



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية و الكهروميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire

Pour l'obtention du diplôme de master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière : Energies Renouvelables

Spécialité: Energies Renouvelables en Electrotechnique

Thème

**Amélioration De La Qualité D'énergie D'un Réseau
Electrique A L'aide D'un STATCOM**

Soutenue publiquement le...../...../.....

Par

ATTIA Mebrouk / BEKKAIR Moussa

Devant le jury composé de:

KHATTARA Abdelouahab	Univ Ghardaïa	Examineur
BOUCHELGA Fatma	Univ Ghardaïa	Examineur
BOURAGHDA Skander	Univ Ghardaïa	Encadreur

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur le professeur Mr BOURAGHDA Skander , pour l'orientation, la confiance, la patience qui ont constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené au bon port.

Nous tenons également à remercier les membres de Jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants qui m'ont enseigné durant mon cursus de magistère et qui par leurs compétences m'ont soutenu dans la poursuite de mes études. Enfin, Je remercie tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.



DEDICACE

Je tiens à dédier ce modeste travail :

A mon très cher Père et à ma chère Mère, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.

A mes chers Frères et Sœurs

A tous mes chers amis

En fin, je remercie mon binôme BEKKAIR MOUSSA qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.

ATTIA Mebrouk



Dédicace

Je tiens à dédier ce modeste travail :

A mon très cher Père et à ma chère Mère, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A mes chers Frères et Sœurs

A ma grand-mère et mes tantes et oncles

A toute ma famille et tous mes amis sans exception.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin et qui me connais

*En fin, je remercie mon binôme ATTIA MEBROUK
qui a contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

BEKKAIR MOUSSA

الملخص

تتزايد مشكلة التوافقيات في الشبكات الكهربائية بسبب تزايد الأحمال الغير خطية التي تستعمل العناصر الإلكترونية , خاصة تلك التي تحتوي على مفاتيح الطاقة الإلكترونية, و تسبب هاته التوافقيات عدة اثار سلبية ترتبط بشكل مباشر بجودة الطاقة الكهربائية .

هنالك عدة طرق تستعمل حاليا من أجل تخليص الشبكة الكهربائية من هذه التوافقيات من بين هذه الطرق STATCOM الذي يعتبر من بين الطرق الأنجع و الأفضل.

الهدف من هذا العمل هو دراسة استعمال STATCOM للتخلص من التلوث التوافقي لشبكة كهربائية ذات حمولة غير خطية ، و ذلك بمساعدة برنامج المحاكاة الماتلاب.

أثبتت النتائج مدى فعالية STATCOM حيث معدل تشوه تيار الحمل قبل STATCOM 21.87% و بعد STATCOM انخفض الى 3.79%

كلمات مفتاحية : التيارات التوافقية , STATCOM, الطاقة الكهربائية , المحاكاة

Résumé :

Le problème des harmoniques augmente dans les réseaux électriques en raison de la présence des charges non linéaires dans lesquelles des composants électroniques sont utilisés, en particulier des charges contenant des interrupteurs de puissance électroniques. Ces harmoniques provoquent plusieurs effets négatifs qui sont directement liés à la qualité de l'énergie électrique.

Il existe plusieurs méthodes actuellement utilisées pour dépolluer le réseau électrique de ces harmoniques. Parmi ces méthodes, on trouve le STATCOM, qui est considérée comme l'une des méthodes les plus efficaces et les meilleures.

L'objectif de ce travail est l'utilisation du STATCOM pour éliminer les perturbation harmonique d'un réseau électrique connecter a une charge non linéaire, à l'aide du programme de simulation MATLAB/Simulink.

Les résultats ont prouvé l'efficacité du STATCOM, car le taux de distorsion du courant de charge avant le STATCOM 21.87% et après le STATCOM a diminué à 3.79%.

Mots clés: courants harmoniques, STATCOM, l'énergie électrique, simulation

Abstract :

The problem of harmonics resulting from the loads of energy consumers connected to an electrical network is increasing due to the increasing presence of non-linear loads in which electronic elements are used, especially loads that contain electronic power switches. These harmonics cause several negative effects that are directly related to the quality of electrical energy.

