant, les perturbations ne doivent pas être subies comme une fatalité car des solutions existent. Ensuite, pour diminuer les effets de ces perturbations harmoniques, différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et des charges polluantes

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

II.1. INTRODUCTION

Nous avons choisi comme application de cette étude le FAP triphasé. Ce FAP nous permettra de valider la continuité de service des convertisseurs triphasés à structure tension en présence de défauts et de valider les méthodes proposées pour la détection et la compensation de défauts.

Dans ce chapitre, nous étudions la structure générale d'un FAP triphasé permettant de compenser les harmoniques de courant d'un réseau électrique triphasé à trois fils. Tout d'abord, nous introduirons les trois blocs principaux de la partie puissance, à savoir l'onduleur triphasé à structure tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans cette même partie, nous présentons les différentes topologies de FAP. Ensuite, nous examinons les trois blocs principaux de la partie contrôle, à savoir l'identification des courants de référence, la poursuite des courants de référence et la régulation de la tension continue. Ainsi, nous exposons, pour chaque bloc, les différentes méthodes proposées dans la littérature, avec une discussion quant à leurs avantages et inconvénients.

La qualité et les performances de la compensation des harmoniques de courant dépendent fortement des performances des blocs d'identification des courants de référence et de poursuite des courants de référence.

II.2. LE FILTRE ACTIF PARALLELE

Les perturbations en courant et en tension des réseaux électriques de distribution ont pour origine la prolifération des charges non linéaires qui y sont connectées. Parmi ces charges non linéaires, on peut notamment citer les convertisseurs statiques (redresseurs, onduleurs, gradateurs, etc.), le matériel informatique, les appareils de climatisation ou bien encore les systèmes d'éclairage à base de tubes fluorescents. Ces charges non linéaires absorbent des courants non sinusoïdaux et sont à l'origine des pollutions harmoniques. Les courants harmoniques absorbés par ces charges circulent à travers les réseaux électriques et perturbent sérieusement le fonctionnement de certains équipements électriques, pouvant même conduire à leur destruction. C'est pour toutes ces raisons que le filtrage actif des distorsions en courant et en tension est au centre des préoccupations tant des fournisseurs que des utilisateurs de l'énergie électrique. Pour des installations électriques existantes, les FAP sont les solutions avancées de dépollution les plus adéquates [12]. Actuellement, ces solutions

actives répondent au mieux aux contraintes de la production et de la distribution. Leur réponse est instantanée et ces FAP s'adaptent automatiquement aux évolutions des perturbations introduites par les charges connectées au réseau électrique. Que ce soit dans le secteur industriel ou dans le secteur domestique, les FAP s'insèrent facilement dans un réseau de distribution électrique donné sans imposer un aménagement particulier des installations du fournisseur d'énergie ou du consommateur [13].

Le FAP, également appelé compensateur shunt, est connecté en parallèle sur le réseau électrique. Les FAP sont constitués de convertisseurs statiques à base de semi-conducteurs de puissance (structures de type onduleur), associés à un dispositif de contrôle et de commande adapté. Ils peuvent être assimilés à des sources de courant qui compensent en temps réel les courants harmoniques en injectant au niveau du réseau des courants en opposition de phase avec les perturbations harmoniques identifiées. Un FAP est dit à structure courant ou à structure tension selon le type de stockage de l'énergie, réalisé par une inductance ou un condensateur. Cependant, les FAP à structure tension sont plus fréquemment mis en œuvre dans les applications industrielles pour la simplicité de leurs commandes, leur coût limité et leur taille physique réduite [14], [15]. Nous avons donc choisi de considérer la structure tension dans ce manuscrit. Le schéma synoptique d'un FAP à structure tension est présenté à la figure II.1.

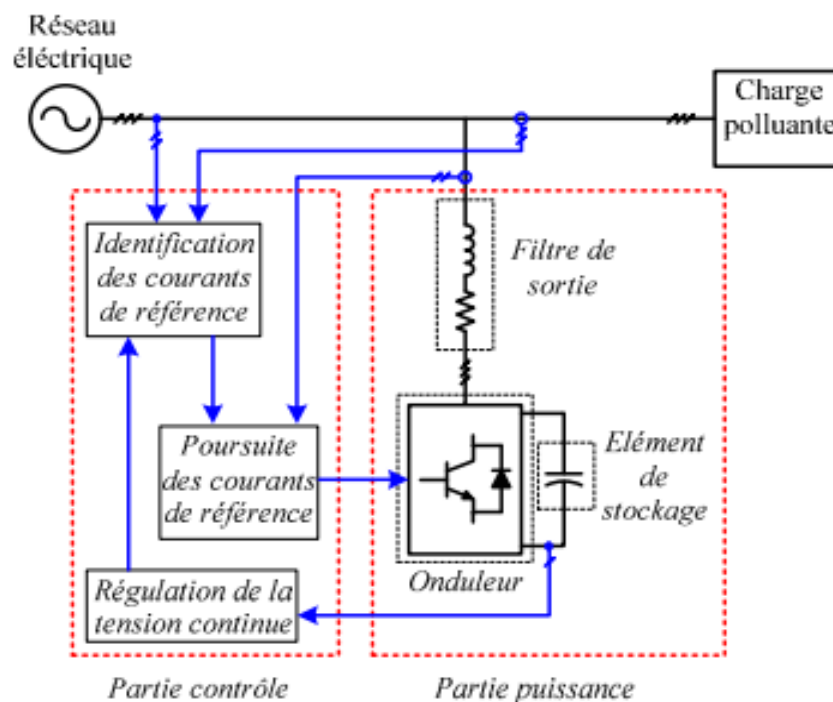


Figure II.1 : Structure générale d'un FAP à structure tension.

II.2.1. Topologies de FAP à structure tension reliés à un réseau électrique à trois fils

La partie puissance d'un FAP à structure tension, comme on peut le voir sur la figure II.1, est constituée par :

- un onduleur de tension à base de semi-conducteurs de puissance, commandables à l'ouverture et à la fermeture (IGBT, MOSFET, ...) et comportant pour chacun d'entre eux une diode en antiparallèle.
- un circuit capacitif de stockage de l'énergie.
- un filtre de sortie.

II.2.2. circuit de puissance

Le circuit de puissance d'un filtre actif parallèle, à base d'un onduleur de tension deux niveaux à IGBT, placé entre un réseau triphasé et une charge non-linéaire polluante en pont de Graëtz à 6 thyristors, est représenté ci-dessous figure II.2 avec :

i_s , courant de la source d'alimentation

v_s , tension au point de raccordement commun

v_{FA} , i_{FA} , L_{FA} , tension, courant et inductance du filtre actif

i_c , L_F , i_{dc} , courant, inductance amont et courant aval au pont de Graëtz constituant la charge polluante.

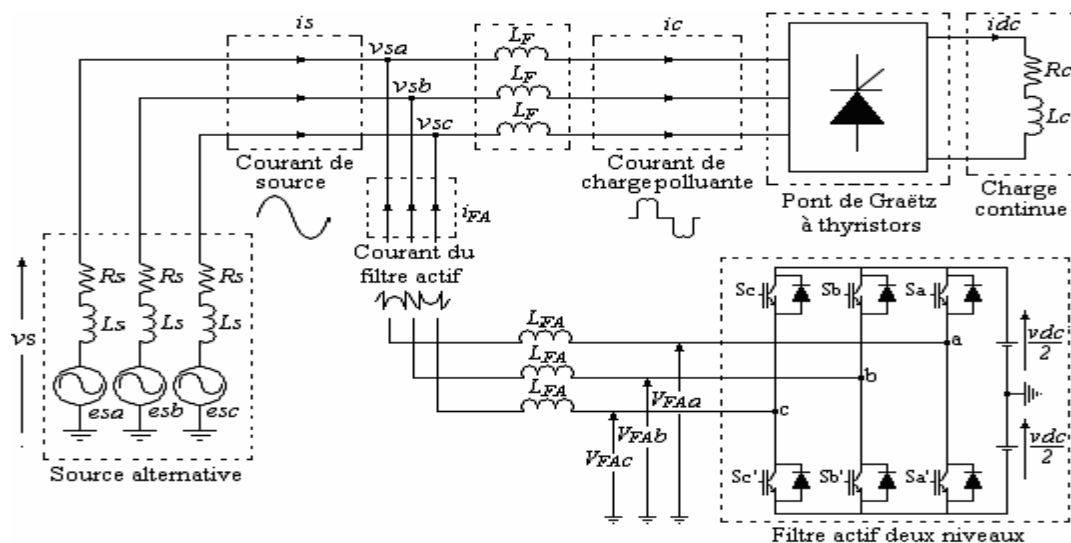


Figure II.2 : Circuit de puissance du filtre actif parallèle deux niveaux proposé.

II.2.3. Circuit de commande

Le circuit de commande est, en général, réparti en trois blocs distincts:

- Bloc de détection des courants de référence ;
- Bloc de génération des impulsions (commande proprement dite),
- Bloc de régulation de la tension continue v_{dc} .

Cette application est dépourvue du 3^{ème} bloc dans la mesure où l'on a considéré une source de tension continue produisant v_{dc} .

II.2.4. Dimensionnement des condensateurs

Afin de dimensionner le(s) condensateur(s) alimentant le filtre actif, différentes approches ont été proposées. En réalité, les changements transitoires dans la puissance instantanée absorbée par la charge provoquent des fluctuations dans la tension v_{dc} aux bornes du (des) condensateur(s).

L'amplitude de cette fluctuation peut être contrôlée par un choix judicieux de la valeur du condensateur. La surtension maximale que peut subir le condensateur est donnée par :

$$v_{dc_{max}} = \frac{1}{C} \int_{\theta_1/\omega}^{\theta_2/\omega} i_{dc}(t) dt + v_{dc} \quad (\text{II.1})$$

Avec: θ_1, θ_2 étant deux angles appartenant à l'intervalle $[0, 2\pi]$, et ω étant la pulsation du réseau ($\omega = 2\pi f$, par ex. $f = 50$ Hz).

La capacité du condensateur C s'exprimera ainsi:

$$C = \frac{1}{\Delta v_{dc}} \int_{\theta_1/\omega}^{\theta_2/\omega} i_{dc}(t) dt \quad (\text{II.2})$$

La valeur moyenne du courant i_{dc} absorbé par le condensateur est donnée par :

$$\int_{\theta_1/\omega}^{\theta_2/\omega} i_{dc}(t) dt = I_{FAm} \int_{\theta_1/\omega}^{\theta_2/\omega} [\sin(\omega t) + \sin(\omega t + 2\pi/3)] dt \quad (\text{II.3})$$

I_{FAm} étant l'amplitude max du courant i_{FA} . Si on prend $\theta_1 = 0$ et $\theta_2 = \pi/6$ rad, la capacité du condensateur sera alors formulée par (a).

A titre indicatif, avec une fluctuation Δv_{dc} de 5 % V_{dc} , telle que $V_{dc} = 840$ V, et un courant maximal I_{FA} de 40 A, la valeur numérique de C est 1520 μF .

L'approche de [16] considère la fréquence de commutation au niveau de la capacité d'expression (b):

$$C = \frac{I_{FA}}{2 \cdot \Delta v_{dc} \cdot \omega} \quad (a) \quad C = \frac{12 F_{FA}}{2 \cdot \Delta v_{dc} \cdot \omega f_s} \quad (b) \quad (II.4)$$

f_s Étant la fréquence de commutation ($\omega s = 2 \cdot \pi \cdot f_s$). Dans ce cas, avec $I_{FA} = 40$ A, $V_{dc} = 840$ V, $\Delta v_{dc} = 5 \% \cdot V_{dc}$, $f_s = 23.5$ kHz, C sera égale à 24.66 μF .

II.2.5. Dimensionnement du filtre de sortie

A la sortie du filtre actif, et en vue d'absorber les harmoniques hautes fréquences dues aux commutations de l'onduleur, on insère un filtre passif. Dans la figure II.2 on a utilisé une inductance L_{FA} . Le dimensionnement de L_{FA} est réalisé avec la contrainte que pour une fréquence de commutation donnée, la pente du courant i_{FA} est plus petite que celle d'une porteuse triangulaire (dans le cas d'une commande intersective) définissant cette fréquence de commutation. La pente de la porteuse triangulaire ' χ ' est définie par [16]:

$$\chi = 4 \cdot \varepsilon \cdot f_s \quad (II.5)$$

Telle que : ε est l'amplitude de l'onde triangulaire, f_s , est la fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif.

La pente maximale de i_{FA} , dans le cas d'un filtre actif à point milieu, est donnée par:

$$\frac{dt_{FA}}{dt} = \frac{0.5 \cdot v_{dc} + V_{sm}}{L_{FA}} \quad (II.6)$$

D'où une valeur de L_{FA} estimée à:

$$L_{FA} = \frac{0.5 V_{dc} + V_{sm}}{4 \cdot \varepsilon \cdot f_s} \quad (II.7)$$

Dans ce cas, avec $V_{dc} = 840$ V, $V_{sm} = 230\sqrt{2}$ V, $\varepsilon = 1$ et $f_s = 23.5$ kHz, $L_{FA} = 1.26$ mH.

II.3. ALGORITHMES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES ET TECHNIQUE DE COMMANDE DE REGULATION DES FILTRES ACTIFS

La qualité de la compensation des harmoniques de courant dépend fortement des performances de la méthode d'identification choisie. En effet, un système de commande, même très efficace, ne pourra pas à lui seul effectuer un filtrage satisfaisant si les courants harmoniques sont mal identifiés.

Pour cette raison, de nombreuses méthodes d'identification ont été développées dans la littérature. Elles peuvent être regroupées selon deux approches [17], dans deux domaines, fréquentiel et temporel.

II.3.1. Domaine fréquentiel

Les algorithmes appartenant à ce domaine sont basés sur l'analyse de Fourier appliquée aux grandeurs distordues (courants ou tensions) afin d'en extraire les signaux de compensation. En utilisant la transformée de Fourier, les composantes harmoniques de compensation sont d'abord séparées des signaux harmoniques polluants et sont ensuite combinées pour générer les consignes.

La fréquence de commutation des semi-conducteurs du filtre actif est généralement maintenue plus grande que deux fois la plus élevée des fréquences harmoniques dans l'objectif d'avoir une compensation effective [18]. L'application *on-line* de la transformée de Fourier (système d'équations non linéaires) est un calcul encombrant, il en résulte un temps de réponse relativement lent.

II.3.2. Domaine temporel

Les algorithmes de compensation dans le domaine temporel sont basés sur la détermination instantanée des grandeurs de compensation des courants/tensions harmoniques. Généralement, les courants de référence sont requis non seulement pour la compensation des courants harmoniques mais également pour remplacer les déficits de la puissance réactive et les fluctuations du bus continu du filtre actif.

Fondamentalement, les différents schémas proposés essayent d'inclure la composante réactive afin d'éliminer les courants harmoniques et de corriger le facteur de puissance. Beaucoup d'algorithmes entrent dans cette catégorie

II.3.2.1. Théorie de la puissance instantanée réactive

Le concept de cette théorie est très commun pour l'extraction des courants/tensions de référence d'un filtre actif. Elle consiste en une transformation variable, dans le référentiel α - β , des puissances, courants et tensions instantanés à partir du référentiel a - b - c . Les équations transformées du 1^{er} plan triphasé au second à coordonnées diphasées, sont dérivées du diagramme de phase représenté sur la figure II.3.

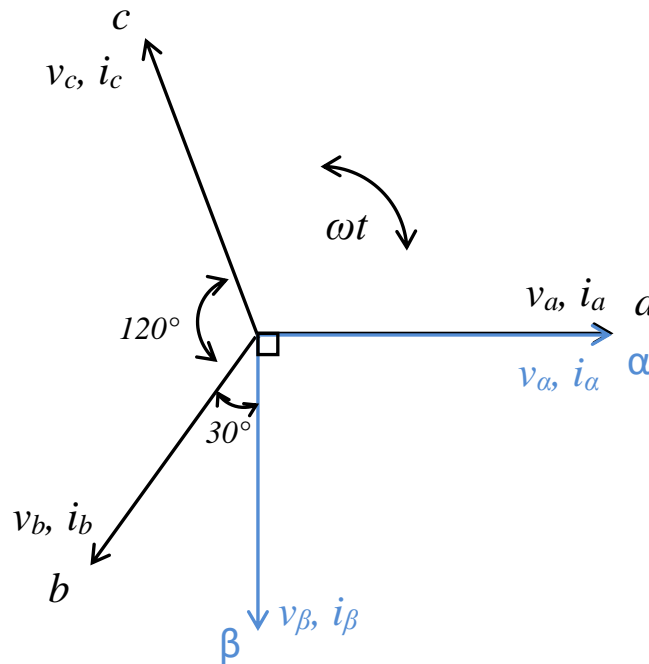


Figure II.3 : Diagramme de transformation du référentiel a - b - c au référentiel α - β .

Les valeurs instantanées des courants et tensions triphasés peuvent être obtenues dans le plan α - β par les équations suivantes:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = [C_{32}] \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [C_{32}] \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.8})$$

Avec C_{32} la matrice de transformation développée par Concordia et dont l'expression est donnée par:

$$[C_{32}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Cette transformation n'est valide que si les tensions sont équilibrées et sinusoïdales.

Les puissances instantanées active et réactive dans ce repère sont calculées par:

$$P(t) = v_{\alpha}(t).i_{\alpha}(t) + v_{\beta}(t).i_{\beta}(t) \quad (\text{II.10})$$

$$q(t) = -v_{\alpha}(t).i_{\beta}(t) + v_{\beta}(t).i_{\alpha}(t) \quad (\text{II.11})$$

Il est évident que $p(t)$ est identique à son expression conventionnelle dans le repère $a-b-c$. Cependant, afin de définir la puissance réactive instantanée, Akagi a introduit une nouvelle expression dans l'espace vectoriel donnée par:

$$\vec{q} = \vec{v}_{\alpha} \times \vec{i}_{\beta} + \vec{v}_{\beta} \times \vec{i}_{\alpha} \quad (\text{II.12})$$

Le vecteur \vec{q} est perpendiculaire au plan α - β . Pour rester en conformité avec la règle de la main droite, \vec{v}_{α} est perpendiculaire à \vec{i}_{β} , et \vec{v}_{β} est perpendiculaire à \vec{i}_{α} . Le sens physique du Vecteur \vec{q} n'est pas une "puissance instantanée" à cause du produit de la tension dans une phase et du courant dans une autre phase.

Au contraire, $\vec{v}_{\alpha} \times \vec{i}_{\alpha}$ et $\vec{v}_{\beta} \times \vec{i}_{\beta}$ signifient clairement une "puissance instantanée, à cause du produit de la tension dans une phase et du courant dans la même phase.

Akagi a attribué à cette nouvelle grandeur électrique, définie par l'équation (II.12), l'appellation "puissance instantanée imaginaire", représentée par le produit des valeurs instantanées du courant et de la tension, mais qui ne peut être traitée comme une grandeur conventionnelle.

A partir des équations (II.10) et (II.11), p et q peuvent être exprimées en composantes

AC et DC, telles que:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{II.13})$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

\bar{p} : Composante DC de p liée au courant actif fondamental conventionnel

\tilde{p} : Composante AC de p , dépourvue de valeur moyenne et liée aux courants

Harmoniques causés par les composantes AC de la puissance instantanée réelle

\bar{q} : Composante DC de q liée à la puissance réactive générée par les composantes

Fondamentales des courants et des tensions

\tilde{q} : Composante AC de q et liée aux courants harmoniques causés par les

Composantes AC de la puissance instantanée réactive.

II.3.2.1.1. Cas d'un filtre actif parallèle

Ici, il s'agit de l'extraction des courants de référence. L'expression des courants en fonction des puissances instantanées dans le plan α - β est donnée par:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \left\{ \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

Si on souhaite également compenser la puissance réactive (c.-à-d. le déplacement du facteur de puissance), 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 :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

Les courants de compensation finaux dans le repère a-b-c, incluant la composante de séquence zéro, sont donnés par:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

$$i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (i_a + i_b + i_c) \quad (\text{II.18})$$

II.3.2.2. Algorithme du référentiel synchrone

Cette méthode introduite par Bhattacharya [20], exploite également la transformation de Concordia mais appliquée uniquement aux courants de charge. Une seconde transformation est alors opérée pour passer aux courants de ligne selon les axes d q. Ceci permet de transformer la composante fondamentale du courant en une composante continue et les composantes harmoniques du courant en des composantes alternatives.

La composante continue du courant de charge peut alors être éliminée à l'aide d'un simple FPB. L'avantage majeur de cette méthode, comparativement à la précédente, réside dans le fait que les éventuelles tensions harmoniques n'ont plus d'influence sur les courants identifiés. Le diagramme de blocs d'un générateur de courants de référence utilisant l'algorithme du référentiel synchrone est présenté dans la figure II.4.

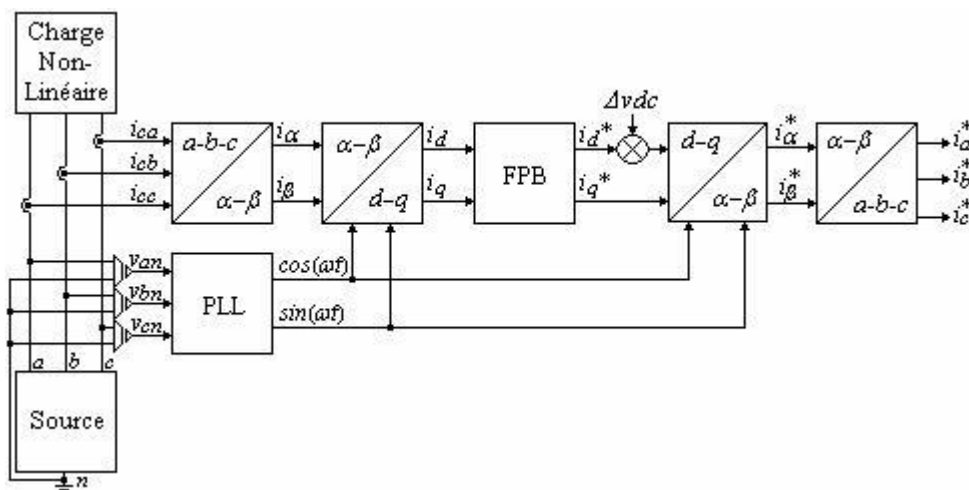


Figure II.4 : Diagramme de blocs de génération des courants de référence selon l'algorithme du référentiel synchrone.

Dans ce cas, les courants réels sont transformés dans un référentiel synchrone d-q. Ce dernier étant synchronisé avec les tensions de source, et tournant à la même fréquence. Cette transformation est définie par:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Comme pour la théorie de la puissance réactive instantanée, les termes d et q sont constitués d'une composante DC et d'un multiple de composantes AC, tels que:

$$\begin{cases} i_d = i_{ddc} + i_{dac} \\ i_q = i_{qdc} + i_{qac} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Les signaux de compensation dans ce référentiel s'expriment par:

$$i_{dref} = -i_{dac} \quad (\text{II.21})$$

$$i_{qref} = -i_{qdc} - i_{qac} \quad (\text{II.22})$$

Les courants de référence sont générés dans le plan triphasé a-b-c sont :

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ 0 & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} \quad (\text{II.23})$$

Cependant, la transformation du plan α - β vers le référentiel d-q des signaux en sinus et cosinus, synchronisés avec les tensions simples du réseau, est indispensable. Ces derniers sont créés en utilisant, dans chaque phase, une boucle à verrouillage de phase, plus connue sous la nomination anglo-saxonne PLL (Phase Locked Loop) [20].