There are several methods currently used to rid the electrical network of these harmonics. Among these methods, we find the use of STATCOM, which is considered one of the most efficient and best methods.

The aim of this work is to study the harmonic disturbance of an electrical network with a non-linear load and to explain how STATCOM works in reducing harmonic currents, with the help of the MATLAB simulation program.

The results proved the effectiveness of the STATCOM, as the rate of distortion of the load current before the STATCOM 21.87% and after the STATCOM decreased to 3.79%

Keywords: harmonic currents, STATCOM, electrical energy, simulation

Sommaire

Remercîment	I
Dédicace	II
الملخص	IV
Résumé	IV
Abstract	V
Sommaire	VI
Liste des figures	XI
Liste des tableaux	XIV
Liste des symboles	XV
Liste des abréviations	XVI
Introduction générale	19

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

I.1. INTRODUCTION	22
I.2. QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE	22
I.2.1. Qualité de la tension.....	22
I.2.2. Qualité du courant.....	23
I.3. DIFFERENTS TYPES DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES	23
I.3.1. Creux de tension et coupures brèves.....	25
I.3.2. Déséquilibre de tension.....	27
I.3.3. Surtensions et surintensités.....	27
I.3.4. Variations de tension.....	28
I.3.5. Harmoniques.....	29
I.3.5.1. Charges linéaires et non-linéaires.....	29
I.4. PERTURBATIONS HARMONIQUES	30

I.4.1. Caractéristiques d'un signal.....	31
I.4.1.1. Rang d'un harmonique.....	31
I.4.1.2. Représentation spectrale.....	32
I.4.1.3. Analyse de Fourier.....	32
I.4.2. Valeur caractérisant un signal déformé.....	34
I.4.2.1. Valeur efficace d'une grandeur déformée.....	34
I.4.2.2. Taux individuel.....	34
I.4.2.3. Taux de distorsion harmonique global.....	34
I.4.2.4. Facteur de crête.....	36
I.4.2.5. Facteur de puissance.....	36
I.4.2.6. Facteur de déphasage.....	36
I.4.2.7. Facteur de déformation.....	37
I.4.3. Inter-harmoniques.....	37
I.4.4. Impédance harmonique.....	37
I.4.5. Harmoniques de courant & de tension.....	38
I.4.5.1. Courant harmonique.....	38
I.4.5.2. Tension harmonique.....	39
I.5. CONCLUSION.....	39

CHAPITRE II :

EFFETS DES PERTURBATIONS HARMONIQUES ET LEURS SOLUTIONS

II.1. INTRODUCTION	41
II.2. EFFET DES HARMONIQUES.....	41
II.2.1. Effets instantanés.....	41
II.2.1.1. Perturbation des convertisseurs statiques et des matériels électroniques.....	41
II.2.1.2. Vibrations et bruits.....	42
II.2.1.3. Perturbation des systèmes de télécommande centralisée	42
II.2.1.4. Dysfonctionnement des systèmes de protection et des relais.....	42

II.2.2. Effets différés.....	42
II.2.2.1. Echauffement des condensateurs	43
II.2.2.2. Echauffement des machines tournantes et des transformateurs	43
II.2.2.3. Echauffement des câbles et des équipements	43
II.3. SOLUTIONS DE DEPOLLUTION TRADITIONNELLES	44
II.3.1. Utilisation une inductance (selfs) série	44
II.3.2. Transformateur à couplage spécial.....	44
II.3.3. Compensation de la puissance réactive.....	44
II.3.4. Filtrage passif.....	45
II.3.4.1. Principe de fonctionnement.....	46
II.3.4.2. Filtre passif résonant.....	46
II.3.4.3. Filtre passif amorti.....	46
II.4. SOLUTIONS DE DEPOLLUTION MODERNES.....	48
II.4.1. Filtrage actif.....	48
II.4.1.1. Rôle du filtre actif.....	49
II.4.1.2. Principe de fonctionnement du filtre actif.....	49
II.4.1.3. Filtre actif série (F.A.S).....	49
II.4.1.4. Filtre actif parallèle (F.A.P).....	50
II.4.1.5. Filtre combiné parallèle-série (UPQC).....	51
II.4.1.6. Combinaison hybride active et passive.....	51
II.4.1.6.1. Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles	52
II.4.1.6.2. Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles	53
II.4.1.6.3. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	53
II.5. CONCLUSION.....	55

CHAPITRE III :

CONCEPT DE BASE DES SYSTEMES FACTS

III.1. INTRODUCTION.....	58
---------------------------------	-----------

III.2. DEFINITION DES FACTS	58
III.3. DIFFERENTES CATEGORIES DES FACTS	59
III.4. APPLICATION DES DISPOSITIF FACTS DANS LES RESAUX ELECTRIQUE	61
III.5. STRUCTURE DES PRINCIPAUX DISPOSITIFS FACTS	62
III.5.1. Compensateurs shunts (parallèles).....	62
III.5.1.1. Compensateur statique de puissance réactive (SVC).....	63
III.5.1.2. Compensateur statique synchrone (STATCOM).....	64
III.5.2. Compensateurs Séries.....	65
III.5.2.1. Compensateur série commandé par thyristors (TCSC).....	65
III.5.2.2. Compensateur série statique synchrone (SSSC).....	66
III.5.3. Compensateurs hybrides (shunt-série).....	66
III.5.3.1. Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC).....	66
III.5.3.2. Static Phase Shifter (SPS).....	68
III.6. APPORTS ET AVANTAGES DES DISPOSITIFS FACTS	68
III.7. COUT DES DISPOSITIFS FACTS	69
III.8. CONCLUSION	69

CHAPITRE IV :

MODELISATION ET COMMANDE D'UN STATCOM

IV.1. INTRODUCTION	71
IV.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN STATCOM	72
IV.3. MODÉLISATION D'UN STATCOM	75
IV.3.1. Modèle Mathématiques Simplifie	75
IV.3.2. Modèle Mathématiques en considérant le circuit DC.....	78
IV.4. COMMANDE D'UN STATCOM	80
IV.4.1. Détermination des Références.....	81
IV.4.2. Méthode Watt-Var découplée.....	82

IV.4.3. Régulation PI avec compensation de pôles	85
IV.4.4. Régulation de la tension continue U_{dc}	86
IV.5. COMMANDE D'UN L'ONDULEUR.....	87
IV.5.1. Commande par hystérésis	88
IV.5.2. Commande par MLI.....	88
IV.6. IDENTIFICATION DES COURANT HARMONIQUE.....	89
IV.6.1. Méthode des courants.....	89
IV.6.1.1. Algorithme de la méthode des courants.....	90
IV.6.2. Méthodes sur les puissances instantanées.....	90
IV.6.3. Méthode de détection synchrone.....	93
IV.7. CONCLUSION.....	95

CHAPITRE V :

SIMULATION ET RESULTATS

V.1. INTRODUCTION.....	97
V.2. OBJECTIF.....	97
V.3. PRINCIPE DE STATCOM.....	97
V.4. MODELE UTILISE EN SIMULATION.....	98
V.5. RESULTATS DES SIMULATIONS	99
V.5.1. Résultats sans STATCOM.....	99
V.5.1.1. Interprétation des résultats.....	104
V.5.2. Résultats avec STATCOM.....	104
V.5.2.1. Interprétation des résultats.....	111
V.6. CONCLUSION.....	112
CONCLUSION GENERALE	114
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	116