Le diagramme de fonctionnement d'une PLL est présenté dans la figure II.5.

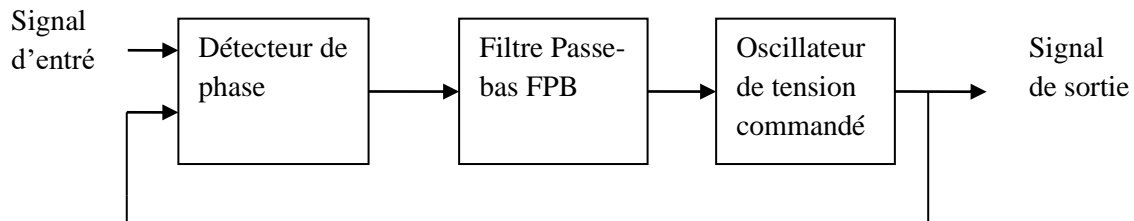


Figure II.5 : Diagramme de blocs d'une PLL

Comme l'algorithme de génération des courants harmoniques présente des similitudes avec la procédure mathématique appliquée à l'algorithme précédent, les effets introduits par le filtre passe-bas sont les mêmes que ceux affectant la théorie de la puissance instantanée réactive.

II.4. TECHNIQUES DE COMMANDE

La finalité de la commande d'un FAP est de contrôler les courants de sortie du FAP afin qu'ils suivent au plus près leurs références. Le principe de cette poursuite est basé sur la comparaison entre le courant généré par le FAP et le courant de référence, afin d'en déduire les ordres de commande des interrupteurs de puissance. La majorité des techniques de commande appliquées aux filtres actifs sont basées sur les stratégies MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion).

II.4.1. MLI à Bande d'hystérésis

Ce type de contrôle non linéaire utilise le signal d'erreur entre le (courant ou tension) de référence et le courant produit par l'onduleur. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un nouvel ordre de commande est envoyé aux semi-conducteurs de manière à maintenir le courant réel à l'intérieur de la bande. Comme illustré la figure II.16.a. Cette technique ne demande qu'un comparateur à hystérésis par phase. Dans ce cas, la fréquence de commutation ne peut être déterminée mais plutôt estimée.

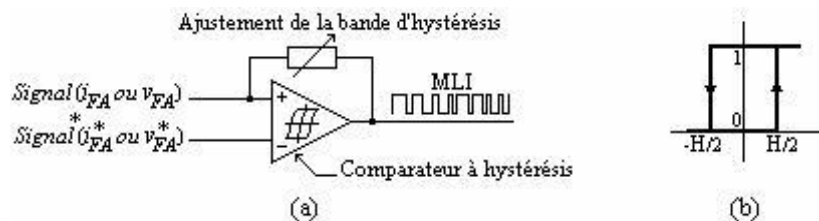


Figure II.6 : Modulateur MLI à bande d'hystérésis. (a). Schéma global. (b). Principe

Le comparateur à hystérésis fonctionne selon le principe expliqué dans la figure II.6.b. L'interrupteur s'ouvre si l'erreur devient inférieure à $-H/2$, il se ferme si cette dernière est supérieure à $+H/2$, où H représente la fourchette (ou largeur) d'hystérésis. Si l'erreur est maintenant comprise entre $-H/2$ et $+H/2$ (c.-à-d. qu'elle varie à l'intérieur de la fourchette d'hystérésis), l'interrupteur ne commute pas [21].

Dans le cas d'un filtre actif parallèle, si l'erreur du courant généré se situe à l'intérieur de la bande, pas de réaction enregistrée de la part de la commande ; si l'erreur est trop élevée, la commande est positive et entraîne l'interrupteur à la fermeture.

Par conséquent, la tension générée est supérieure ou égale à zéro, condition nécessaire pour l'accroissement du courant. Analogiquement, lorsque le courant de sortie est trop élevé,

ceci incite l'interrupteur à l'ouverture, donc la tension à être inférieure ou égale à zéro et ainsi le courant à décroître. L'interaction entre les trois phases de l'onduleur constituant le filtre actif est un inconvénient. En effet, si la commande est positive dans l'une des phases dans l'objectif d'accroître le courant, la tension s'accroît également sur cette phase, tandis qu'elle diminue dans les deux autres phases. Ceci peut être préjudiciable pour le contrôle du courant sur les deux autres phases. La commande par hystérésis est excellente dans la mesure où elle assure une bonne réponse de l'onduleur vis-à-vis des changements rapides des courants de référence, puisque les comparateurs à hystérésis ont une inertie et un retard négligeables.

II.4.2. Technique de la commande vectorielle d'un onduleur de tension deux Niveaux :

Parmi les variantes de la MLI, la plus en vue ces derniers temps, la commande communément appelée en anglais SVM (space vector modulation). Ce type de modulation est qu'elle peut être facilement implantée sur un Microprocesseur et elle offre l'avantage de permettre un traitement entièrement numérique. [22]

II.4.2.1. Modélisation de l'onduleur

L'onduleur triphasé de tension deux niveaux est constitué de 02 interrupteurs par bras. Ces derniers ont la particularité d'être bidirectionnels et entièrement commandables à l'ouverture et à la fermeture. Ils peuvent être soit des MOSFET pour les faibles puissances et fréquences très élevées, des IGBT pour les grandes puissances et fréquences élevées, ou des GTO pour les très grandes puissances et fréquences faibles. Pour assurer la circulation du courant dans les deux sens, l'interrupteur doit être placé en antiparallèle avec une diode. La structure générale d'un onduleur de tension deux niveaux est représentée par la figure II.7.

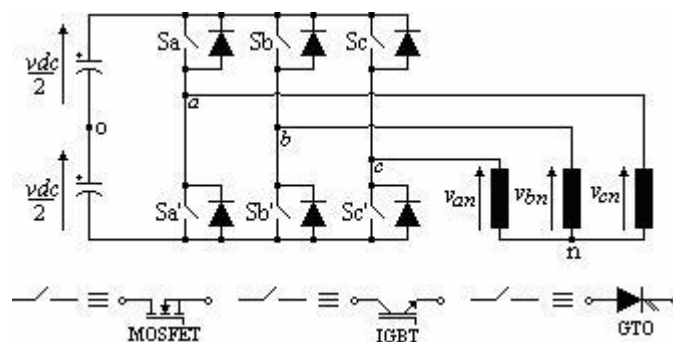


Figure II.7 : Onduleur de tension deux niveaux et les interrupteurs pouvant le constituer.

L'onduleur de tension deux niveaux délivre, en sortie, deux niveaux de tensions $-v_{dc}/2$ et $+v_{dc}/2$, en fonction des états des interrupteurs comme expliqué dans le Tableau II.1.

C_i	S_i	S_i'	v_{io}
-1	0	1	$-v_{dc}/2$
1	1	0	$+v_{dc}/2$

Tableau II.1 : les deux niveaux de tension en fonction des états des interrupteurs

Avec: i , indicateur de phase tel que $i = a, b, c$, C_i est la variable d'état de l'interrupteur prenant comme valeurs -1 ou 1, v_{io} est la tension prise entre phase et point milieu o. La tension v_{io} est obtenue en appliquant la formule suivante:

$$v_{io} = C_i v_{dc}/2 \quad (\text{II.24})$$

Maintenant, si on considère tous les interrupteurs, toutes les phases (3), et tous les états possibles (2), on obtient 2^3 combinaisons lesquelles sont présentées dans le Tableau II.2.

N°	C_a	C_b	C_c	S_a	S_a'	S_b	S_b'	S_c	S_c'	v_{ao}	v_{bo}	V_{co}
1	-1	-1	-1	0	1	0	1	0	1	$-v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$
2	-1	-1	1	0	1	0	1	1	0	$-v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$
3	-1	1	-1	0	1	1	0	0	1	$-v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$
4	-1	1	1	0	1	1	0	1	0	$-v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$
5	1	-1	-1	1	0	0	1	0	1	$v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$
6	1	-1	1	1	0	0	1	1	0	$v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$
7	1	1	-1	1	0	1	0	0	1	$v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$
8	1	1	1	1	0	1	0	1	0	$v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$

Tableau II.2 : les deux niveaux de tension pour toutes les combinaisons possibles

Les tensions entre phases sont données par:

$$\begin{cases} v_{ab} = v_{ao} - v_{bo} \\ v_{bc} = v_{bo} - v_{co} \\ v_{ca} = v_{co} - v_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Si le système est équilibré, on a une somme nulle des tensions phase-neutre:

$$v_{an} + v_{bn} + v_{cn} = 0 \quad (\text{II.26})$$

Les tensions phase-neutre seront données, en fonction des tensions entre phases, par:

$$\begin{cases} v_{an} = (1/3) \cdot (v_{ab} - v_{ca}) \\ v_{bn} = (1/3) \cdot (v_{bc} - v_{ab}) \\ v_{cn} = (1/3) \cdot (v_{ca} - v_{bc}) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Et en fonction des tensions phase-point milieu, on a:

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ -1/3 & 2/3 & -1/3 \\ -1/3 & -1/3 & 2/3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_{ao} \\ v_{bo} \\ v_{co} \end{bmatrix} \quad (\text{II.28})$$

Et dans le plan α - β , on aura:

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \end{bmatrix} = C_{32} \cdot \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

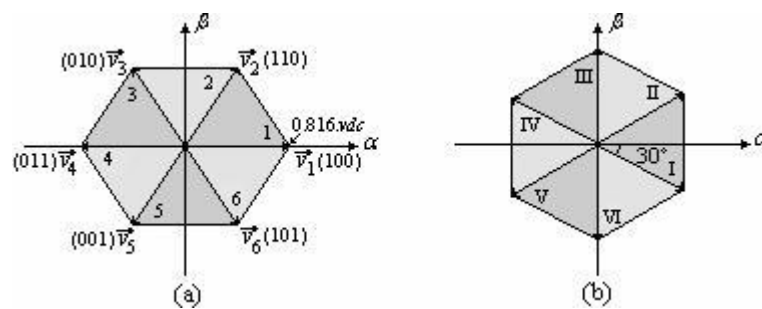
Avec, C_{32} la matrice de Concordia définie par la formule (II.9). Les coordonnées α - β du vecteur v de la formule (II.29), considérant toutes les combinaisons possibles, sont inscrites dans le Tableau II.3.

v_{ao}	v_{bo}	v_{co}	v_{α}/v_{dc}	v_{β}/v_{dc}	v_{an}	v_{bn}	v_{cn}	v_{α}/v_{dc}	v_{β}/v_{dc}	
$-v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	0	0	0	0	0	0	0	\vec{v}_0
$-v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	-0.408	-0.707	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$2.v_{dc}/3$	-0.408	-0.707	\vec{v}_5
$-v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	-0.408	0.707	$-v_{dc}/3$	$2.v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	-0.408	0.707	\vec{v}_3
$-v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	-0.816	0	$-2.v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	-0.816	0	\vec{v}_4
$v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	0.816	0	$2.v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	$-v_{dc}/3$	0.816	0	\vec{v}_1
$v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	0.408	-0.707	$v_{dc}/3$	$-2.v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	0.408	-0.707	\vec{v}_6
$v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	$-v_{dc}/2$	0.408	0.707	$v_{dc}/3$	$v_{dc}/3$	$-2.v_{dc}/3$	0.408	0.707	\vec{v}_2
$v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	$v_{dc}/2$	0	0	0	0	0	0	0	\vec{v}_7

Tableau II.3 : Les coordonnées α - β de sortie de l'onduleur deux niveaux

II.4.2.2. Application de la commande vectorielle

Cette technique de commande, proposée par A. Nabae et al [23], divise le référentiel α - β des courants et des tensions en six régions avec un décalage courant/tension de 30° comme illustré dans la figure II.8.



(a). Hexagone des tensions

(b). Hexagone des courants.

Figure II.8 : Hexagones des tensions et courants définis dans le plan α - β .

L'hexagone de tension de la figure II.8.a est la représentation vectorielle des vecteurs non nuls \vec{v}_1 à \vec{v}_6 (\vec{v}_0 et \vec{v}_7 étant les vecteurs nuls correspondant aux états 000 et 111 respectivement). Ensuite, l'algorithme de commande doit identifier la région, parmi les régions de I à VI de l'hexagone de courant, où l'erreur de courant Δi est située, puis sélectionner le vecteur de tension de sortie du filtre actif v_{FA} appartenant à l'hexagone de tension et ayant pour rôle de forcer Δi à varier dans la direction opposée, maintenant ainsi le courant de sortie proche de sa consigne.

La figure II.9 montre le schéma monophasé équivalent d'un filtre actif parallèle, à base d'un onduleur de tension deux niveaux, connecté entre un réseau alternatif et une charge non- linéaire.

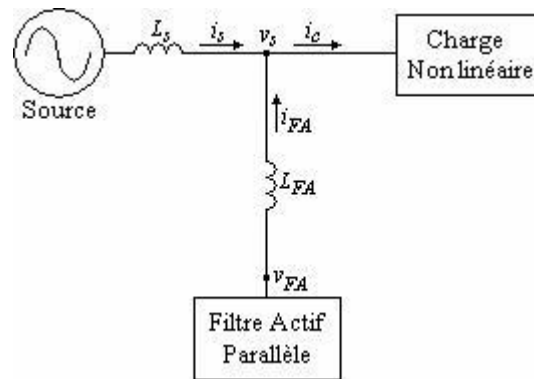


Figure II.9 : Circuit monophasé équivalent d'un filtre actif parallèle.

L_s : Inductance côté source

i_s : Courant côté source

v_s : tension côté source

L_{FA} : Inductance de sortie.

i_{FA} et v_{FA} courant et tension du filtre actif.

L'équation qui relie le courant et la tension du filtre actif s'exprime, après l'application des lois de Kirchhoff au circuit ci-dessus, par:

$$v_{FA} = L_{FA} \frac{di_{FA}}{dt} + v_s \quad (\text{II.30})$$

Le vecteur de l'erreur du courant est défini par :

$$\Delta i = I_{FA}^* - i_{FA} \quad (\text{II.31})$$

Où i_{FA}^* est la consigne du courant i_{FA} généré par le filtre actif. En remplaçant l'équation (II.31) dans l'équation (II.30), on a:

$$v_{FA} = L_{FA} \frac{d(i_{FA}^* - \Delta i)}{dt} + v_s \Rightarrow L_{FA} \frac{d\Delta i}{dt} = v_s + L_{FA} \frac{di_{FA}^*}{dt} - v_{FA} \quad (\text{II.32})$$

En mettant la qualité :

$$v = v_s + L_{FA} \frac{di_{FA}^*}{dt} \quad (\text{II.33})$$

Alors :

$$L_{FA} \frac{d\Delta i}{dt} = v - v_{FA} \quad (\text{II.34})$$

L'expression (II.34) représente l'équation d'état du filtre actif parallèle et montre que la variation de vecteur erreur du courant $d\Delta i/dt$ est définie par la différence entre le vecteur fictif de tension v et le vecteur de tension du sortie du filtre actif v_{FA} . Par conséquent, si on souhaite garder cette variation voisine à la valeur zéro, v_{FA} doit être sélectionné de sorte qu'il soit situé à proximité de v . La génération des ordres de commutation des interrupteurs constituant le filtre actif dépend à la fois de l'amplitude et de la région où Δi est situé.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté le filtre actif parallèle et les différentes topologies et les éléments constitutifs d'un FAP triphasé. Ce FAP permet de compenser les harmoniques de tension au courant générés par des charges non-linéaires, connectées à un réseau électrique à trois fils.

Nous avons ensuite successivement étudié chacun des éléments de la partie puissance du FAP :

- Circuit de puissance
- Circuit de commande
- Dimensionnement des condensateurs
- Dimensionnement du filtre de sortie

De même, pour la partie contrôle, nous avons étudié les algorithmes d'identification des harmoniques et technique de commande et de régulation des filtres actifs. On a pris connaissance la méthode de Théorie de la puissance instantanée réactive et l'algorithme du référentiel synchrone.

Finalement, on a présenté les stratégies de commande, de type MLI, à Bande d'hystérésis et MLI vectorielle et leur technique pour l'amélioration et l'identification des courants de référence en présence de composantes perturbatrices des tensions de source (harmoniques et déséquilibre). Nous avons montré, analytiquement, que la méthode proposée est capable d'identifier correctement les composantes harmoniques directes et inverses des courant de charge, même si les tensions de source sont perturbées.

Dans le chapitre suivant, nous avons étudié par simulation les performances d'un FAP triphasé, contrôlé par les méthodes présenté, dans différentes conditions de courants et/ou de tensions. On va présenter l'application à la Continuité de service de convertisseurs triphasés de filtres actifs simulés sous Matlab-Simulink.

III.1. INTRODUCTION

Après avoir étudié les différentes topologies, algorithmes de détection des grandeurs harmoniques de référence, les stratégies de commande et de régulation des filtres actifs dans les deux chapitres précédents, nous allons présenter ici quelques unes de leurs applications ainsi que leur simulation sous Matlab-Simulink

III.2. LES DEFAUTS DANS UN SYSTEME

Un défaut est caractérisé par une altération du fonctionnement partielle ou globale, temporaire ou permanente, pouvant être réparable ou corrigée tant que l'intégrité des composants n'en est pas affectée. Ce sont des événements qui apparaissent à différents endroits du système.

Lorsque l'on conçoit un système de diagnostic, la première question que l'on se pose, est de savoir ce que l'on veut détecter, c'est-à-dire de définir le type de dysfonctionnement que l'on veut diagnostiquer. Les défauts affectant un système peuvent être de différentes natures et sont généralement classés en défauts d'actionneurs, défauts de capteurs et défauts de système. Ainsi on pourra être amené à détecter des biais, des dérives et/ou des valeurs aberrantes. Selon l'influence sur les systèmes, les défauts peuvent être classés additifs et multiplicatifs. Généralement dans la littérature, les défauts sont classés en fonction de leur localisation (emplacement) [24, 26, 27, 28, 34]. Donc, il est possible de distinguer trois types de défauts, à savoir :

Défauts actionneurs: modélisés en général comme des signaux additifs aux signaux d'entrée, ils agissent au niveau de la partie opérative et détériore ainsi le signal d'entrée du système.

Défauts systèmes: modélisés en général comme des dynamiques additionnelles avec une matrice de distribution, ils s'identifient par la modification des caractéristiques du système.

Défauts capteur: modélisés en général par des signaux additifs aux signaux de sortie, ils fournissent une mauvaise image de l'état physique du système.

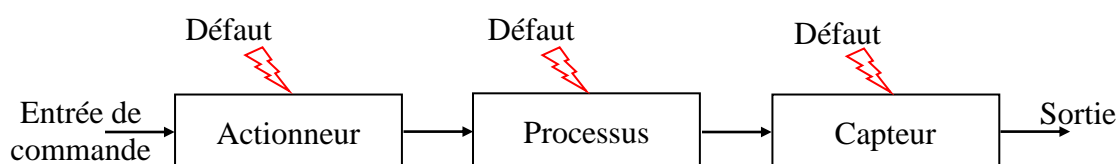


Figure III.1 : Défauts actionneurs, capteurs et système

III.2.1. La défaillance d'un système

Une défaillance du système est une altération ou l'impossibilité du système à accomplir ses ou ses fonctions requises avec les performances définies dans les spécifications techniques) [24, 26, 27, 28, 35, 36]. Ceci peut intervenir de quatre manières différentes :

- **Plus de fonction** : la fonction cesse de se réaliser.
- **Pas de fonction** : la fonction ne se réalise pas lorsqu'on la sollicite.
- **Fonction dégradée** : la fonction ne se réalise pas parfaitement : altération des performances.
- **Fonction intempestive** : la fonction se réalise alors qu'elle n'est pas sollicitée.

III.2.2. Les Causes de défaillance

Les causes de la défaillance sont nombreuses, elle diffèrent d'un système à un autre. Elle est fortement liée aux circonstances de la conception, la fabrication ou l'emploi du composant défaillant. L'origine des pannes provient de la conception du produit mais également des dérives de composants ou sous ensemble d'usure : pollution, oxydation, capacités, bus intermédiaire, composants de puissance. Les origines de la défaillance d'un composant électronique peuvent être classées en deux catégories externes ou internes.

Origines externes

Les origines externes sont dues aux contraintes principalement environnementales appliquées au composant durant son fonctionnement normal tel que l'humidité, les températures extrêmes, les radiations ionisantes naturelles ainsi que la poussière et la contamination, ... etc.

Origines internes

Elles peuvent être dues aux "défauts" induits dans le composant durant les différents procédés de fabrication (malformation de l'oxyde de grille, défauts de pureté du cristal de silicium, défaut de réalisation du packaging...) : ce sont des causes dites internes.

III.3. LA DEFAILLANCE DU FILTRE ACTIF

Comme nous l'avons mentionnée dans le chapitre précédent, les convertisseurs statiques (onduleurs) sont la composante essentielle dans un système de filtrage du réseau électrique. Les défauts des filtres actifs proviennent de la commande du convertisseur (défauts d'un des drivers),

d'un des capteurs ou d'un des composants de puissance (condensateur, diode, IGBT) [25, 37,38]. Ces défauts lorsqu'ils surviennent conduisent à l'altération de la bonne marche du système voir son arrêt. Les défauts affectant le filtre actif sont [25, 37,38]:

- Défaut de court-circuit du bus continu ;
- défaut d'isolement d'une phase ;
- défaut du condensateur ;
- défaut des diodes classiques ;
- défaut du circuit de commande (Vieillessement de l'optocoupleur).
- vieillissement ;
- court-circuit d'un interrupteur statique ;
- circuit ouvert d'un interrupteur statique.

III.3.1. Causes de destruction de modules IGBT

La température de fonctionnement est un intervenant principal dans le taux de défaillance des systèmes électroniques. La surcharge thermique est la cause de défaillance la plus fréquente dans les systèmes électroniques modernes. L'élévation de température excessive du composant provoque un changement physique des puces IGBT et diodes qui entraînent un comportement irréversible du composant [24, 26, 27, 39, 41]. L'élévation anormale de la température peut être provoquée de différentes manières :

- ***cyclage et fatigue thermique*** : l'augmentation des résistances thermiques des modules IGBT due au cyclage thermique engendre une augmentation anormale de la température du module IGBT en fonctionnement normal. Les brasures se fragilisent lors des cycles de température. Le contact surfacique se dégrade et le transfert thermique diminue (résistance thermique locale augmente). La température et l'excursion de température augmentent jusqu'à arriver à la destruction du module.
- ***court-circuit*** : en cas de court-circuit, la puissance dissipée par les puces IGBT est énorme. La température croît très rapidement. Sans protection, le module IGBT est détruit en un temps assez court : de quelques μs à quelques dizaines de μs .
- ***amorçage dynamique*** : la structure quatre couches de l'IGBT peut être amorcée de façon irréversible lors de forts dv/dt sur le composant. Le composant n'est plus commandable à l'ouverture par la grille et est voué à une mort rapide.

- **avalanche** : lors de l'ouverture des modules IGBT, une surtension est observée, elle est due à la décroissance du courant dans les inductances de câblage.

III.3.2. Défaut de type court-circuit

Le défaut de type court-circuit d'un interrupteur apparaît quand l'un des deux interrupteurs reste continuellement à l'état passant. Le court-circuit se produit lorsque le deuxième interrupteur est à son tour commandé à la fermeture. 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, problème de connectique entre la carte de commande et le driver). 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 [24, 26, 27, 40, 41].

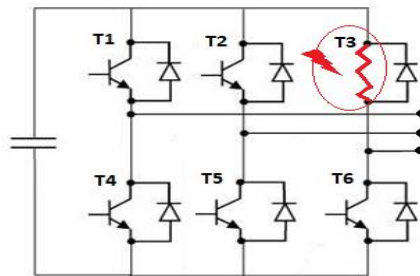


Figure III.2 : Défaillance de type court-circuit

III.3.3. Défaut de type circuit ouvert

Un défaut de type circuit-ouvert se traduit généralement par une perte totale ou partielle du fonctionnement de l'un des IGBTs constituant le convertisseur statique, il se produit pour diverses raisons, une défaillance de grille, une défaillance de la commande rapprochée, une coupure d'un fil de liaison dans le transistor, ou un courant de collecteur extrêmement élevé. Le défaut d'ouverture d'IGBT se manifeste par la perte d'une alternance positive ou négative du courant de sortie de l'onduleur en fonction de l'emplacement du composant endommagé au niveau du bras défaillant, celui-ci sera visible soit sur l'alternance positive du courant (défaut sur IGBT supérieur), soit sur l'alternance négative (défaut IGBT inférieur). En effet, le défaut de circuit ouvert conduit à l'apparition d'un déséquilibre entre les tensions des transistors d'un même bras. Les tensions et les courants portent les signatures du défaut et peuvent être donc analysées pour détecter et localiser ce

défaut. Les défauts de circuit ouvert ne causent généralement pas l'arrêt du système, mais dégradent ses performances [24, 26, 27, 40, 41].

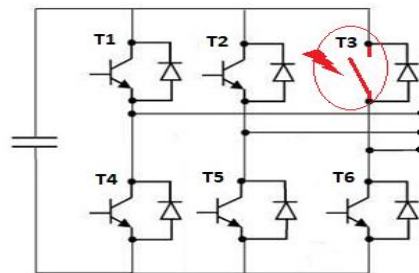


Figure III.3 : Défaillance de type circuit ouvert

En résumé, les défaillances au niveau des commutateurs doivent être détectées et compensées indépendamment de leurs natures (court-circuit ou circuit ouvert), car en plus de la dégradation des performances du système, ils peuvent se propager et engendrer d'autres défaillances dans la chaîne de conversion d'énergie.

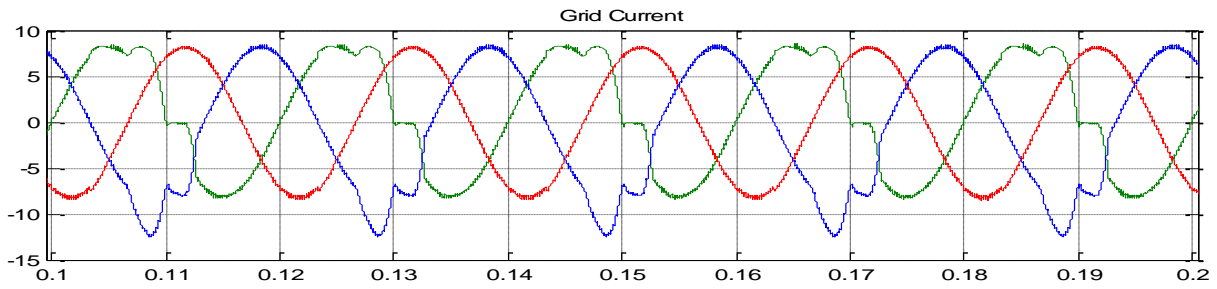
III.4. ETUDE DU FONCTIONNEMENT DU CONVERTISSEUR FAP EN PRESENCE DU DEFAUT DE CIRCUIT OUVERT

Dans cette section, nous allons présenter les conséquences d'un défaut "circuit-ouvert" lorsque le système de contrôle tolérant "faulttolerant" n'est pas utilisé. Nous avons choisi ce type de défaut pour illustrer la nécessité et l'importance d'employer un système de contrôle dans l'application FAP. L'opération consiste à simuler l'un des driver en circuit ouvert. Nous effectuons la simulation sur tous les drivers du système FAP, l'un après l'autre.

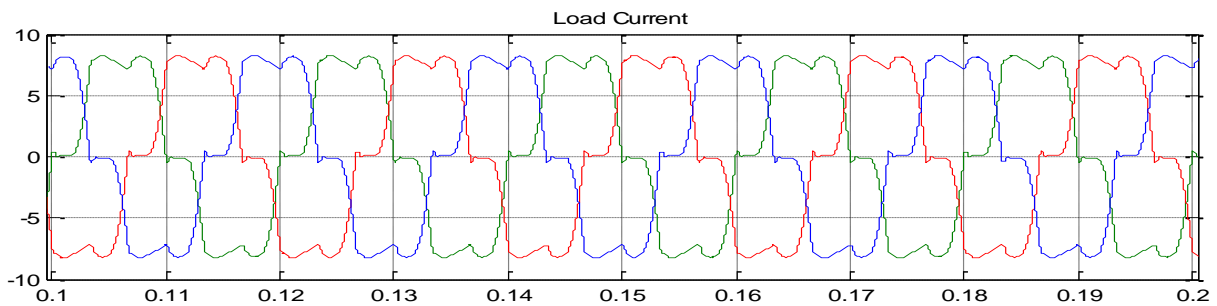
III.4.1. Etude générale de l'influence d'un défaut type circuit ouvert sur le réseau

Pour extraire des indicateurs fiables de défauts, on procède à l'analyse du comportement, en mode sain et dégradé du filtre actif FAP deux niveaux. Le but étant d'étudier et de mettre en place une stratégie de diagnostic et de commande tolérante d'un défaut de type circuit ouvert dans un système à base d'un filtre FAP, une analyse est faite pour déterminer l'influence d'un défaut de type circuit ouvert sur la grandeur du réseau électrique (le courant). Le défaut peut apparaître n'importe où dans les filtres constituant le FAP. Les figures suivantes mettent en évidence la présence d'un défaut et son influence sur les différentes grandeurs du réseau.

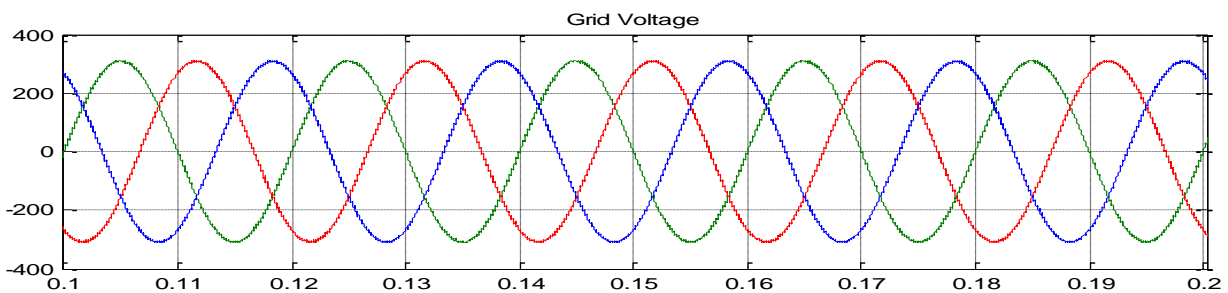
III.4.1.1. Influence d'un défaut type circuit ouvert coté FAP sur le réseau électrique



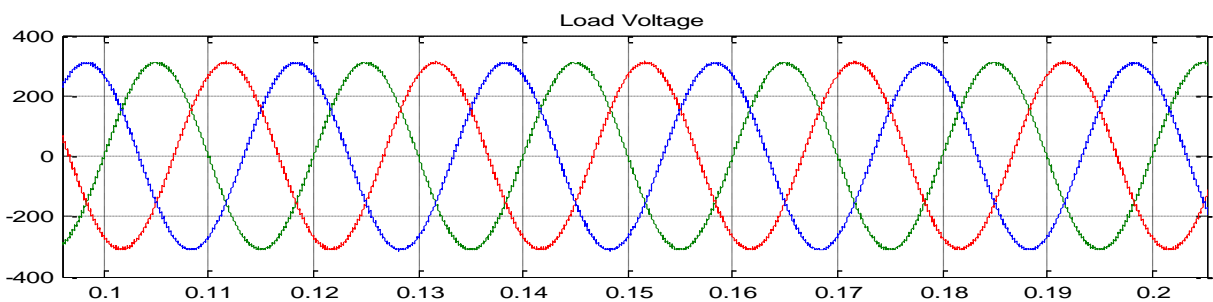
a- Influence d'un défaut C.O sur les courants de source ia, ib et ic



b- Influence d'un défaut C.O sur les courants de charge iLa, iLb et iLc



c- Influence d'un défaut C.O sur les tensions de sources Va, Vb et Vc



d- Influence d'un défaut C.O sur les tensions de charges VLa, VLb et VLc

Figure III.4: Représentation de l'ensemble des courants/tensions présent sur le réseau électrique lors d'un défaut de type circuit ouvert intervient sur le FAP

La première analyse de l'ensemble des signaux présent sur le réseau électrique (figure III.4) met en évidence la présence d'un défaut d'onduleur et l'incapacité du FAP à compensé et réduire l'influence de la charge non linéaire sur le réseau électrique. Il apparait clairement une déformation de la forme sinusoïdale concernant le courant de source, le courant de charge n'étant pas soumis à l'influence du FAP (le filtre actif influence le côté source du réseau). La THD du courant passe de 1.49% à 16.63% pour la phase ou apparait le défaut. La tension quant à elle n'est pas influencée par l'apparition d'un défaut C.O au niveau du FAP.

III.4.2. Analyse détaillée de l'influence d'un défaut de type circuit ouvert

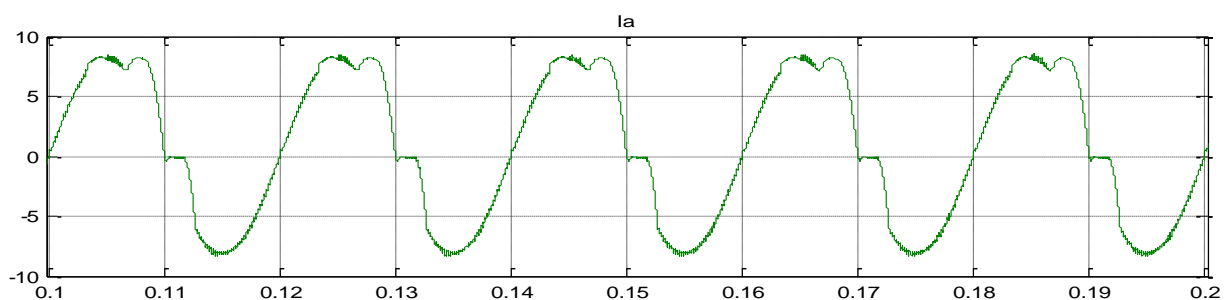
Suite aux résultats de l'étude générale de l'influence d'un défaut type circuit ouvert dans un réseau électrique en présence d'un filtre FAP, nous allons étudier plus en détails les différentes formes tension et courants perturbé par la présence d'un défaut. En se basant sur les études précédentes et d'après ce que nous nos analyse dans la partie précédente, notre étude se focalisera sur l'étude des déformations intervenus sur :

- Les courants de source et injecté pour le FAP,
- Analyse spectrale (Spectre harmonique) des différents signaux ainsi que la THD correspondante.

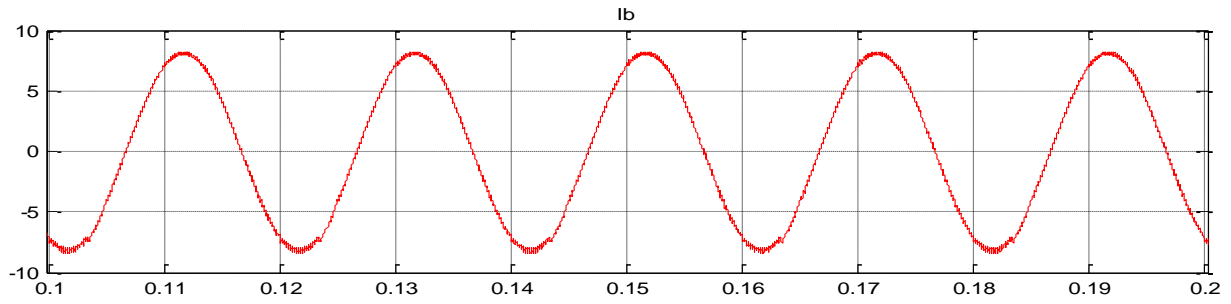
On procédera à la simulation de l'association Réseau électrique équilibré-Charge polluante, tout en maintenant ouvert à partir de l'instant $t=0.10s$, à chaque fois, un des transistors de l'onduleur et on a observé l'évolution des différentes grandeurs électriques de FAP. L'étude est faite sur tous les transistors du FAP, soit 06 cas dans la globalité.

III.4.2.1. Analyse de l'influence d'un défaut de type circuit ouvert au niveau du FAP

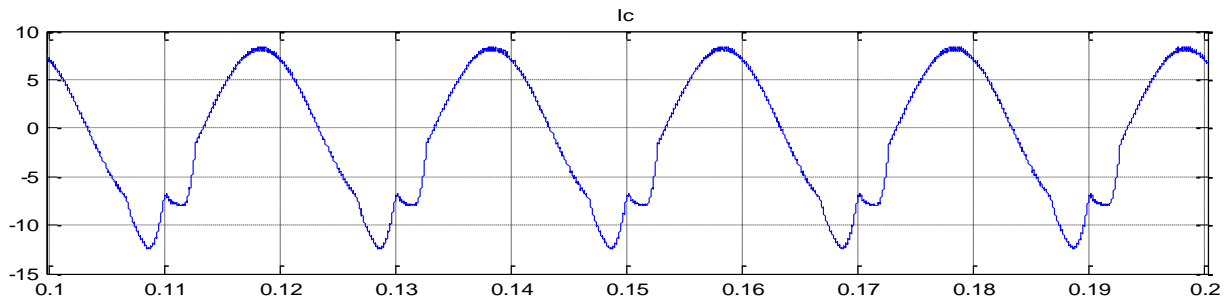
Transistor T1 (1^{er} bras haut) maintenu ouvert



a- Courant de source i_a

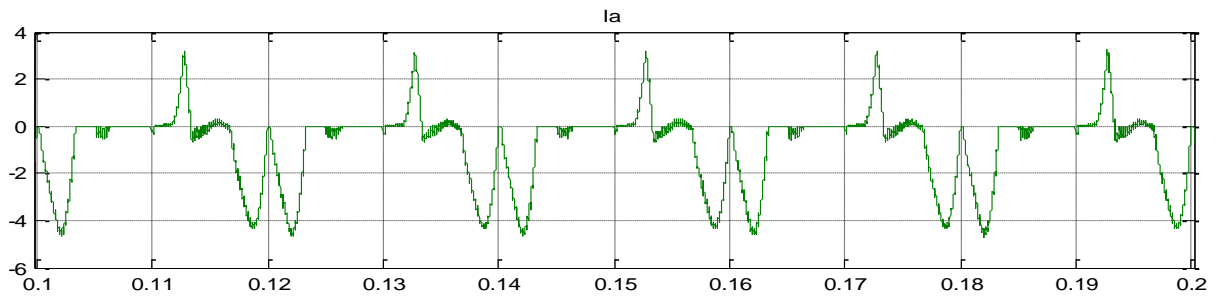


b- Courant de source ib

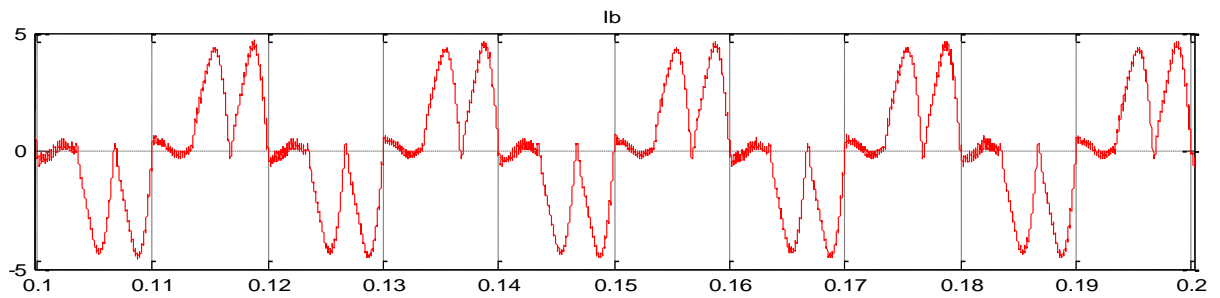


c- Courant de source ic

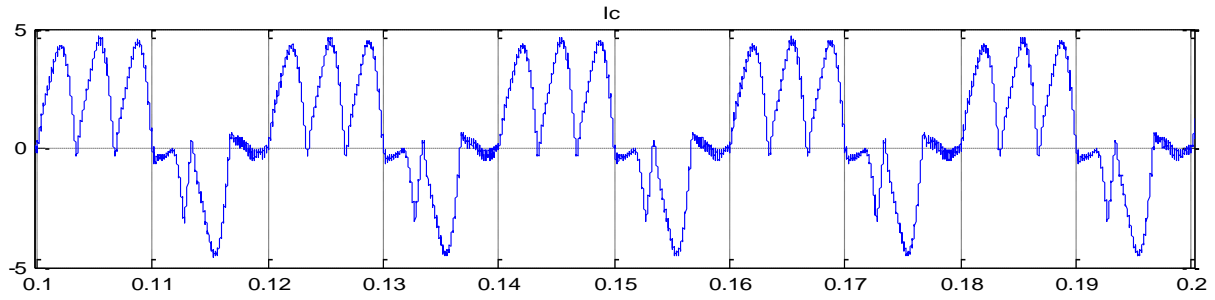
Figure III.5 : Forme des différents courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T1
FAP



a- Courant injecté ia

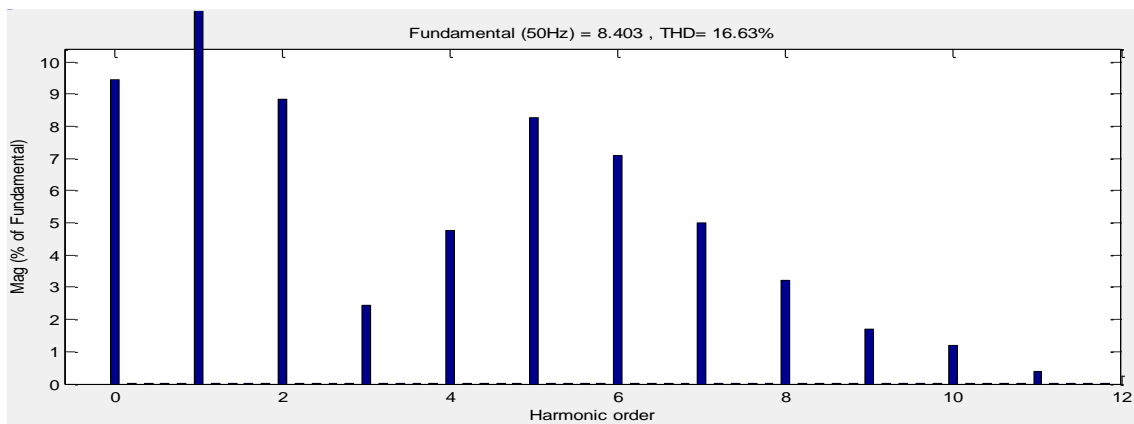


b- Courant injecté ib

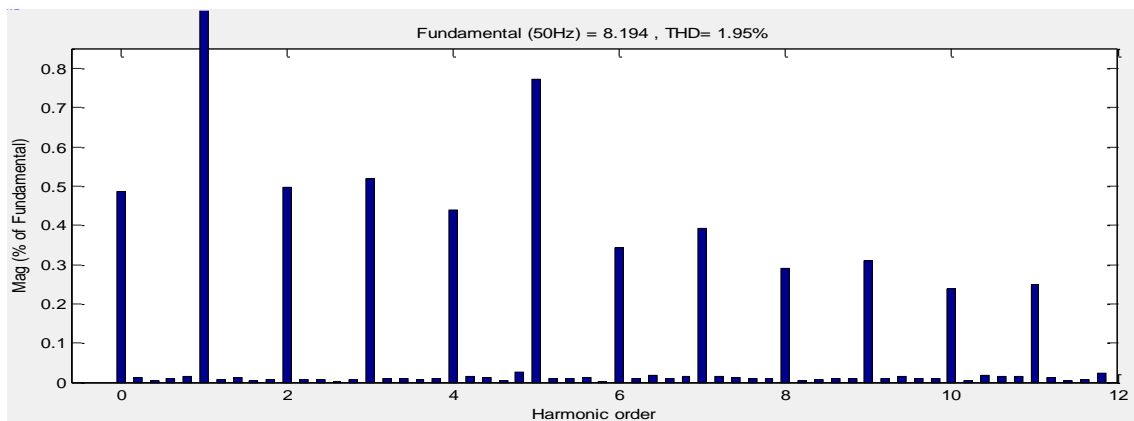


c- Courant injecté i_c

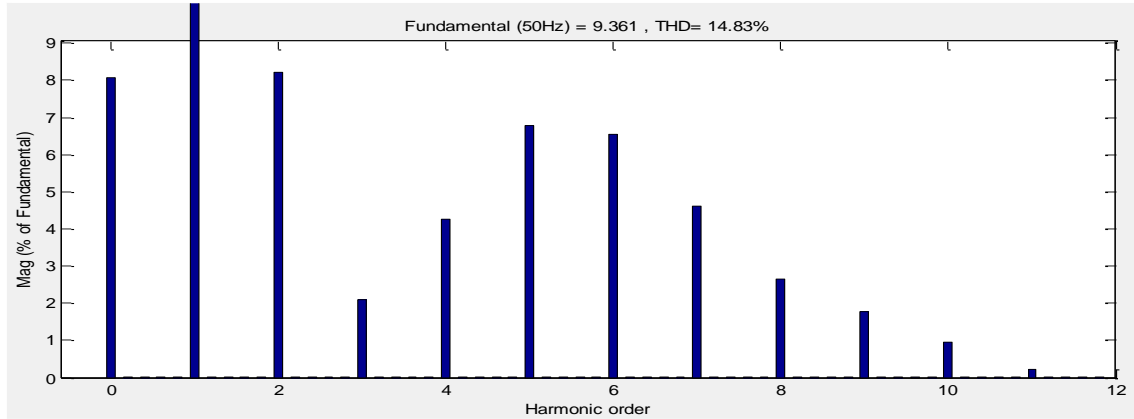
Figure III.6 : Forme des courants injectés dans le cas d'un circuit ouvert de T1 FAP



a- Spectre harmonique du courant de source i_a



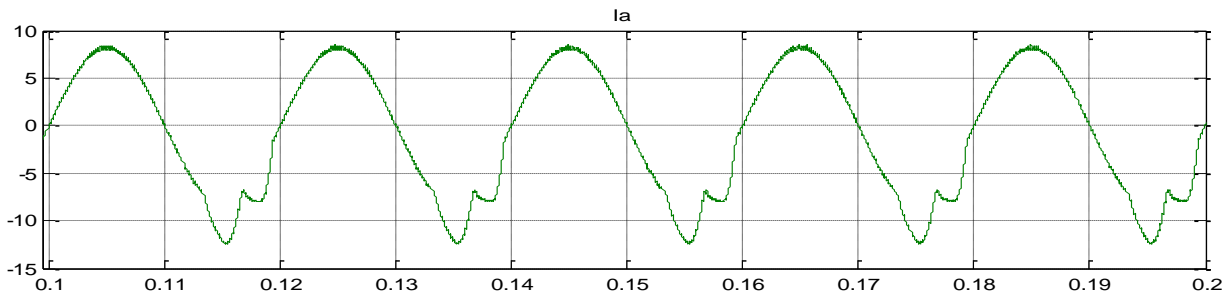
b- Spectre harmonique du courant de source i_b