Liste des figures		
Figure	Titre	Page
CHAPITRE I : Généralités sur la qualité d'énergie Electrique		
Fig. I.1	Creux de tension et coupures brèves.	25
Fig. I.2	Déséquilibre de tension.	27
Fig. I.3	Exemple de surtension.	28
Fig. I.4	Exemple de variation de tension.	29
Fig. I.5	Formes d'onde (tension, courant) d'une charge linéaire.	30
Fig. I.6	Formes d'onde (tension, courant) d'une charge non linéaire.	30
Fig. I.7	Exemple d'harmoniques (Décomposition d'un signal déformé).	31
Fig. I.8	Spectre harmonique d'un signal.	32
Fig. I.9	Onde déformée et sa décomposition.	33
CHAPITRE II : Effets des perturbations harmoniques et leurs Solutions		
Fig. II.1	Raccordement d'un filtre passif.	45
Fig. II.2	Filtre résonant agissant sur plusieurs rangs d'harmonique.	47
Fig. II.3	Filtre amorti.	48
Fig. II.4	Filtre actif série.	50
Fig. II.5	Filtre actif parallèle.	51
Fig. II.6	Filtre combiné parallèle-série (UPQC).	52
Fig. II.7	Filtre actif série avec filtre passif parallèle.	52
Fig. II.8	Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle.	53
Fig. II.9	Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.	54
CHAPITRE III : Concept de base des systèmes FACTS		
Fig. III.1	Principaux Dispositifs FACTS.	60
Fig. III.2	Structure d'un SVC, schéma équivalent.	63
Fig. III.3	STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.	64
Fig. III.4	TCSC, (a) Structure de base, (b) Schéma équivalent.	65
Fig. III.5	SSSC (a) Structure de base, (b) Schéma équivalent.	66
Fig. III.6	(a) schéma représentatif d'un UPFC, (b) schéma équivalent de l'UPFC.	67
Fig. III.7	(a) structure du SPS (b) schéma équivalent du SPS.	68

CHAPITRE IV : Modélisation et commande d'un STATCOM		
Fig. IV.1	Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau.	71
Fig. IV.2	Principe de fonctionnement du STATCOM.	72
Fig. IV.3	Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique.	73
Fig. IV.4	Courbes simulées courant et tension en mode capacitif.	75
Fig. IV.5	Courbes simulées courant et tension en mode inductif.	75
Fig. IV.6	Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau.	76
Fig. IV.7	Passage du repère (α , β) vers le repère (d, q).	77
Fig. IV.8	Schéma équivalent du Circuit DC du STATCOM.	78
Fig. IV.9	Identification des Courants de Référence.	81
Fig. IV.10	Transfert de l' I_{shd} en fonction de X_1 .	83
Fig. IV.11	Le transfert I_{shq} en fonction de X_2 .	83
Fig. IV.12	Régulation et découplage de I_{shd} .	84
Fig. IV.13	Schéma de régulation du STATCOM.	84
Fig. IV.14	Schéma bloc de la régulation PI des courants du STATCOM.	85
Fig. IV.15	Régulation de la tension continue U_{dc} .	87
Fig. IV.16	Contrôle de l'onduleur par hystérésis.	88
Fig. IV.17	Contrôle de l'onduleur par MLI.	89
Fig. IV.18	Schéma de principe d'identification des courants harmoniques.	90
Fig. IV.19	Schéma de principe de la méthode séparation des puissances.	92
Fig. IV.20	Structure d'un filtre actif shunt basé sur la méthode des puissances instantanées.	93
Fig. IV.21	Principe de la méthode (pq).	95
CHAPITRE V : Simulation et Résultats		
Fig. V.1	Principe de STATCOM.	98
Fig. V.2	Courant de source, charge et STATCOM.	98
Fig. V.3	Modèle de simulation établi sous Simulink.	99
Fig. V.4	Tensions de la source V_s .	100
Fig. V.5	Zoom des tensions de la source V_s .	100
Fig. V.6	Courants triphasé de la charge I_{ch} .	101
Fig. V.7	Zoom des courants triphasé de la charge I_{ch} .	101
Fig. V.8	Zoom de courant de la charge I_{ch1} .	102
Fig. V.9	Courants triphasé de la source I_s .	102
Fig. V.10	Zoom des courants triphasé de la source I_s .	103
Fig. V.11	Zoom de courant de la source I_{s1} .	103
Fig. V.12	Spectre harmonique de courant de la source.	104