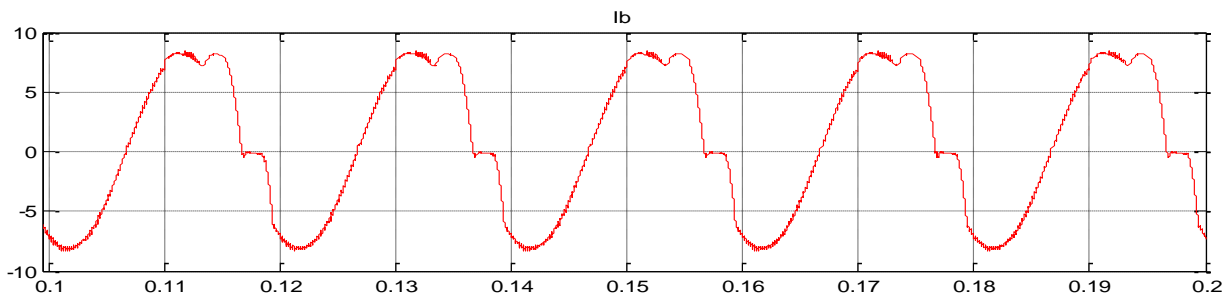
c- Spectre harmonique du courant de source i_c

Figure III.7 : THD des courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T1 FAP

Transistor T2 (2^{ème} bras haut) maintenu ouvert



a- Courant de source i_a



b- Courant de source i_b

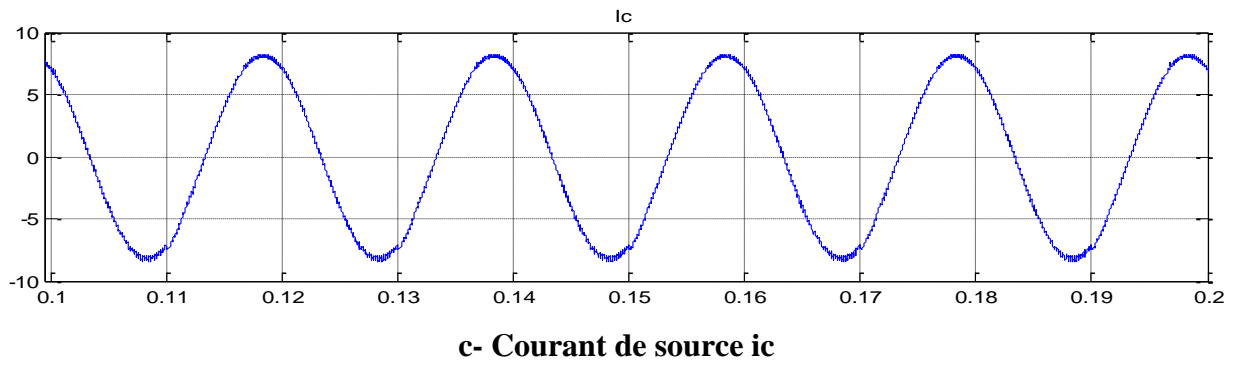


Figure III.8 : Forme des différents courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T2 FAP

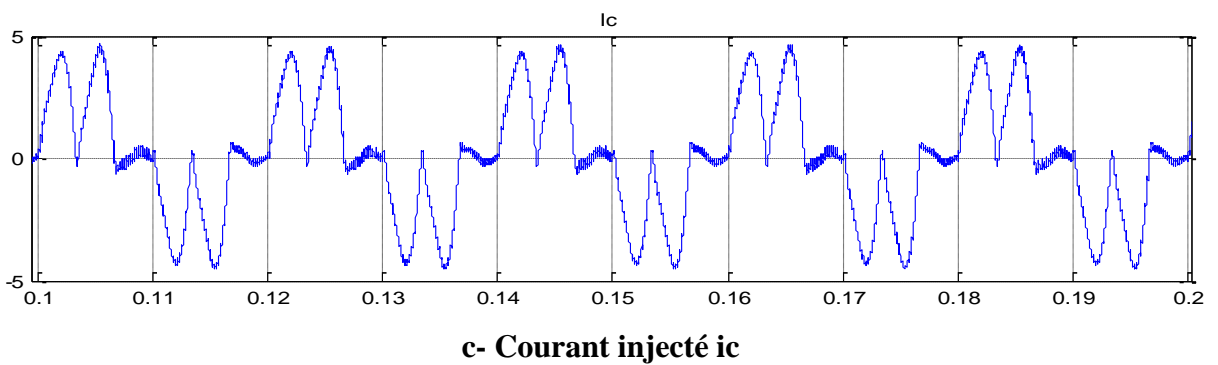
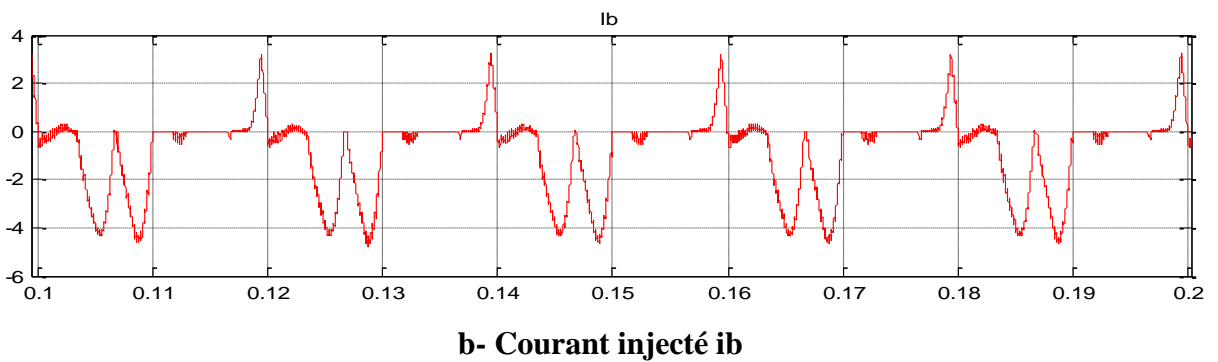
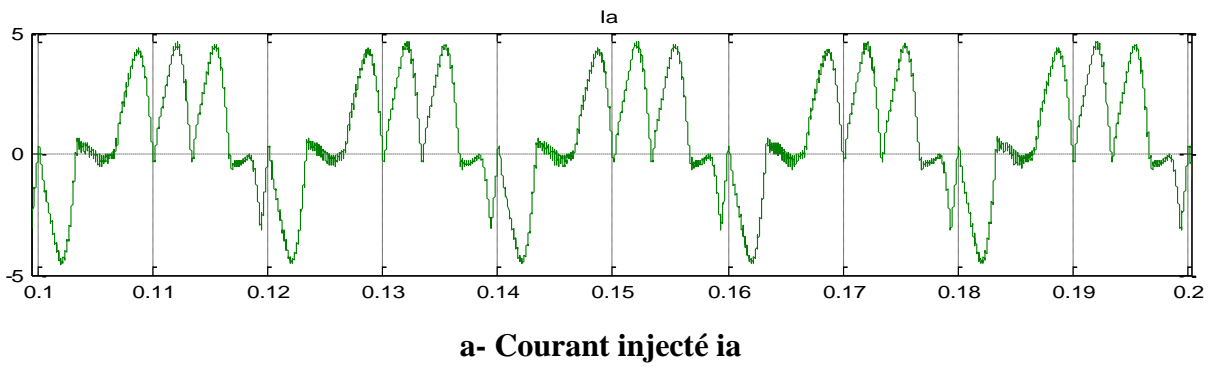
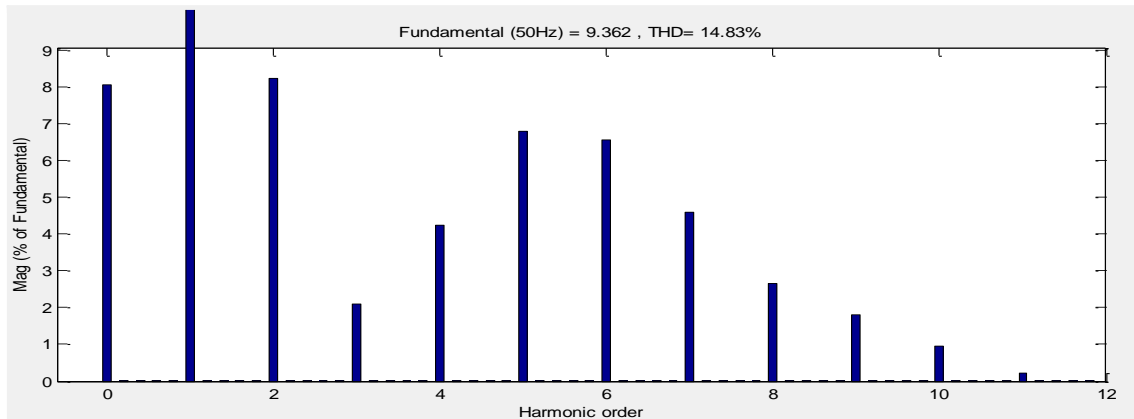
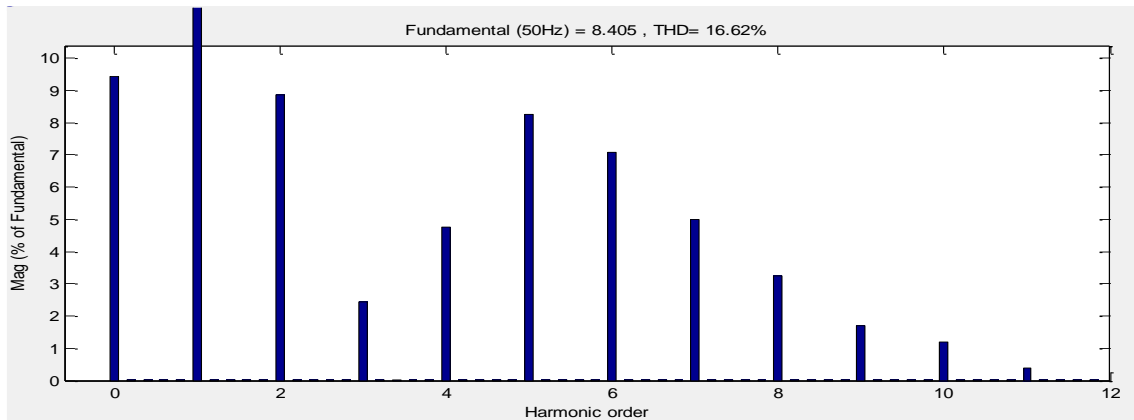


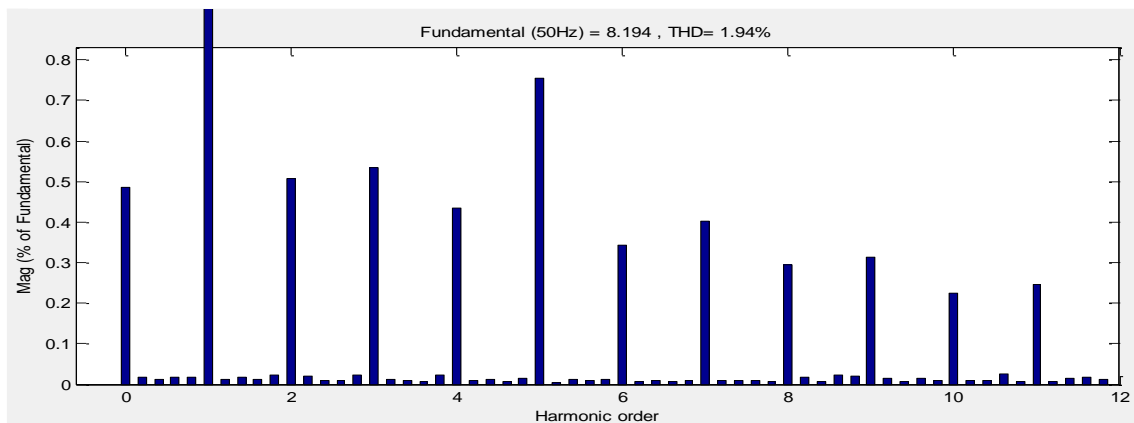
Figure III.9 : Forme des courants injectés dans le cas d'un circuit ouvert de T2 FAP



a- Spectre harmonique du courant de source ia



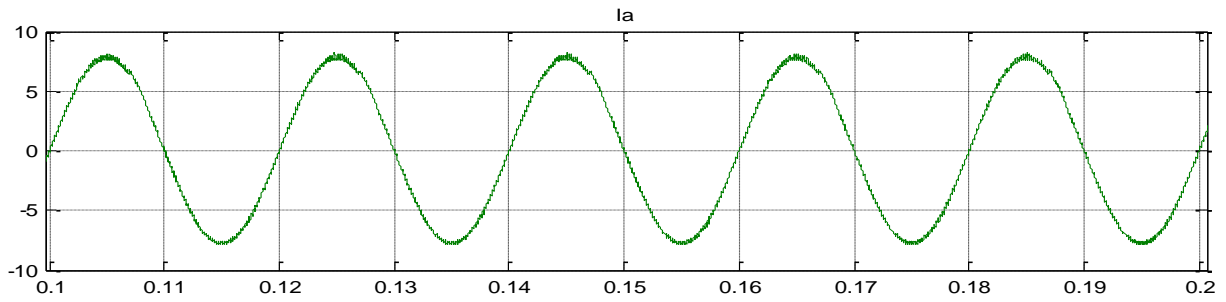
b- Spectre harmonique du courant de source ib



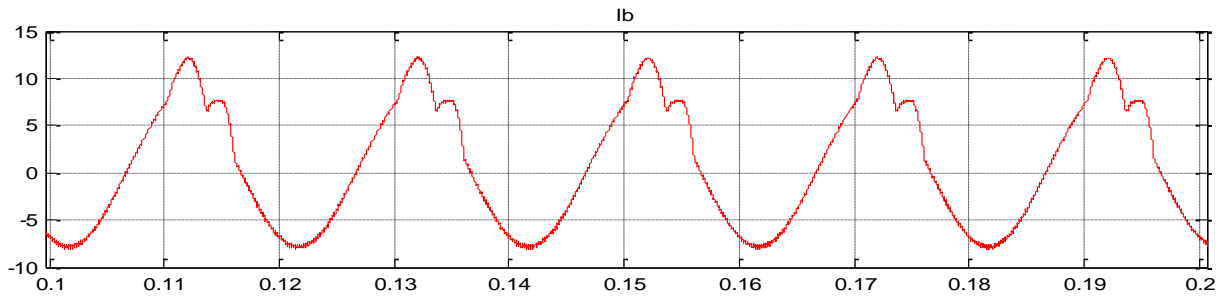
d- Spectre harmonique du courant de source ic

Figure III.10 : THD des courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T2 FAP

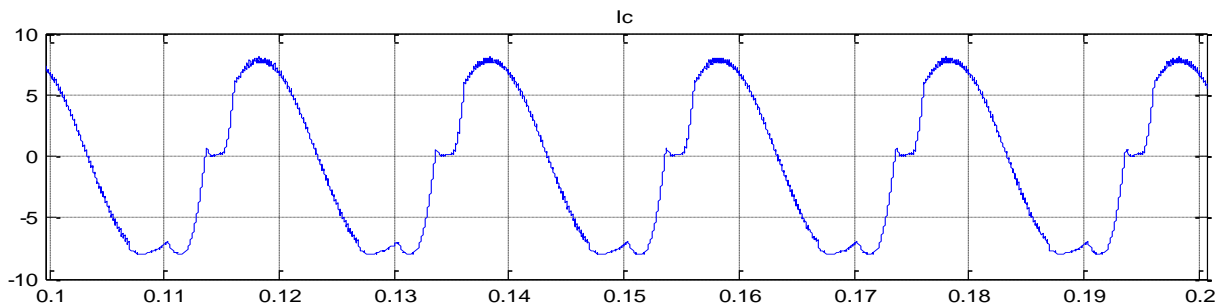
Transistor T6 (3^{eme} bras bas) maintenu ouvert



a- Courant de source ia



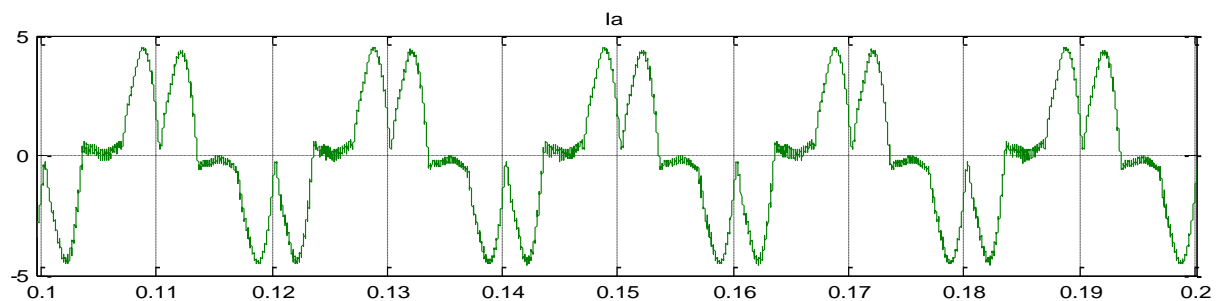
b- Courant de source ib



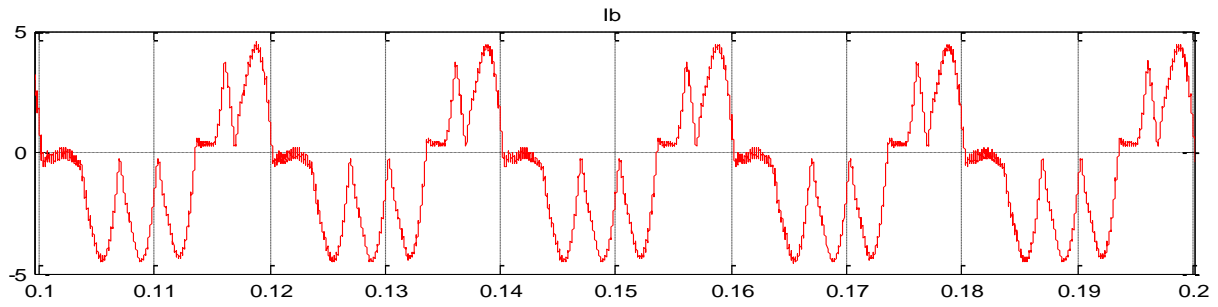
c- Courant de source ic

Figure III.11 : Forme des différents courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T4

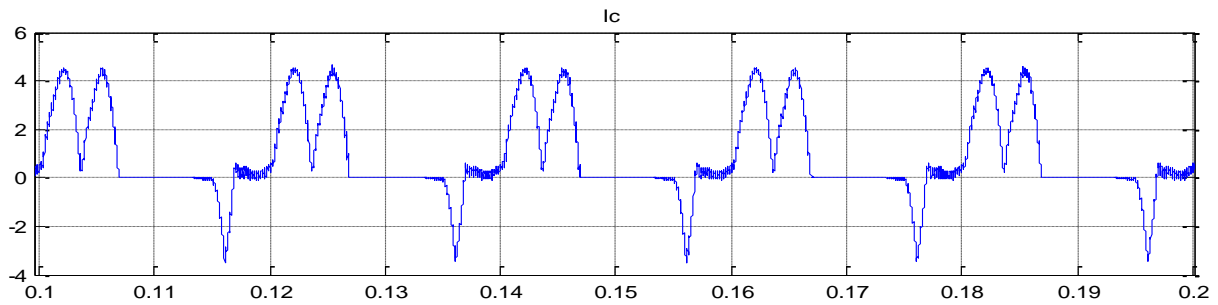
FAP



a- Courant injecté ia

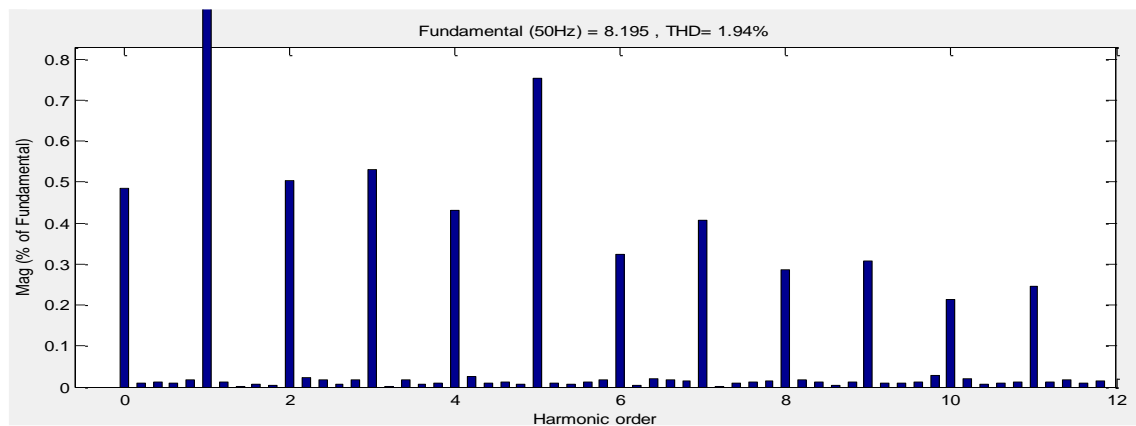


b- Courant injecté ib

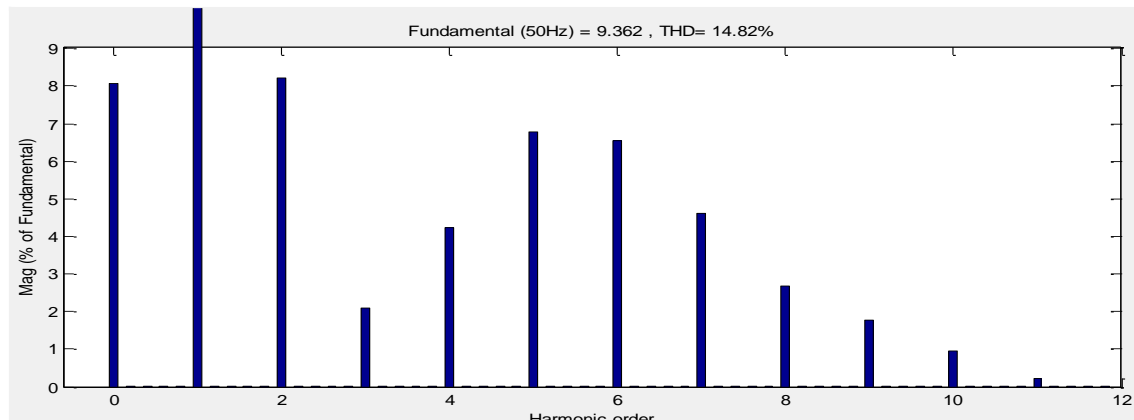


c- Courant injecté ic

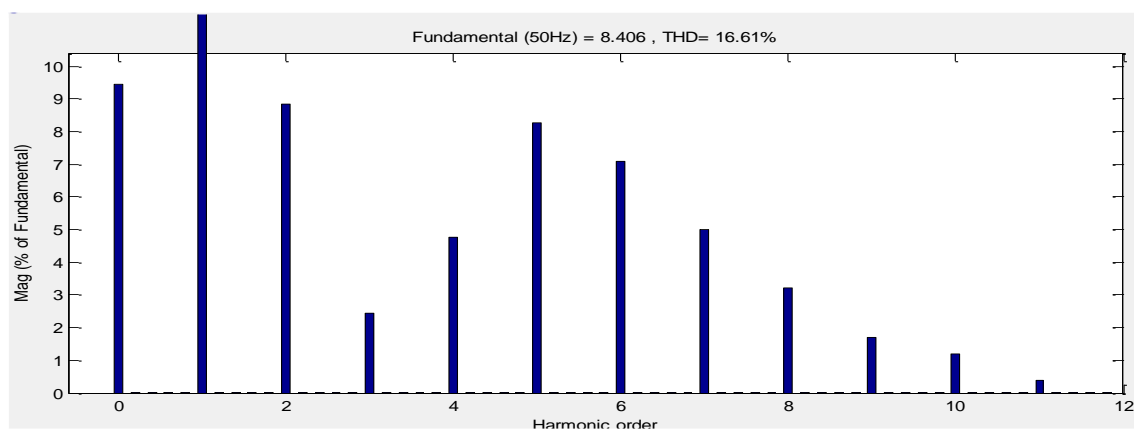
Figure III.12 : Forme des courants injectés dans le cas d'un circuit ouvert de T6 FAP



a- Spectre harmonique du courant de source ia



b- Spectre harmonique du courant de source ib



c- Spectre harmonique du courant de source ic

Figure III.13 : THD des courants de source dans le cas d'un circuit ouvert de T6 FAP

Après l'apparition du défaut sur l'un des interrupteurs, celui-ci sera visible soit sur l'alternance positive du courant (défaut sur IGBT supérieur), soit sur l'alternance négative (défaut IGBT inférieur).

Si le transistor maintenu ouvert est un des transistors du haut (T1, T2 et T3), le courant de la phase du FAP liée au bras dont le transistor est défaillant perd la quasi-totalité de la partie positive de sa forme, tout en conservant sa nature périodique et sa période. Les courants des autres phases perdent une partie de leurs parties négatives.

Si le transistor défaillant est un des transistors du bas (T4, T5 et T6), le courant de la phase du FAP liée au bras dont le transistor est défaillant perd la quasi-totalité de la partie négative de sa forme et présente une valeur moyenne positive, tout en conservant sa nature périodique et sa période. Les courants des autres phases perdent une partie de leurs parties positives, présentant ainsi des composantes continues négatives.

III.5. CONCLUSION

Les défauts quel qu'ils soient sont nuisible dans un système de production. La production d'une énergie électrique ne fait pas exception en face à ces nuisances. Les causes et les conséquences sont différentes et multiples comme nous avons pu observer en parcourant ce chapitre.

L'étude de l'influence d'un défaut de type circuit ouvert sur un système à base de FAP conduit à conclure que le défaut existe mais il peut être immédiatement identifiable lors de l'observation du courant de source. Le but étant de diagnostiquer le défaut de type circuit ouvert au niveau de la ligne de production électrique en présence d'un système de filtrage FAP. Plusieurs méthodes et approches en vue le jour auparavant, nous allons dans le chapitre qui suit, mettre en évidence les outils mentionnés dans le premier chapitre et ainsi finalisé le travail de cette thèse par un diagnostic efficace et une commande tolérant aux défauts.

IV.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous allons chercher à identifier les informations fournies par les différentes mesures de courants et tensions et d'essayer de les exploiter pour détecter et localiser le défaut de type circuit ouvert lorsqu'il intervient sur notre système à base de filtre FAP. Ces informations sont extraites à partir du domaine temporel et du domaine fréquentiel en utilisant la magnitude de la transformée de Fourier et la valeur maximale et Skewness. L'exploitation de ces données est faite par le réseau de neurones choisis, qui est responsable de la classification des différents états de notre filtre FAP. Après détection et localisation du défaut une commande tolérante sera étudiée afin de remédier au défaut engendré par l'interrupteur défectueux. Une simulation en utilisant le SIMULINK de MATLAB permettra d'étudier l'influence du défaut circuit ouvert et de valider les performances du système de diagnostic et de contrôle "faulttolerant" proposé.

Nous allons au début de ce chapitre donner un aperçu sur la commande tolérante et les techniques utilisées dans les filtres pour l'appliquer. Dans un deuxième temps, nous aborderons la partie diagnostic à base de RNA. Nous étudierons les performances de diagnostic d'un point de vue classification des états sains et défectueux de notre filtre FAP. La fin du chapitre, sera consacré à l'étude de la partie commande tolérante du filtre actif FAP.

IV.2. LA COMMANDE TOLERANTE AUX DEFAUTS

Un système tolérant aux défauts possède la capacité de maintenir les objectifs nominaux en dépit de l'occurrence d'un défaut et à s'en accommoder de manière automatique. Il permet notamment de garantir la stabilité du système et/ou des performances acceptables en présence de défauts [42,43]. En dépit du fait qu'un schéma classique de commande permet de garantir la stabilité et les performances désirées du système dans le cas nominal, il s'avère très limité et peut guider le système vers des comportements non commandés, voire à l'instabilité, en présence d'un défaut. Pour pallier à de telles insuffisances, des lois de commande particulières, prenant en compte l'effet du défaut, ont été développées dans le but précis de protéger les performances souhaitées.

Dans les applications industrielles complexes telles que l'aéronautique ou le nucléaire, le problème de la tolérance aux défauts est souvent traité au moyen de la redondance matérielle. Cette stratégie est non seulement onéreuse mais elle requiert également un important dispositif de maintenance. La commande tolérante aux défauts avoisinée par des approches analytiques, permet

d'éviter des coûts élevés de financement et d'entretien. La tâche principale dans un système de commande tolérante aux défauts est la synthèse de lois de commande avec une structure adéquate permettant de garantir la stabilité du système et maintenir les performances de commande proches de celles désirées, non seulement lorsque tous les composants de la commande sont opérationnels, mais aussi lorsqu'il y a des défaillances aux niveaux des capteurs, des actionneurs ou du système. Les travaux de recherches menés dans ce cadre depuis deux décennies sont nombreux [42, 43,46]. Le principe de la commande tolérante aux défauts est illustré par le schéma de la figure IV.1.

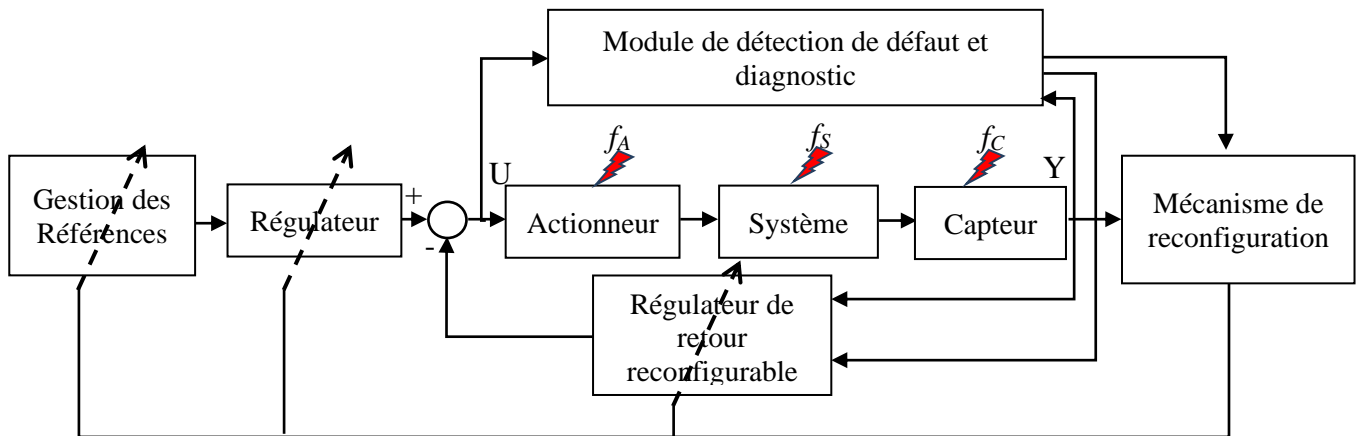


Figure IV.1: Principe d'un système de commande tolérante aux défauts [46].

IV.2.1. Classification des méthodes de la commande tolérante aux défauts

Les méthodes de synthèse des systèmes de commande tolérante aux défauts sont généralement classées en deux grandes familles : les approches passives (Passive FaultTolerant Control Systems : PFTCS) et les approches dites actives (Active FaultTolerant Control Systems : AFTCS). Les méthodes passives sont équivalentes aux méthodes de synthèse de lois de commande robuste. Les méthodes actives sont généralement classifiées en trois sous classes : l'accommodation de défauts, la reconfiguration du système et la restructuration [47]. Le diagramme de la figure IV.2 illustre cette classification.

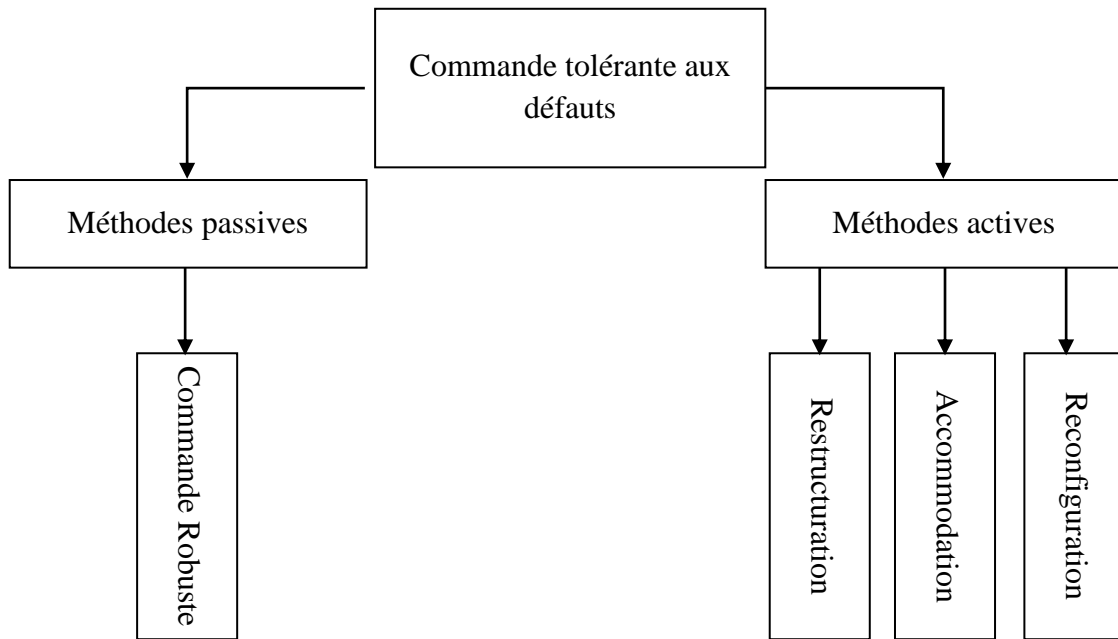


Figure IV.2: Classification des commandes tolérante aux défauts [48]

IV.2.1.1. Approche passive

Dans l'approche passive, les techniques de commande robuste sont utilisées de manière à ce que le système en boucle fermée reste insensible à un certain ensemble de défauts. La tolérance aux défauts est assurée sans utilisation des informations en ligne relatives aux défauts affectant le système et sans changer la structure des régulateurs nominaux [49, 50]. Les défauts, considérés comme étant des sources de perturbations, sont alors pris en compte dans la conception du système de commande (figure IV.3). La synthèse de lois de commande, de l'approche passive, est basée sur l'utilisation sur les techniques de commande robuste par rapport aux incertitudes paramétriques et perturbations extérieures (commande H_∞ , commande en mode glissant, . . .). Pour avoir une vue globale des méthodes des commandes robustes [51]. Ce type d'approche n'a besoin ni d'un module de diagnostic pour détecter la présence des défauts ni d'un bloc de reconfiguration de la loi de commande et/ou des paramètres du système [48].

De nombreuses méthodes passives de la commande FTC, utilisant les techniques de la commande robuste basées sur la minimisation d'un critère, ont été développées. Une méthodologie basée sur la minimisation d'un critère LQG (Linear Quadratic Gaussian) pour synthétiser le correcteur FTC a été proposée [52]. Dans cette méthodologie, l'effet des défauts sur le système a été modélisé par un processus aléatoire.

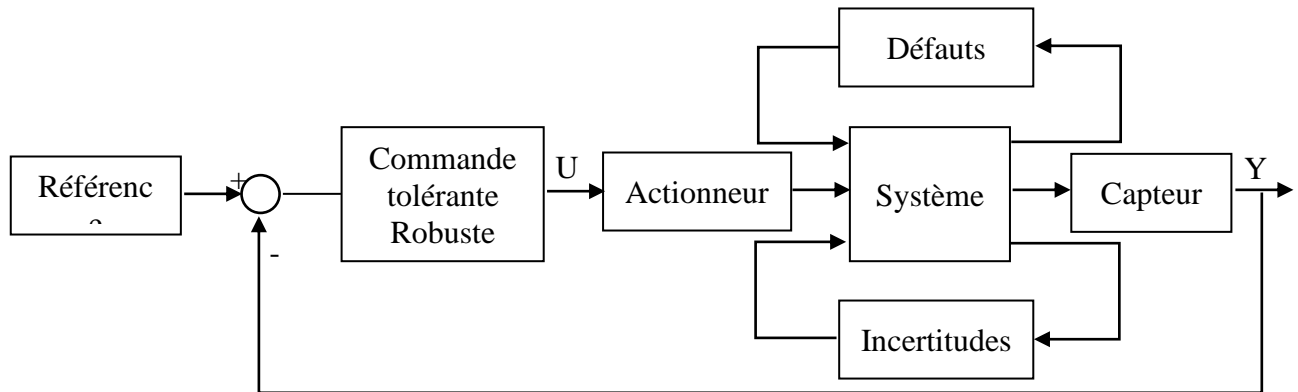


Figure IV.3 : Schéma de principe d'une loi de commande FTC passive.

Bien que les lois de commande tolérante aux défauts de l'approche passive soient simples à mettre en œuvre, elles présentent un faible niveau de performance. En fait, la robustesse vis-à-vis de certains défauts, qui ne se produisent que rarement, est obtenue au détriment d'un niveau de performance dégradé en mode de fonctionnement sans défauts. Il est évident que cette dégradation des performances sera plus importante si le nombre de défauts prédéfinis est important. Les techniques passives peuvent s'avérer suffisante dans certaines applications où l'ensemble de défauts est restreint.

IV.2.1.2. Approche active

Les méthodes de la commande tolérante aux défauts dites actives, réagissent à l'apparition d'un ou plusieurs défauts en reconfigurant en ligne la loi de commande de manière à maintenir la stabilité et les performances nominales du système [45, 46, 53]. Des outils efficaces de détection et d'isolation des défauts sont alors nécessaires pour détecter et localiser, en ligne, les défauts affectant le système.

L'architecture générale d'une commande FTC active est illustrée dans la figure IV.4. Les deux blocs FDI (Faults Detection and Isolation) et FTC, constituent les deux étapes importantes de la commande.

1. Le bloc « FDI » utilise l'entrée et les sorties mesurées du système pour détecter et estimer, en ligne, le défaut ainsi que les variables d'état du système. Une fois que le défaut est apparu, le bloc « FDI » fournit en ligne les informations concernant le défaut et l'état du système au bloc « FTC ». Le module FDI doit permettre de prendre en compte les différents types de défauts intervenant sur le

système et d'assurer la fiabilité de ces informations pour activer le mécanisme de reconfiguration en un temps minimal.

2. Le bloc « FTC » se base sur les informations délivrées par le bloc « FDI ». En fonction du mécanisme utilisé et du type du défaut présenté, il accommode ou reconfigure en ligne la loi de commande afin de maintenir la stabilité, la dynamique du système ainsi que ses performances nominales [48].

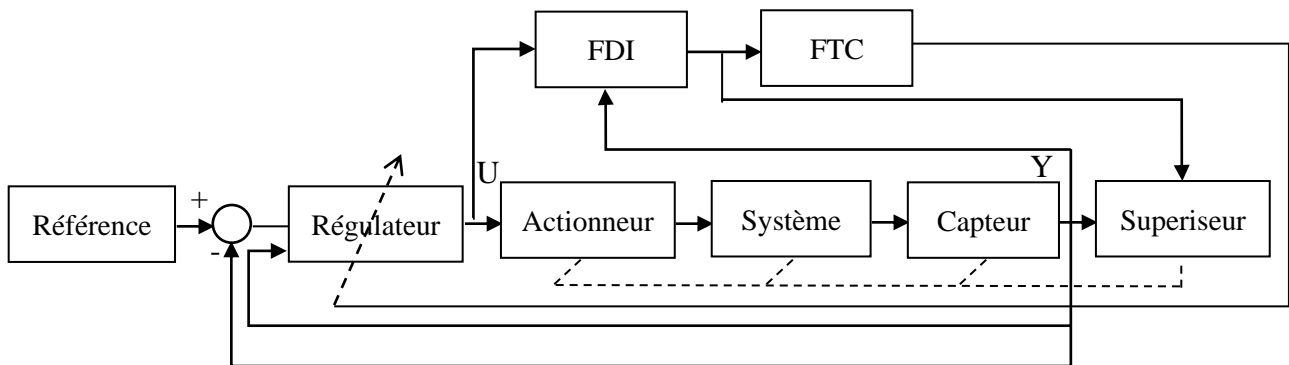


Figure IV.4: Schéma de principe d'une loi de commande FTC active [54].

La figure IV.4 montre que la commande FTC active contient un superviseur. Son principe est le suivant : sans défaut, la commande nominale qui a été déterminée au préalable pour le système « parfait » rejette les perturbations et assure la stabilité du système en boucle fermée. Dans ce cas le bloc « FDI » ne détecte aucun défaut et la loi de commande ne subira aucun changement. Si un défaut se produit, le bloc « FDI » le détecte, l'isole et l'identifie. Ensuite le bloc « FTC » donne une nouvelle loi de commande capable de stabiliser le système défectueux.

Généralement, trois types de configurations sont possibles : accommodation des défauts, reconfiguration du système et restructuration. Dans le cas de la reconfiguration, seuls les défauts de faibles amplitudes sont pris en compte. La nouvelle loi de commande est générée par l'adaptation en ligne des paramètres des entrées/sorties du régulateur et le système à commander reste inchangé [55]. La reconfiguration du système est utilisée dans le cas où les parties défaillantes ne peuvent pas être accommodées [56, 57, 58, 59]. Elle est caractérisée par la modification de la structure du système de façon à compenser le défaut. La restructuration consiste à synthétiser une nouvelle loi de commande en modifiant la structure et les paramètres du régulateur [60]. Elle est utilisée dans le cas où le problème de commande ne peut pas être résolu en utilisant l'accommodation ou la reconfiguration.

Le grand inconvénient de l'approche active est la limitation du temps disponible pour recalculer la nouvelle loi de commande à chaque instant de détection d'un défaut [48].

IV.2.2. Topologies "faulttolerant" pour les filtre actifs

Il existe deux topologies classiques de convertisseurs triphasés à structure tension : les topologies dites "trois bras" et "deux bras". A partir de ces topologies, on peut donc envisager deux topologies "faulttolerant" [35,36, 61, 62], décrites à la figure IV.5.

La première topologie (figure IV.5a) comporte un bras supplémentaire destiné à remplacer le bras défectueux en cas de défaillance. Pour cette topologie et après reconfiguration, le fonctionnement du convertisseur reste inchangé car le convertisseur a la même topologie après reconfiguration qu'avant l'apparition du défaut [35,36, 61, 62].

Dans le cas de la deuxième topologie (figure IV.5b), le convertisseur passe d'une topologie "trois bras" avant reconfiguration à une topologie "deux bras" après reconfiguration. Pour atteindre des performances satisfaisantes après reconfiguration, la tension de référence v_{dc-ref} doit être doublée par rapport à la référence de la topologie initiale à "trois bras". Ainsi, les semi-conducteurs employés dans cette deuxième topologie "faulttolerant" doivent supporter des tensions deux fois plus grandes que dans le cas de la première topologie [35,36, 61, 62].

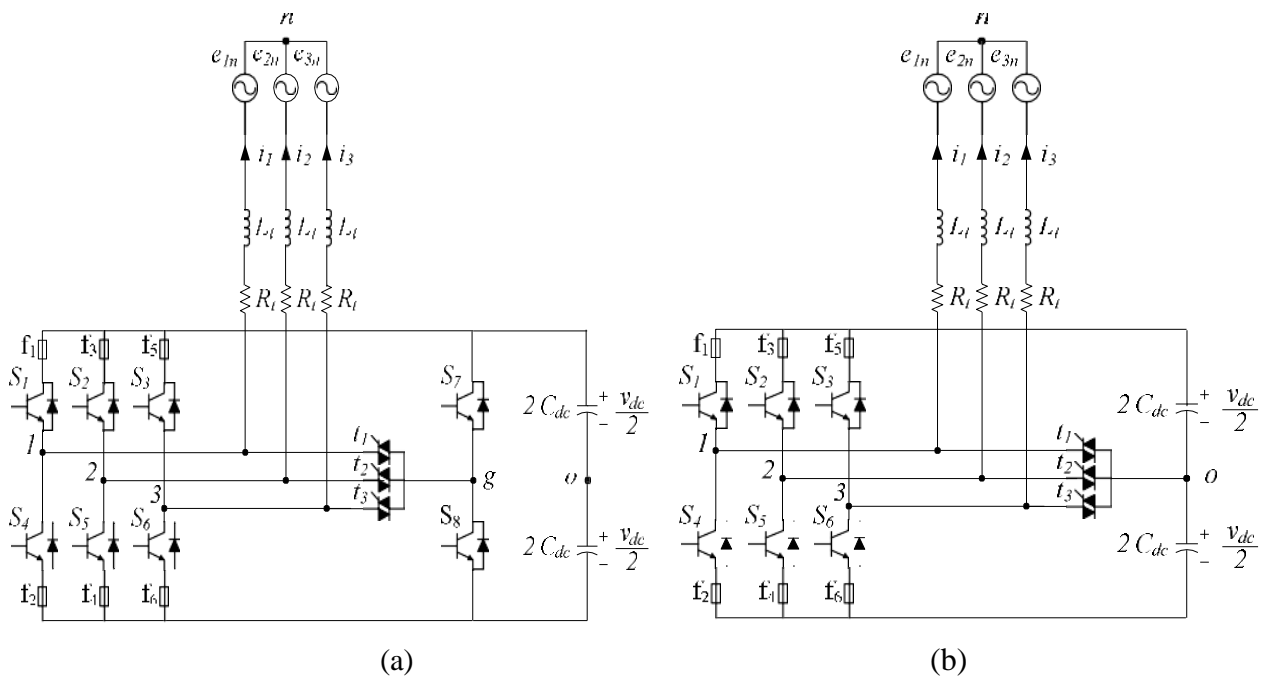


Figure IV.5 : Topologies "faulttolerant": (a) avec bras redondant; (b) sans bras redondant.

IV.3. STRATEGIE DE DIAGNOSTIC APPLIQUEE AU SYSTEME DE FILTRAGE ACTIF PARALLEL

Dans cette section, on adopte une topologie de convertisseur tolérant aux défauts à base de bras redondant pour garantir la continuité de service du système de transport d'énergie (figure IV.6). En effet pour les trois bras du convertisseur on associe un bras redondant/ou de secours. Ce bras s'activera lors de l'apparition d'un défaut. Lorsqu'un défaut apparaît sur l'un des transistors du convertisseur, il doit être détecté et isolé le plus rapidement possible. L'isolation du composant défaillant s'effectue en éliminant sa commande et en appliquant l'ordre de commande de l'interrupteur défectueux aux interrupteurs de secours. Après détection du défaut un signal d'alerte pour le remplacement du bras défaillant est lancé.

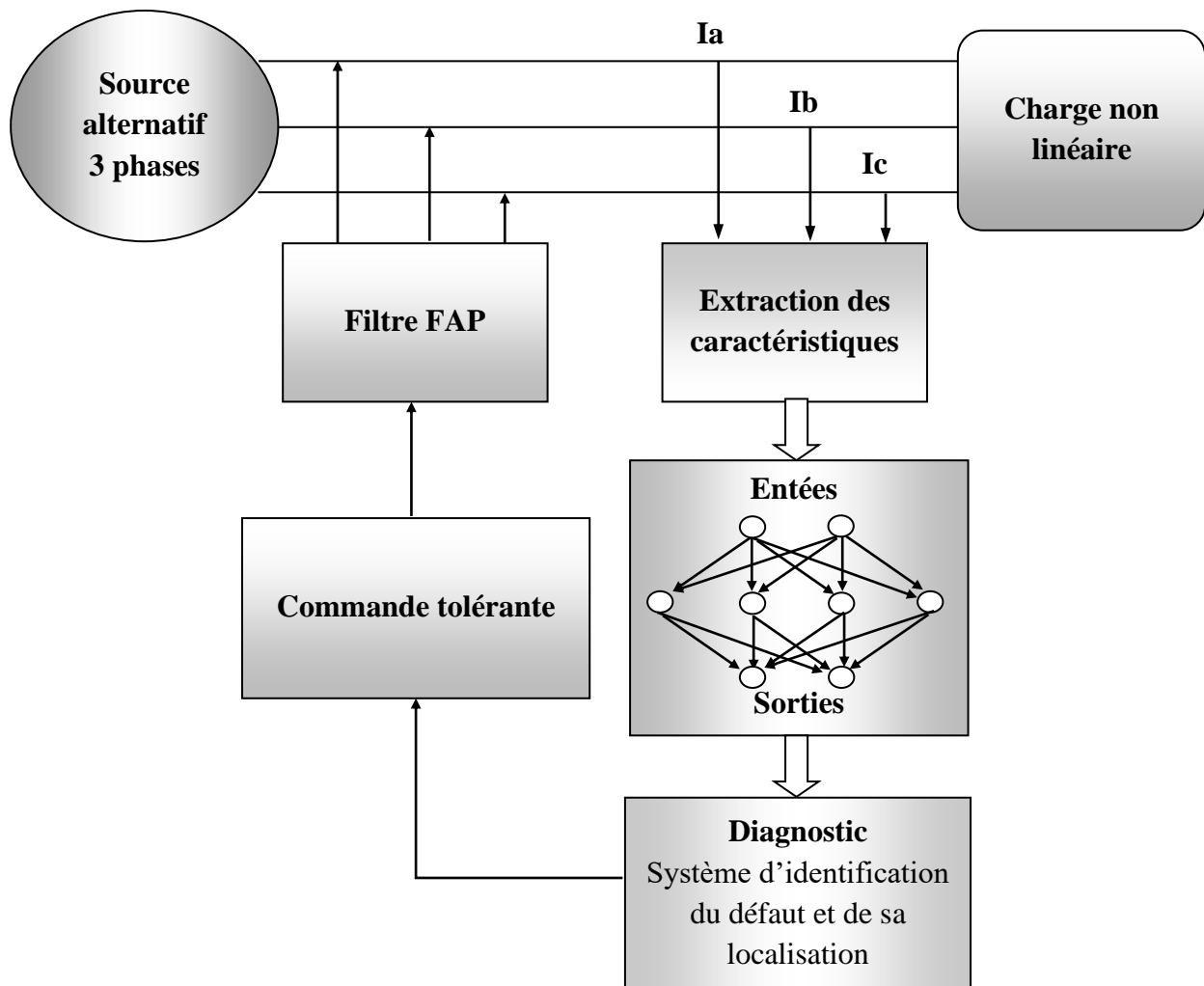


Figure IV.6 : Structure du système de diagnostic

Les étapes pour la mise au point du système de diagnostic de défauts pour le filtrage FAP consiste dans le choix de l'architecture du RNA, l'extraction des caractéristiques pour l'apprentissage et le test du RNA, cette première procédure permet la détection et la localisation du défaut.

L'étude et l'analyse de l'utilisation des RNA dans le diagnostic peuvent être regroupées selon l'organigramme suivant [63]:

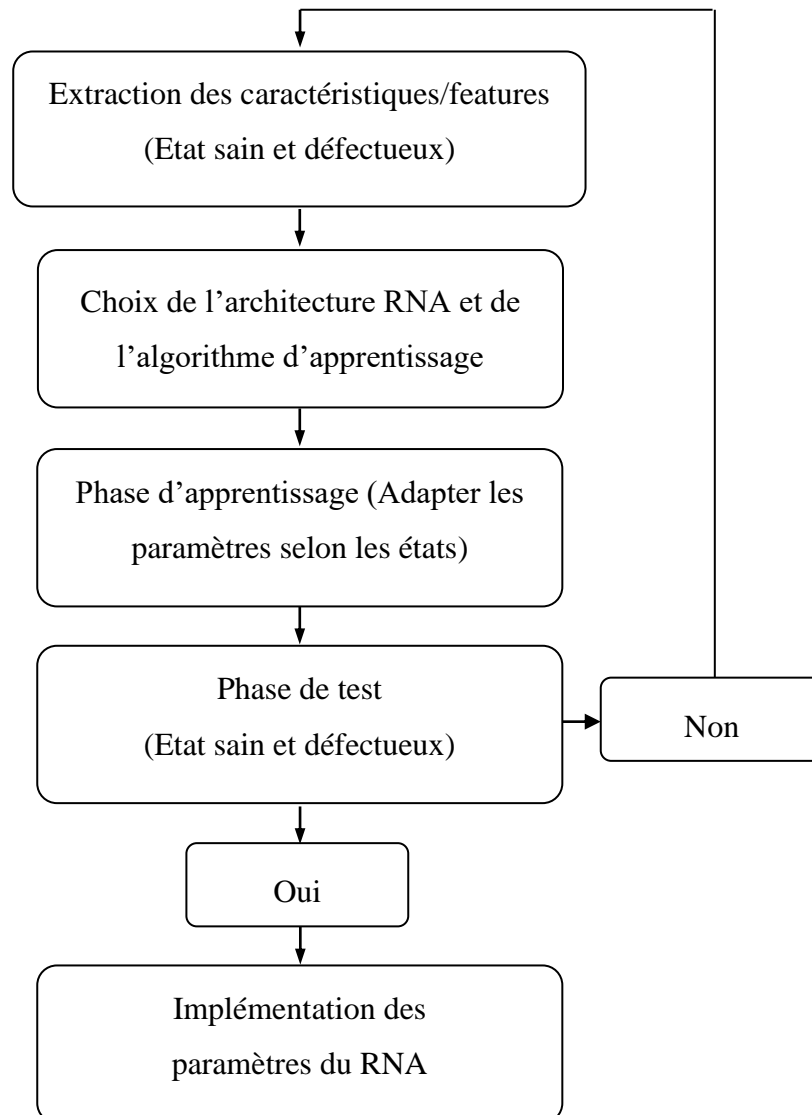


Figure IV.7: Organigramme de diagnostic par RNA

Les étapes pour la mise au point du système à commande tolérante pour le filtrage à base d'UPQC et le même décrit dans le chapitre 2, il consiste dans le choix de l'architecture du RNA,

l'extraction des caractéristiques pour l'apprentissage et le test du RNA, cette première procédure permet la détection et la localisation du défaut. On ajoute à cela la procédure de continuité de service qui consiste à isoler le bras défectueux et le changer. Une fois terminée nous pouvons simuler et étudier les caractéristiques de notre système tolérant aux défauts. En cas d'apparition d'un défaut au niveau du bras numéroté k ($k = \{1, 2, 3\}$), la continuité de service est réalisée selon les étapes suivantes :

- Détection de l'apparition d'un défaut ;
- Localisation du filtre défectueux ;
- Détection du bras défectueux numéroté k , ainsi que de l'interrupteur ;
- Mise à '0' des ordres de commande des deux interrupteurs du bras défectueux ;
- Commande à la fermeture de l'interrupteur bidirectionnel t_k ;
- Application des ordres de commande des interrupteurs du bras défectueux aux interrupteurs de secours;
- Arrêt de la fonction "détection de défaut";
- Lancer la procédure de remplacement (maintenance) en indiquant le bras et l'interrupteur défectueux.

IV.3.1. Partie diagnostic d'un défaut type circuit ouvert

IV.3.1.1. Extraction des caractéristiques pour l'apprentissage du RNA

Les différentes caractéristiques qui seront utilisées pour l'apprentissage et le test de notre système de diagnostic et commande tolérante aux défauts seront extraites des différents capteurs de courants et tensions se trouvant au niveau de la ligne de production électrique. La figure IV.7 donne la topologie générale du filtrage FAP d'une ligne de production électrique. B1, B2 et B3 représentent les différents capteurs et leurs positions dans la ligne électrique.

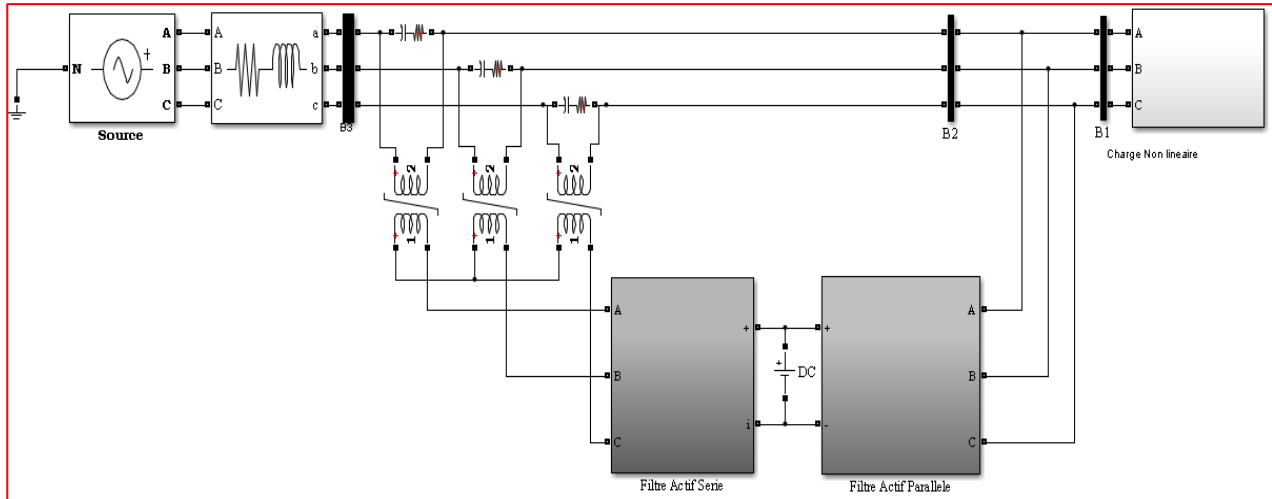


Figure IV.8 : Ligne de production électrique et filtre actif FAP

La transformé de Fourier Rapide (FFT)

Comme nous l’avons mentionné auparavant la transformé de Fourier rapide met en évidence les propriétés cachés dans le domaine temporel et les fait apparaitre dans le domaine spectral. Afin d’optimiser notre système de détection et de localisation du défaut nous utilisons la FFT et plus précisément la magnitude.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-jn\omega k} \tag{01}$$

Avec

$$\omega_k = \frac{2\pi k}{N}, \text{ Fréquence d'ordre } k \text{ de la sinusoïde.}$$

L’équation de la magnitude est donnée comme suit :

$$\text{Magnitude[FFT(X)]} = \sqrt{(\text{réel[FFT(X)]})^2 + (\text{imag[FFT(X)]})^2} \tag{02}$$

C’est cette dernière équation qui sera prise en considération lors de l’élaboration de la base de données.

Le Skewness: représente le moment statique d’ordre 3 centré sur le cube de l’écart-type. Il mesure la symétrie de la distribution, ou plus précisément le manque du signal. Il est défini comme suit :

$$S_{kew} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(\sigma)^3} \quad (07)$$

IV.3.1.2. L'architecture du réseau de neurones artificiel

En prenant en compte les critères pour choisir une architecture du RNA et après des tests, le tableau IV.1 donne des détails sur l'architecture du réseau choisit.

Nombre de neurones de la couche d'entrée	06	3 neurones pour le skewness du courant 3 neurones pour le max (magnitude (FFT(FAP)))
Nombre des neurones de la couche de sortie	4	Sortie désirée = [X XXX]; X= 0 ou 1.
Nombre de couche cachée	2	
Nombres de neurones pour chaque couche cachée	Couche 1: 7 Couche 2: 4	
Nombre d'itération	10000	
Erreur quadratique moyenne	0.0001	
Algorithme d'apprentissage	LM	Algorithme de Levenberg marquadt

Tableau IV.1: Architecture propose pour le RNA

La sortie désiré ([X XXX]; X= 0 ou 1) est donnée en détail dans le tableau IV.2.

	0 0 1: TR1 (bras haut)
	0 1 0: TR3 (bras haut)
1: Etat sain	0 1 1: TR5 (bras haut)
0: Etat défectueux	1 0 1: TR2 (bras bas)
	1 1 0: TR4 (bras bas)
	1 1 1: TR6 (bras bas)

Tableau IV.2 : la sortie désirée pour l'état sain et défectueux du système FAP

IV.3.1.3. Critères d'évaluation pour le système de diagnostic automatique

Dans les projets de classification, il est primordial d'avoir des critères d'évaluation pour être en mesure de comparer les performances du modèle choisit. Afin d'évaluer les performances de notre système de diagnostic automatique à base de réseaux de neurones artificiel, nous utiliserons l'outil statistique (la matrice de confusion). La matrice de confusion (tableau I.1) est un outil performant et bien adapté aux problèmes de classification. La matrice de confusion sert à évaluer les modèles. Les valeurs qu'on y retrouve nous aident par la suite à calculer les critères d'évaluation soit la sensibilité, la spécificité, et le taux de bonne classification. Les critères suivants sont régulièrement utilisés [29, 30, 31, 32,33] :

• **La sensibilité (Sensitivity)**: Elle représente la proportion de vrais positifs qui ont été correctement identifiés par le modèle :

$$\text{Sensitivity} = \frac{\text{FP}}{\text{FP} + \text{FN}} ; \quad (12)$$

• **La spécificité (Specificity)** : C'est la proportion de vrais négatifs qui ont aussi été correctement identifiés par le modèle :

$$\text{Specificity} = \frac{\text{VN}}{\text{VN} + \text{FP}} ; \quad (13)$$

• **Le taux de classification (Classification accuracy)** : c'est le pourcentage des exemples correctement classés, il est calculé par :

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{VN} + \text{VP}}{\text{VN} + \text{VP} + \text{FN} + \text{FP}}. \quad (14)$$

Avec :

- VP : Vrai Positif : nombre de positifs classés positifs.
- VN : Vrai Négatif : nombre de négatifs classés négatifs.
- FP : Faux Positif : nombre de négatifs classés positifs.
- FN : Faux négatif : nombre de positifs classés négatifs

	Prédiction : Dans cet intervalle	Prédiction : non présent dans cet intervalle
Observé : Dans cet intervalle	Vrai positif (VP)	Faux négatif (FN)
Observé : Non présent dans cet intervalle	Faux positif (FP)	Vrainégatif (VN)

Tableau IV.3 Matrice de confusion

La matrice de confusion est obtenue grâce à l'ensemble de donnée de test. Celle-ci est passée dans le modèle prédictif et la variable à prédire est comparée à la variable obtenue par le modèle. Par exemple, si le prédicteur donne 1 à la sortie pour un individu prédit alors que dans la donnée de test la classe de l'individu en question est 0, il s'agit d'un faux négatif. Grâce à la matrice de confusion, nous pouvons calculer les différents taux.

IV.3.1.4. Performances du système de diagnostic

À cette étape, les caractéristiques calculées à partir des informations mesurées des différents capteurs sont rassemblés dans une base de données. Pour garantir une estimation non biaisée des résultats de classement, le jeu de données a préalablement été scindé en deux ensembles (ensemble d'apprentissage et l'ensemble de test) par un tirage aléatoire. Les performances du système de classification ont été évaluées en termes de taux de classification, de sensibilité et spécificité

Etat	Sortie désiré X= 0 or 1	Critères d'évaluation(%)		
		sensibilité	spécificité	Taux de classification
Défaut du FAP	0 0 0 0 1: T1	96.20%	97.01%	97.6%
	0 0 0 1 0: T3			
	0 0 0 1 1: T5			
	0 0 1 0 1: T2			
	0 0 1 1 0: T4			
	0 0 1 1 1: T6			

Table IV.4. Performances statistiques du modèle RNA choisit

IV.3.2.Partie commande tolérante du défaut

La simulation de la commande tolérante aux défauts proposés pour la topologie UPQC est réalisée selon la figure IV.9 pour les deux filtres actifs (FAP et FAS). En effet, chaque filtre possède son propre bras de secours, ainsi le système peut fonctionner même si un deuxième défaut intervient sur le deuxième filtre. Le scénario consiste à isoler le premier bras correspondant à la phase supposé défectueux et reconfiguré la commande et l'architecture pour assurer la continuité de service du système.

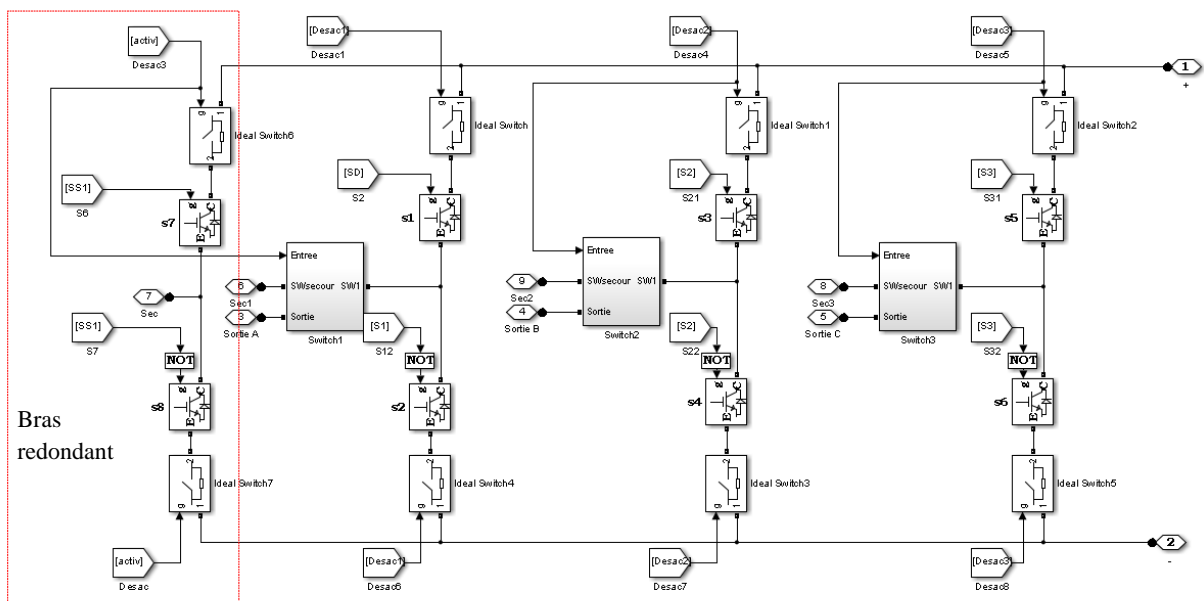


Figure IV.9 : Architecture d'un filtre actif avec bras redondant sous SIMULINK

Cette topologie du bras de secours constitue une redondance pure, son dimensionnement est le même que pour les autres bras et le fonctionnement secours reste celui d'un onduleur triphasé : aucune modification de l'algorithme de commande n'est requise et l'intégralité de la puissance nominale peut être fournie.

Les figures qui suivent donnent un aperçu général sur l'apparition du défaut à l'instant 0.1s après un fonctionnement normal, ensuite à l'instant 0.14s le déclenchement de la commande tolérante et retour à l'état sain. Ils donnent plus de détails sur le fonctionnement de notre système, il apparait clairement le moment de l'apparition du défaut au niveau des courants de source et au niveau des courants injectées. A l'instant du déclenchement du fonctionnement de la commande

tolérante (4^{ème} bars) le système bascule vers un fonctionnement sain et ceci est observable sur les courants de source et injectées.

IV.3.3. Compensation d'un défaut de type circuit ouvert au niveau du FAP

Avant de commencer les simulations de défaut de type circuit ouvert sur les interrupteurs du FAP, nous visualisons l'évolution de la THD du courant.

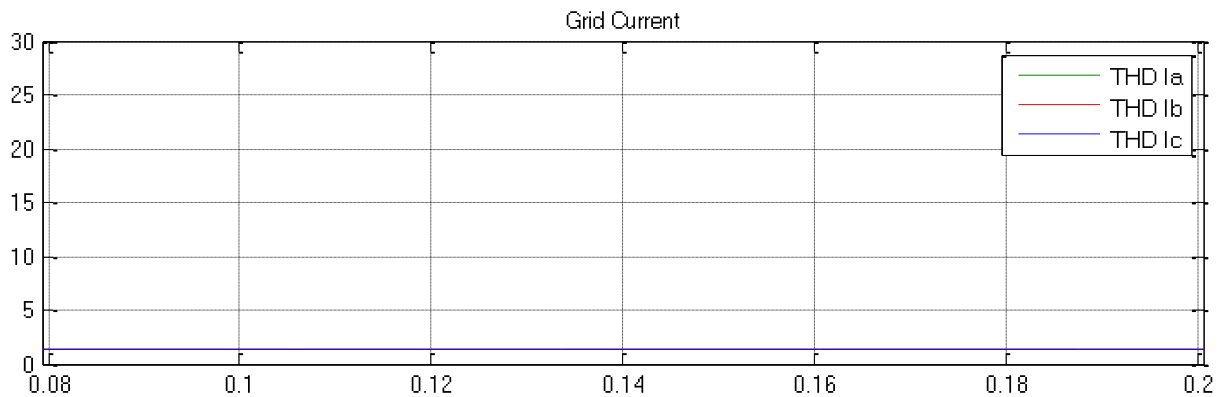
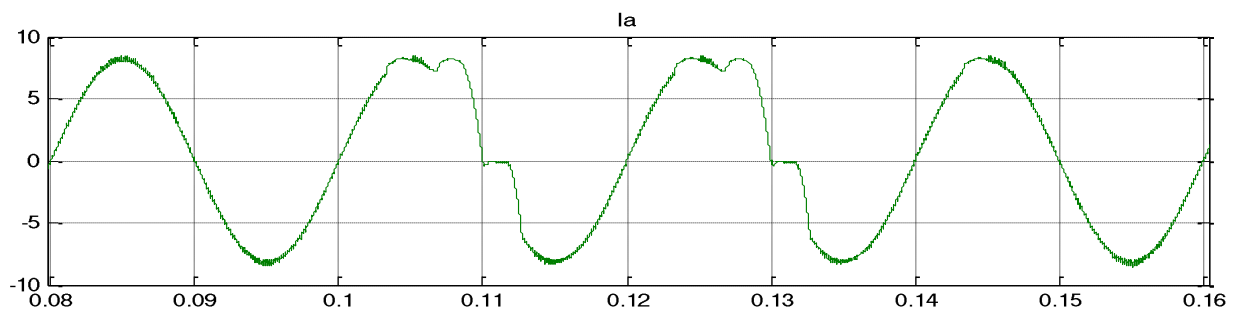


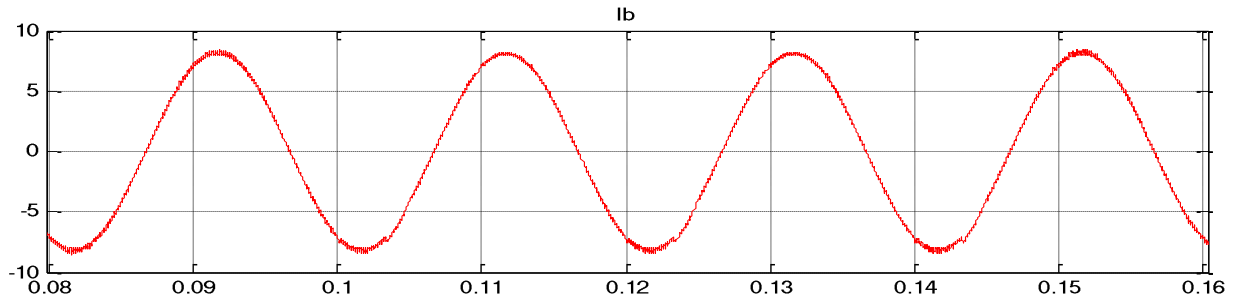
Figure IV.10: Evolution de la THD du courant du réseau électrique sans la présence d'un défaut.

La figure IV.8 indiquent que la valeur de la THD est stable pour l'intervalle de temps choisit pour exercer un défaut de type circuit ouvert à l'instant $t=0.10s$. Les valeurs des THD courant sont stables et inférieure à 1 dans la majorité des cas étudiée. Ce qui indique que le système d'FAP est fonctionnel et affecte le réseau électrique d'une manière positif. Dans ce qui suit on vérifiera à tous moment les variations des valeurs des THD du courant de source et de la tension de charge, afin de mieux visualisé les changements probables qui peuvent intervenir lors des essaie de simulations.

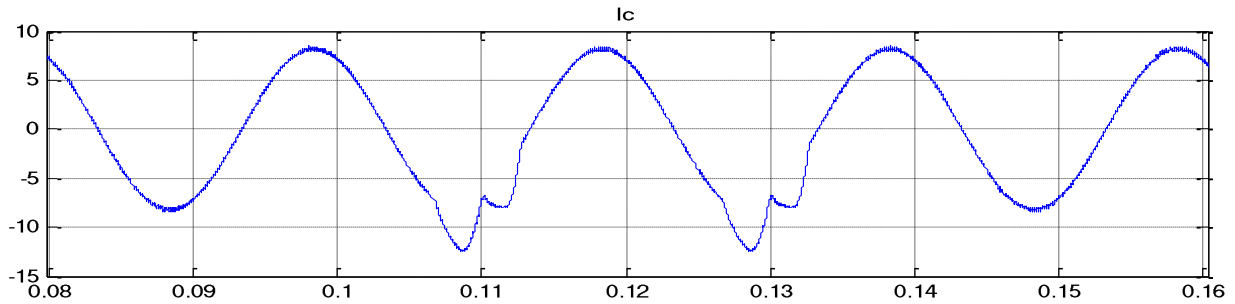
Transistor T1 (1^{er} bras haut) maintenu ouvert



a- Courant de source i_a

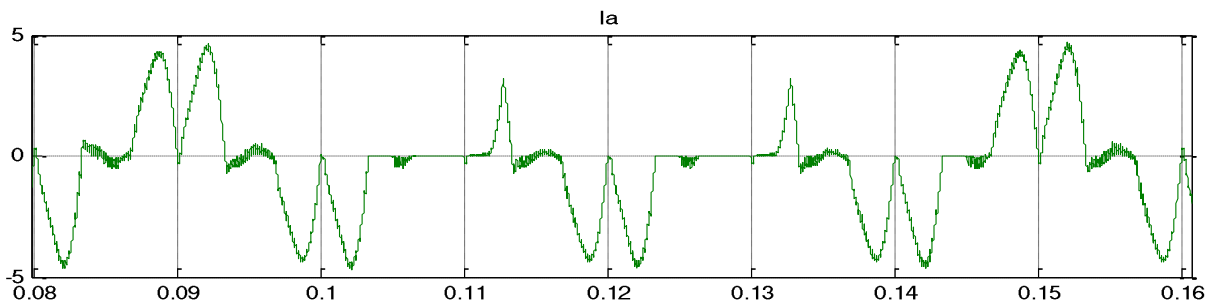


b- Courant de source i_b

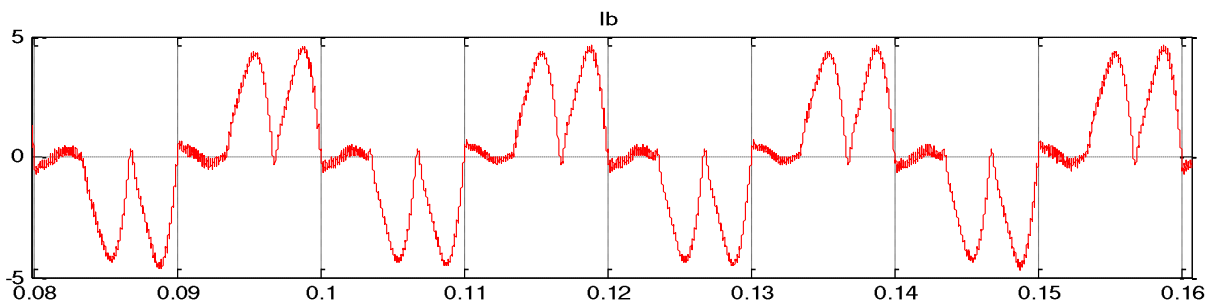


c- Courant de source i_c

Figure IV.11 : Compensation du défaut circuit ouvert après détection dans le cas d'un circuit ouvert de T1 FAP



a- Courant injecté i_a



b- Courant injecté i_b

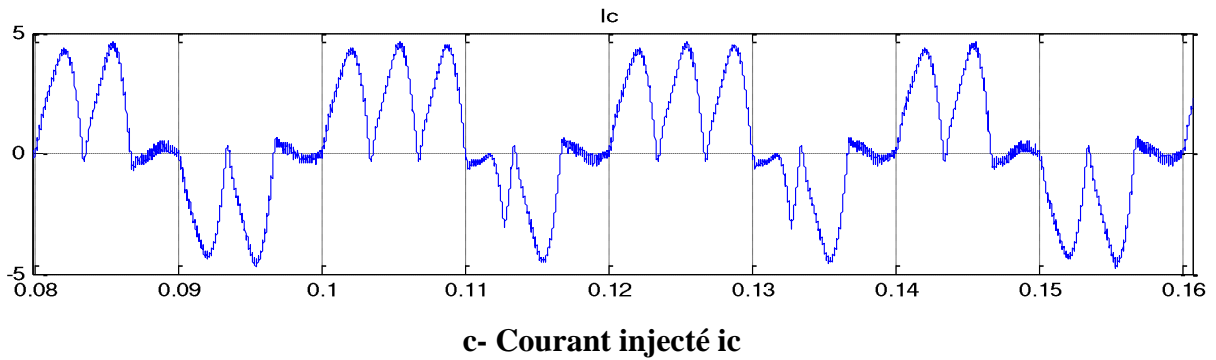


Figure IV.12 : Forme des courants injectés dans le cas de la compensation du défaut type circuit ouvert de T1 FAP

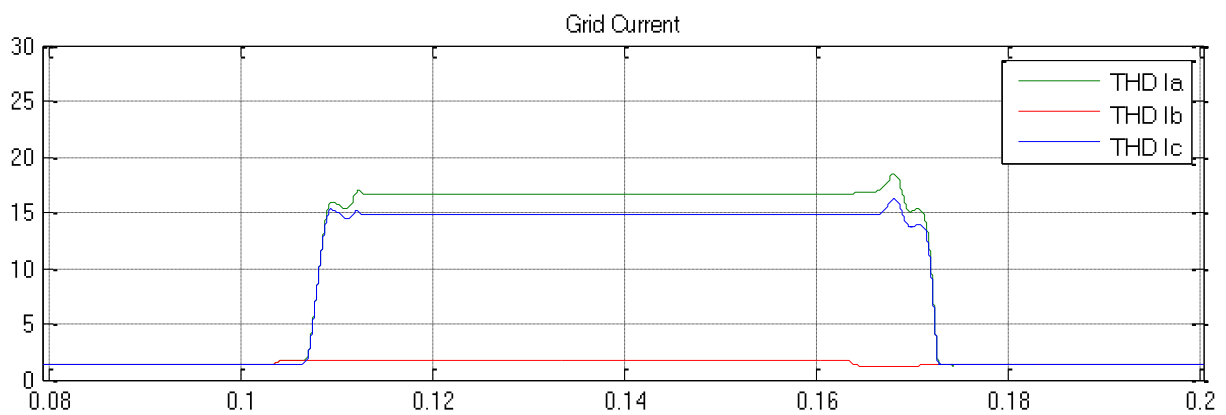
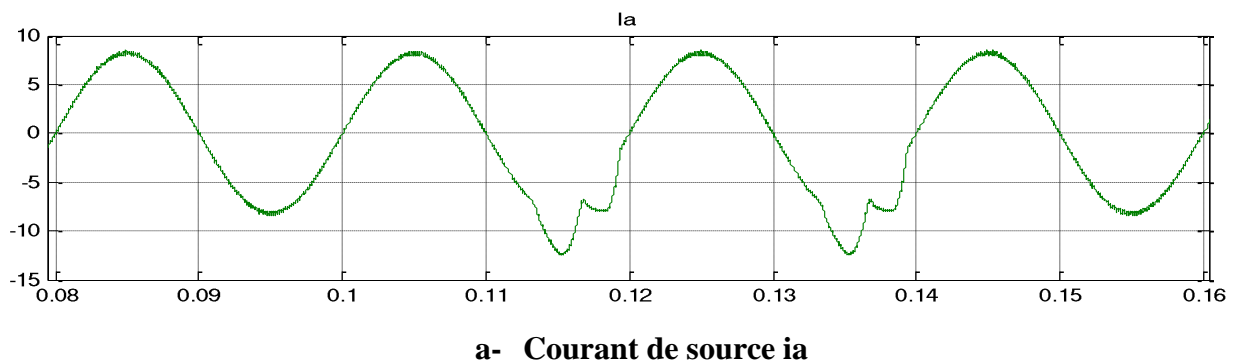
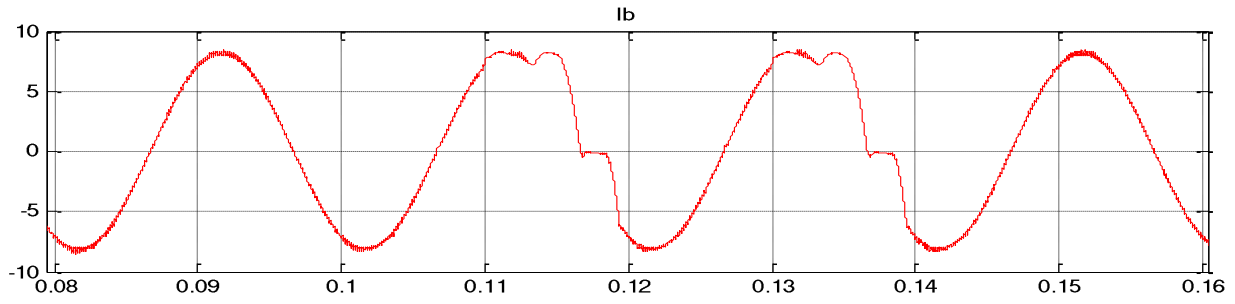


Figure IV.13 : Evolution de la THD du courant de source du réseau électrique avec présence d'un défaut T1.

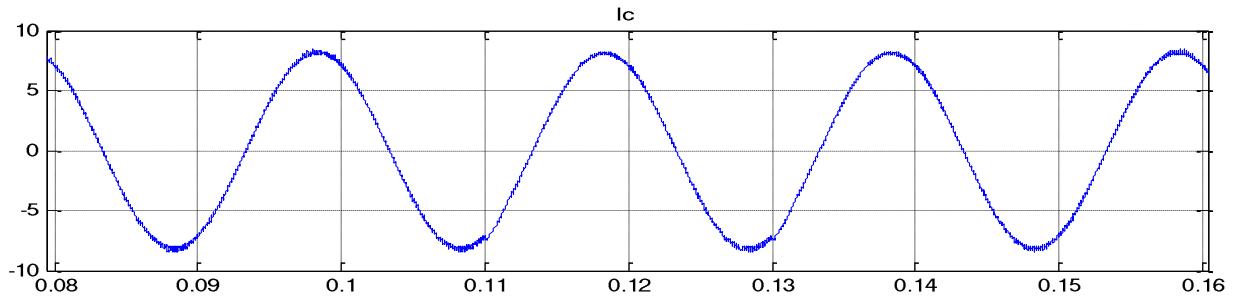
La figure IV.13 met en évidence l'instant de l'apparition du défaut de type circuit ouvert à l'instant $t=0.1s$, la valeur de la THD augmente d'une manière remarquable pour le courant I_a et I_c . Ce changement brusque explique les changements et les variations qui interviennent sur la figure IV.12 (a et c) pour le courant injecté. La valeur de la THD revient vers une valeur normale vers l'instant $t=0.17s$, ce qui indique le déclenchement du bras redondant.

Transistor T2 (2^{ème} bras haut) maintenu ouvert



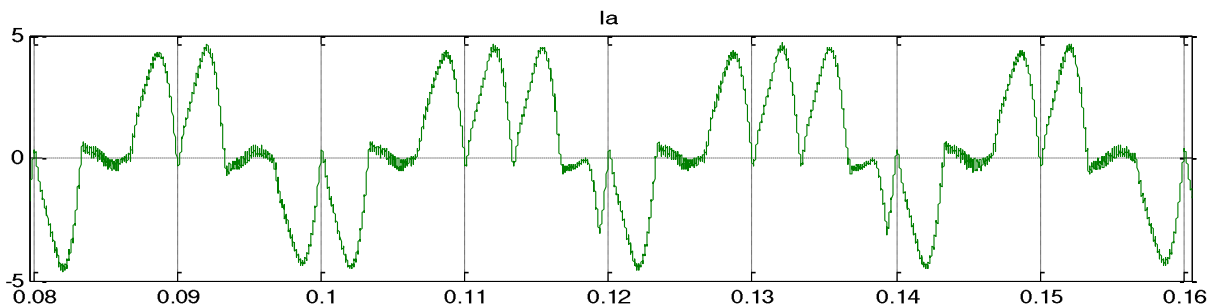


b- Courant de source i_b

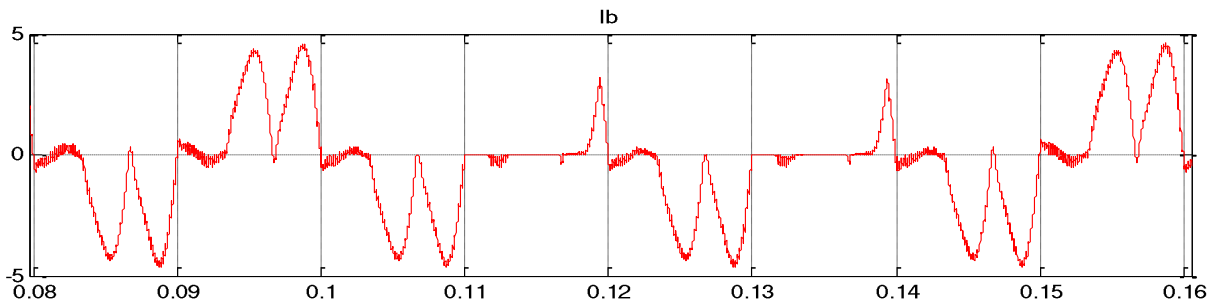


c- Courant de source i_c

Figure IV.14 : Compensation du défaut circuit ouvert après détection dans le cas d'un circuit ouvert de T2 FAP



a- Courant injecté i_a



b- Courant injecté i_b

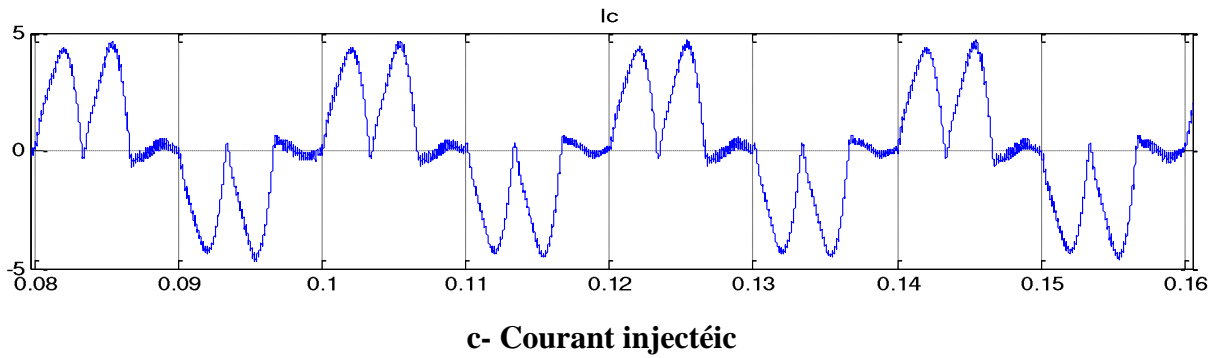


Figure IV.15 : Forme des courants injectés dans le cas de la compensation du défaut type circuit ouvert de T2 FAP

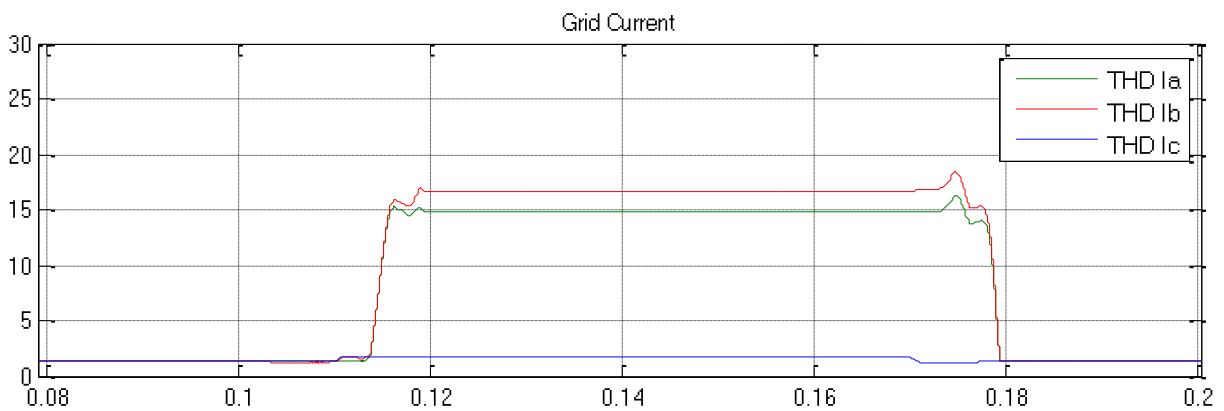
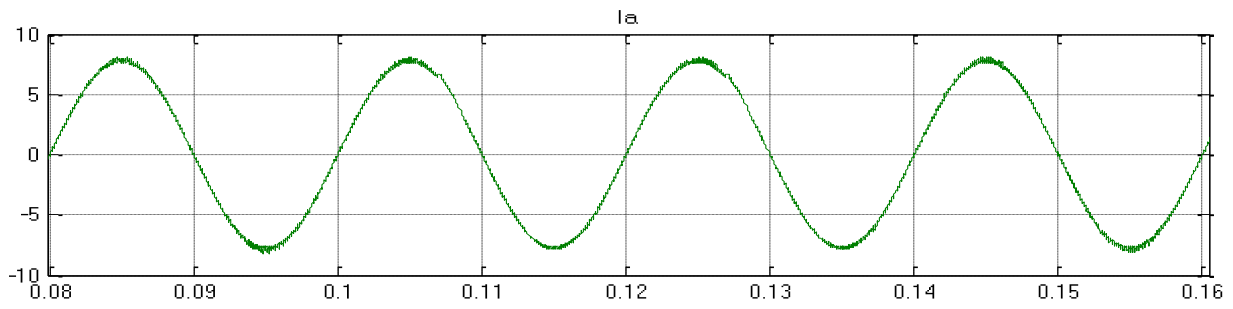


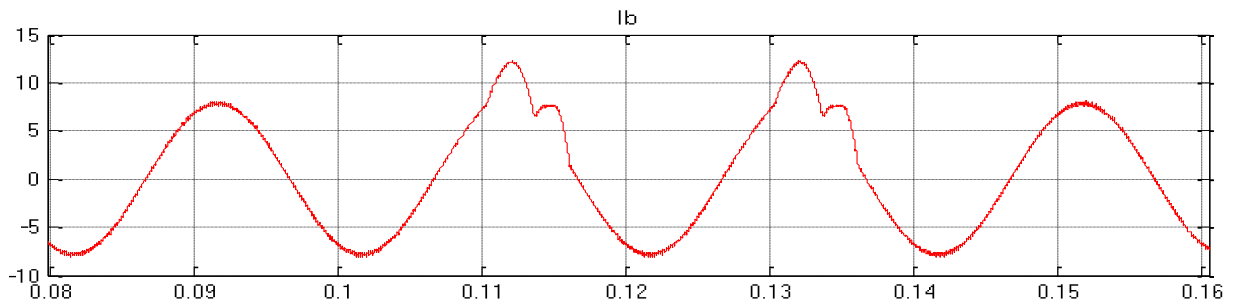
Figure IV.16 : Evolution de la THD du courant de source du réseau électrique avec présence d'un défaut T2.

Dans cette partie de la simulation nous simulons un défaut sur T2, la figure IV.14 a et c montre une déformation de la forme sinusoïdale du courant de source I_a et I_c . La figure IV.15 des courants injectés ainsi que la figure IV.16 indique qu'un défaut est survenu après le temps $t=0.1s$. L'analyse de ces figures indique que le système de diagnostic est opérationnel et permet de localiser le défaut.

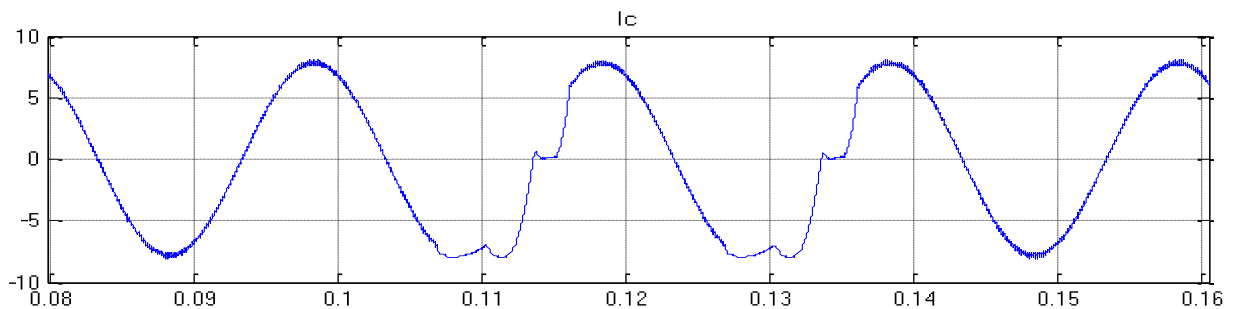
Transistor T6 (3^{ème} bras bas) maintenu ouvert



a- Courant de source i_a

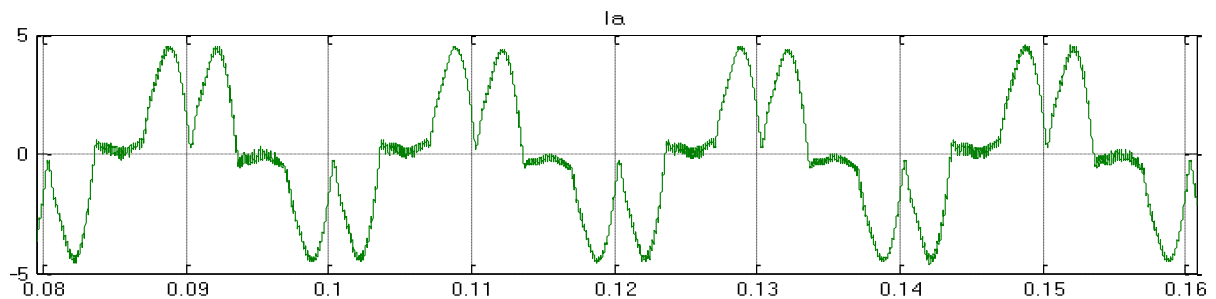


b- Courant de source i_b



c- Courant de source i_c

Figure IV.17 : Compensation du défaut circuit ouvert après détection dans le cas d'un circuit ouvert de T6 FAP



a- Courant injecté i_a

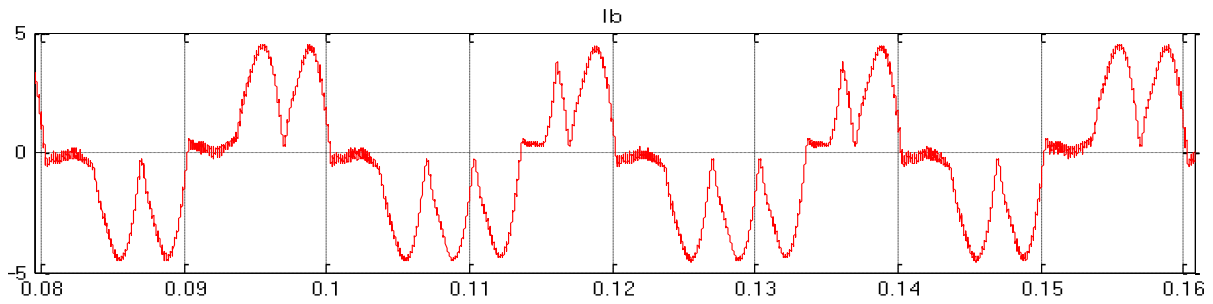
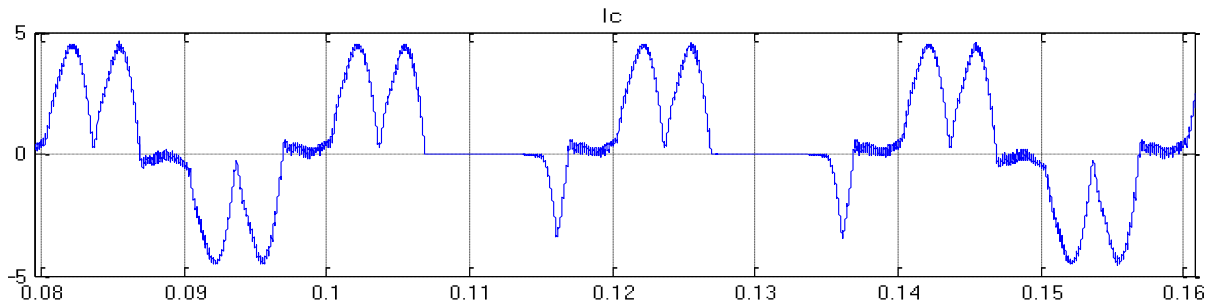
b- Courant injecté i_b c- Courant injecté i_c

Figure IV.18 : Forme des courants injectés dans le cas de la compensation du défaut type circuit ouvert de T6 FAP

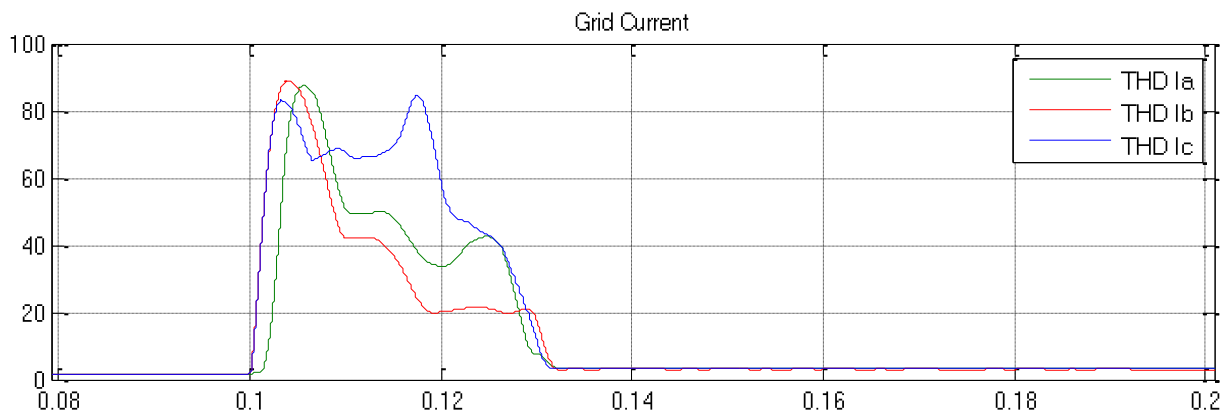


Figure IV.19 : Evolution de la THD du courant de source du réseau électrique avec présence d'un défaut T6.

L'analyse des différentes figures IV.13 à IV.19, indique que le système de diagnostic à base de réseau de neurones artificiels est performant pour la détection l'identification et la localisation d'un défaut de type circuit ouvert intervenus sur la partie parallèle du filtre FAP du réseau électrique. La partie commande tolérante intervient immédiatement après le diagnostic du défaut, le retour des valeurs de la THD des différents courants de source, indique le bras redondant se déclenche à chaque fois qu'un défaut est identifier.

IV.4. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à l'étude du système de détection, localisation et de compensation du défaut de circuit ouvert d'un transistor du convertisseur statique et son impact sur le comportement de tout le système.

Nous avons proposé une nouvelle méthode basée sur le RNA, permettant de détecter, d'identifier automatiquement le défaut, et de le compenser après changement de l'architecture. La méthode proposée détecte l'apparition du défaut concerné et identifie le composant défectueux. Ensuite, les modules de compensation modifient la structure du convertisseur. L'efficacité de cette méthode réside dans le choix des caractéristiques pour l'apprentissage. En effet, la combinaison des informations fournies par la transformée de Fourier, la valeur Skewness et la valeur maximale permet de détecter et de localiser l'interrupteur défectueux. Ainsi, le RNA peut déterminer le bras défaillant et l'interrupteur défectueux. La commande tolérante intervient sur le bras défaillant pour des raisons économiques. Il est plus simple d'intervenir sur un bras que de changer l'interrupteur directement. En effet, la commande tolérante appliquée aux interrupteurs induit des charges économiques importantes, avec la mise en place d'interrupteur de rechange en parallèle avec chaque interrupteur en fonctionnement normal. Nous avons opté pour une compensation en utilisant un bras redondant pour chaque filtre actif.

Les analyses et résultats de simulation présentés dans ce chapitre ont montré que la configuration tolérante du filtre UPQC permet d'assurer la continuité de service en présence d'un défaut éventuel d'un des semi-conducteurs et de permettre un fonctionnement en mode normal, même en présence de défaut. Les analyses effectuées dans la partie concernant la tolérance aux défauts des semi-conducteurs ont montré que la méthode proposée peut réduire considérablement le temps de détection. Les résultats de simulation obtenus pour l'application confirment les performances de la méthode proposée.

CONCLUSION GENERAL

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'actions curatives afin d'améliorer la qualité de l'énergie et particulièrement compenser la pollution harmonique, la puissance réactive mais aussi les déséquilibres. Notre choix s'est porté sur le filtre actif parallèle triphasé comme dispositif de dépollution des harmoniques du courant issu d'une charge non linéaire.

La configuration et l'algorithme de commande conventionnels d'un filtre actif triphasé à structure tension non "fault tolerant" ne permettent pas d'assurer la continuité de service lors de défaillances. Ces défaillances surviennent généralement au niveau de la commande rapprochée du filtre actif (drivers), d'un des capteurs de courant ou d'un des composants de puissance commandables. Elles peuvent conduire au dysfonctionnement du système, voire nécessiter sa mise hors tension.

Pour assurer la disponibilité d'une chaîne de conversion de l'énergie électrique comportant des filtre actif triphasés à structure tension en présence de telles défaillances, la mise en œuvre d'un système efficace et "fault tolerant" est indispensable. La détection, l'identification et la compensation des défauts sont les trois composantes principales d'un tel système.

Nous avons présenté dans ces travaux de recherche une nouvelle méthode basé sur le RNA, permettant de détecter, d'identifier automatiquement le défaut, et de le compensé après changement de l'architecture qui garantissant la continuité de service, en mode normal, lors de défauts éventuels survenant au niveau d'un semi-conducteur de puissance.

Les analyses effectuées dans la partie consacrée à la tolérance des défauts de semi-conducteurs ont démontré que la méthode proposée réduit notablement le temps de détection par rapport aux autres méthodes.

Dans le premier chapitre nous avons présenté des différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique comme nous avons pu le constater ensemble des phénomènes perturbations come les harmonique et les déséquilibres.... ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Nous avons constaté l'importance de déférentes solutions du filtrage qui est solution traditionnelle comme les filtres passifs et Les solutions modernes les filtres actifs.

Le deuxième chapitre étudié nous avons d'abord présenté le filtre actif parallèle et les différentes topologies et les éléments constitutifs d'un FAP triphasé et on a présenté les

stratégies de commande, de type MLI, à Bande d'hystérésis et MLI vectorielle et leur technique pour l'amélioration et l'identification des courants de référence en présence de composantes perturbatrices des tensions de source.

Dans le troisième chapitre nous avons présenté Les défauts quel qu'ils soient sont nuisible dans un système de production. La production d'une énergie électrique ne fait pas exception en face à ces nuisances. Les causes et les conséquences sont différentes et multiples comme nous avons pu observer en parcourant ce chapitre et Une analyse théorique complète de l'influence d'un défaut de type circuit ouvert sur un système à base de FAP conduit à conclure que le défaut existe mais il peut être immédiatement identifiable lors de l'observation du courant de source.

Au quatrième chapitre nous avons proposé une nouvelle méthode basé sur le RNA, permettant de détecter, d'identifier automatiquement le défaut, et de le compensé après changement de l'architecture. La méthode proposée détectent l'apparition du défaut concerné et identifient le composant défectueux. Ensuite, les modules de compensation modifient la structure du convertisseur. Aussi, on a travaillé sur les combinaisons parallèles-séries UPQC qui montré que la configuration tolérante de cette combinaison assurer la continuité de service en présence d'un défaut éventuel d'un des semi-conducteurs.

Les résultats de simulation obtenus pour l'application confirment les performances des méthodes proposées.

Bibliographie

- [1] Chenni Salim « Etude, modélisation et commande des filtres actifs : apport des techniques de l'intelligence artificielle » Thèse de doctorat en génie électrique, université Mohamed Khider Biskra.
- [2] OMEIRI AMAR « simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant » thèse de doctorat en sciences option : commande électrique, université badji mokhtar- annaba, 2007.
- [3] Norme européenne NF EN 50160 Caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics de distribution, Février 2011
- [4] LAIB HICHEM « contribution par une nouvelle approche modulaire au filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques de distribution » thèse de doctorat en sciences en électrotechnique option : réseaux électriques, université de Batna 2017
- [5] LAHMADI OUARDA « contribution à l'identification et la commande d'un filtre actif parallèle par des techniques neuromimétiques » thèse de doctorat en sciences option : réseaux électriques, université de Batna 2, 2017.
- [6] J. Arrillaga, B. C Smith, N. R Watson, A. R Wood Power system harmonic analysis, John Wiley & Sons November 2000.
- [7] É. Félice, Ph. Révilla Qualité des réseaux électriques et efficacité énergétique, Dunod, Paris, 2009.
- [8] Ab. Hamadi, S. Rahman « A New Hybrid Series Active Filter Configuration to Compensate Voltage Sag, Swell, Voltage and Current Harmonics and Reactive Power » IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE 2009) Seoul Olympic Parktel, Seoul, [9] Mohamed Muftah Abdusalam, « Structures et Stratégies de Commande des Filtres Actifs Parallèle et Hybride avec Validations Expérimentales », Thèse de Doctorat, Univ. H. Poincaré, Nancy-I, Mai 2008. Korea July 5-8, 2009
- [10] IEEE Std 519-2014 IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.
- [11] Mohamed Alaa Edin Alali « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques » Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Louis Pasteur 12/09/2002.

- [12] N. Bruyant, "Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles, Compensation globale ou sélective des harmoniques, Régime équilibré ou déséquilibré", Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 1999.
- [13] D. Ould Abdeslam, P. Wira, J. Mercklé, Y. A. Chapuis, D. Flieller, "Stratégie neuromimétique d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle" *Revue des Systèmes, Série Revue Internationale de Génie Electrique (RS-RIGE)*, vol. 9, no. 1, pp. 35-64, 2006.
- [14] H. Akagi, "Modern active filters and traditional passive filters", *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, vol. 54, no. 3, 2006.
- [15] M. Routimo, M. Salo, H. Tuusa, "Comparison of voltage-source and current-source shunt active power filters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no.2, pp. 636-643, March 2007.
- [16] P. G. Barbosa, J. A. Santisteban, & E. H. Watanabe, "Shunt series active power filter for rectifiers AC and DC sides", *IEE Proc.-Electric Power Appl.*, vol. 145, No. 6, pp. 577– 584, November 1998.
- [17] B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 960-971, October 1999.
- [18] ICMT'2006 10th International Conference on Mechatronics Technology, Mexico city, November 20-24, 2006 (Video) Titre: *A new reference injection algorithm for a three-level space vector pulse width modulated shunt active power filter* Auteurs: Hind Djeghloud & Hocine Benalla
- [19] H. Akagi, Y. Kanazawa, & A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-20, No. 9, pp. 625–630, May/June 1984.
- [20] .E. S. Gholipour, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", Thèse de Doctorat, Département de Formation Doctorale Electrotechnique Electronique, Faculté des Sciences & Techniques, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, Octobre 2003.

- [21] S. L. Capitaneanu, "Optimisation de la fonction MLI d'un onduleur de tension deux niveaux", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, Novembre 2002.
- [22]-Ben zemamouche Houria « application de la MLI vectorielle aux onduleurs multi niveaux a base GTO et d'IGBT »mémoire magister BADJI Mokhta-ANNABA 2010
- [23] A. Nabae, S. Ogasawara, & H. Akagi, "A novel control scheme for current controlled PWM inverters", *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 22, No. 4, pp. 312-323, July/August 1986
- [24] Jérôme MAVIER, Convertisseurs génériques à tolérance de panne Applications pour le domaine aéronautique, thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, 2007.
- [25] Kastha D., Bose B. K. (1994). Investigation of fault modes of voltage-fed inverter system for induction motor drive. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 30, No. 4, pp.1028-1038. <http://dx.doi.org/10.1109/28.297920>
- [26] Benslimane T., Thameur A. (2009). Open switch faults detection and localization algorithm for three phase shunt active power filter based on two level voltage source inverter in main power supply constant and variable frequency conditions. Istanbul University, *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 841-851. <http://dlibrary.univboumerdes.dz:8080/jspui/handle/123456789/499>
- [27] Benyettouloutfi, "Contribution au diagnostic des convertisseurs statiques DC-AC (onduleurs de tension) : application au filtre actif parallèle » , Thèse de doctorat, Université TAHRI MOHAMED BECHAR, 2016
- [28] CHERIF, Bilal Djamel Eddine, Contribution à la surveillance et le diagnostic des onduleurs triphasés sous défaut, Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie - Mohamed Boudiaf d'Oran, 2019
- [29] M. Baghli^{1,3}, C. Delpha², D. Diallo³, A. Hallouche¹, Détection et Diagnostic de défauts dans un onduleur NPC par l'analyse statistique des courants, SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2018), 3-5 JUILLET 2018, NANCY, France.
- [30] BURHAN SYLA, RELAIS DE PERTE DE SYNCHRONISME PAR EXPLORATION DE DONNÉES, l'obtention du grade de Maître ès Sciences, FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GÉNIE UNIVERSITÉ LAVAL QUÉBEC, 2012
- [31] I. Witten et F. Eibe, *Data Mining Practical Machine Learning Tools and Techniques* 2nd Edition, Morgan Kaufmann, 2005.

- [32] Wong, Hwee& Lim, Gek Hsiang. (2011). Measures of Diagnostic Accuracy: Sensitivity, Specificity, PPV and NPV. *Proceedings of Singapore Healthcare*. 20. 316-318. 10.1177/201010581102000411.
- [33] Eisenberg MJ, Accuracy and predictive values in clinical decision-making. *Cleve Clin J Med*, 62(5):311-316, 01 Sep 1995
- [34] Julien MARZAT, Diagnostic des systèmes aéronautiques et réglage automatique pour la comparaison de méthodes, thèse de doctorat, Université Paris-Sud XI, Faculté des Sciences d'Orsay, 2011.
- [35] Boudjellal, Bilal & Benslimane, Tarak. (2016). Open-Switch Fault-Tolerant Control of Power Converters in a Grid-Connected Photovoltaic System. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*. 7. 1294. 10.11591/ijped.s.v7.i4.pp1294-1308
- [36] Boudjellal, Bilal & Benslimane, Tarak. (2016). Artificial Neural Network-based control of wind energy conversion system based on a doubly fed induction generator. 12. 553-560.
- [37] N. Madhuri¹, S.R.Doradla², M.Suryakalavathi, Survey of Fault Tolerant Strategies for Shunt Active Power filters, *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, PP 25-30, 2014.
- [38] F Khater, MIA El-Sebah, M Osama, Fault diagnostics in an inverter feeding an induction motor using fuzzy logic, *Journal of Electrical Systems and Information Technology* 4 (1), 10-17, 2017.
- [39] Szczesniak, Pawel. (2019). Challenges and Design Requirements for Industrial Applications of AC/AC Power Converters without DC-Link. *Energies*. 12. 1581. 10.3390/en12081581.
- [40] Benyettou, Loutfi&Tebbakh, Mustapha. (2018). Shunt active filter Using fuzzy logic based on three-level (NPC) inverter to compensate current harmonics. *Advances in Modelling and Analysis B*. 61. 198-206. 10.18280/ama_b.610404.
- [41] Benyettou, Loutfi&Tebbakh, M.. (2018). Three-level (NPC) shunt active power filter topology for harmonic reduction using different control strategies. *Modelling, Measurement and Control A*. 91. 175-185. 10.18280/mmc_a.910403.
- [42] BOUGUERRA Abderrahmen, Commande Tolérante aux Défauts d'un Appareil à Vol Vertical, thèse de doctorat, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA, 2015.

- [43] Zhang, Y. and Jiang, J. : « Bibliographical review on reconfigurable fault tolerant control systems », *Annual Reviews in Control*, pp. 229–252, 2008.
- [44] Lunze, J. and Richter, J. : « Reconfigurable fault-tolerant control », A tutorial introduction. *European Journal of Control*, Vol. 5, pp. 359–386, 2008.
- [45] Jiang, B., Yang, H. and Cocquempot, V. : « Results and perspectives on fault tolerant control for a class of hybrid systems », *International Journal of Control*, Vol. 84, No. 2, pp. 396–411, 2011.
- [46] Blanke, M., Kinnaert, M., Lunze, J. and Staroswiecki, M. : « Diagnoses and fault-tolerant control », Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003.
- [47] Yang G.H., Wang J.L. and Soh Y.C. : « Reliable H^∞ controller design for linear systems », *Automatica*, Vol. 37, pp. 717–725, 2001.
- [48] Staroswiecki, M and Gehin, A. : « From control to supervision », *IFAC Safe process 2000, USA*, Vol. 1, pp. 312-323, 2001.
- [49] Yang, G.H. and Lum, K.Y. : « Fault tolerant flight tracking control with stuck faults », *American Control Conference*, Denver, June 4-6, 2003.
- [50] Marcos, A., Balas, G. and Bokor, J. : « Integrated FDI and Control for Transport Aircraft », *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit*, San Francisco, August 2005.
- [51] Marcos, A. and Balas G. : « A robust integrated controller/diagnosis aircraft application », *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 15, pp. 531-551, 2005.
- [52] Nett, C.N., Jacobson, C.A. and Miller, A.T. : « An integrated approach to controls and diagnostics: the 4-parameter controller », In *Proceedings of Automatic Control Conference*, Vol. 88, pp. 824-835, 1988.
- [53] Jamouli, H. : « Génération de résidus directionnels pour le diagnostic des systèmes linéaires stochastiques et la commande tolérante aux défauts », *Thèse de Doctorat*, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2003.
- [54] Moon, B.C. : « fault tolerant control based a new accommodation », *Proceedings of the 29th Conference on Decision and Control*, Honolulu Hawaii, December 1990.
- [55] Kanev, S. : « Robust fault tolerant control », *PHD Thesis – University of Twente – Netherland*, 2004.

Bibliographie

- [56] Huang, G.y. and Stengel, R.F. : « Restructurable control using proportionalintegral implicate model-following », *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 13, No. 6, pp. 303-309, 1990.
- [57] Napolitano, M. R., Molinaro, G., Innocenti, M. Seanor, B. and Martinelli, D. : « A complete hardware package for a fault-tolerant control system using on-line learning neural networks », In proceedings of the American Control Conference, San Diego, CA, pp. 2615-2619, 1999.
- [58] Morse, W.D. and Ossman, K.A. : « Model-following reconfigurable flight control system for the AFTI/F-16 », *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 13, No. 2, pp. 969-976, 1990.
- [59] Polycarpou, M. M. and Helmicki, A. : « Automated fault detection and accommodation : A learning systems approach », *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, Vol. 25, pp. 1447-1458, 1995.
- [60] Shahram KARIMI, Continuité de service des convertisseurs triphasés de puissance et prototypage "FPGA in the loop": application au filtre actif parallèle, thèse de doctorat, FACULTE DES SCIENCES & TECHNIQUES, Université Henri Poincaré, Nancy-I.
- [61] Karimi, P. Poure, S. Saadate, "A fault tolerant three-leg shunt active filter using FPGA for fast switch failure detection", *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 3342-3347, June 2008.
- [62] Salim, Chenai& Mohamed, Benchouia. (2014). Three-phase Three-level (NPC) Shunt Active Power Filter Performances based on PWM and ANN's Controllers for Harmonic Current Compensation. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*. 6. 532-552. 10.15676/ijeei.2014.6.3.7.