Fig. V.13	Tensions de la source V_s .	105
Fig. V.14	Courants triphasé de la charge I_{ch} après STATCOM.	105
Fig. V.15	Zoom des courants triphasé de la charge I_{ch} après STATCOM.	106
Fig. V.16	Zoom de courant de la charge I_{ch1} après STATCOM.	106
Fig. V.17	Courants triphasé I_t du STATCOM.	107
Fig. V.18	Zoom des courants triphasé I_t du STATCOM.	107
Fig. V.19	Zoom de courant I_{t1} du STATCOM.	108
Fig. V.20	Courants triphasé de la source I_s après STATCOM.	108
Fig. V.21	Zoom des courants triphasé de la source I_s après STATCOM.	109
Fig. V.22	Zoom de courant de la source I_{s1} après STATCOM.	109
Fig. V.23	Tension et courant de la source après STATCOM.	110
Fig. V.24	Source de tension continue V_{dc} .	110
Fig. V.25	Zoom de source de tension continue V_{dc} .	110
Fig. V.26	Spectre harmonique de courant de la source après STATCOM.	111

Liste des tableaux		
Tableau	Titre	Page
CHAPITRE I : Généralités sur la qualité d'énergie Electrique		
Tab. I.1	vue d'ensemble des principales perturbations électriques.	26
Tab. I.2	TDHi pour diverses charges non linéaires.	35
Tab. I.3	Limite des composants harmoniques en courant.	38
Tab. I.4	Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension.	39
CHAPITRE II : Effets des perturbations harmoniques et leurs Solutions		
Tab. II.1	Avantages et inconvénients des différents filtrages.	54
Tab. II.2	Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.	55
CHAPITRE III : Concept de base des systèmes Facts		
Tab. III.1	Différentes des niveaux ascendants de contribution entre les FACTS.	61
Tab. III.2	Le rôle des différents dispositifs FACTS.	62
CHAPITRE V : Simulation et Résultats		
Tab. V.1	Paramétrés de la charge non linéaire.	99
Tab. V.2	La valeur de THD sans STATCOM et avec STATCOM.	111

Liste des Symboles

Symboles	Nomination
V_s	Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).
V_r	Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).
V_{sh}	Tension injectée par le STATCOM.
V_t	Tension de la ligne.
I_{sh}	Courant injectée par le STATCOM.
P_{sh}	Puissance active délivrée par le STATCOM.
Q_{sh}	Puissance réactive délivrée par le STATCOM.
R_{sh}	Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.
Θ	Déphasage du courant de la ligne.
X_{sh}	Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM.
V_{shd}	Composante directe de la tension générée par le STATCOM.
V_{shq}	Composante quadrature de la tension générée par le STATCOM.
I_{shd}	Composante directe du courant fournit par le STATCOM.
I_{shq}	Composante quadrature du courant fournit par le STATCOM.
U_{dc}	Tension continu aux bornes du condensateur.
L_{sh}	L'inductance du transformateur de couplage.
I_{dc}	Courant dans le circuit continu.
d (indice)	Composante sur l'axe d du repère d-q.
q (indice)	Composante sur l'axe q du repère d-q.
K_p	Constante proportionnel.
K_i	Constante intégrale.
i_{ch}	Courant de la charge.
V_s	Tension de la source.
I_{inj}	Courant harmonique injecté.

Liste des abréviations

Abréviations	Nomination
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems.
STATCOM	Static Synchronous Compensator.
SVC	Static Var Compensator.
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor.
UPFC	Unified Power Flow Controller.
TCR	Thyristor Controlled Reactor.
TSC	Thyristor Switched Capacitor.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistors.
GTO	Gate Turn Off.
SSSC	Static Synchronous Series Compensator.
SPS	Static Phase Shifter.
IGCT	Insulated Gate Commutated Thyristors.
PI	Proportionnel Intégral (régulateur).
MLI	Modulation par Largeur d'Impulsion.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le réseau électrique est un assemblage de matériels ayant pour rôle d'acheminer l'électricité de puis la source (centrales) jusqu'aux utilisateurs dans les meilleures conditions économiques et techniques. L'énergie électrique, par sa facilité d'utilisation, de régulation et d'automatisation, est devenue indispensable à la vie quotidienne.

L'utilisation croissante des dispositifs d'électronique de puissance dans les systèmes électrique sa entraîné de plus en plus de problèmes liés aux perturbations ou distorsions harmoniques des réseaux électriques. La distorsion harmonique est générée par les charges non linéaires connectées au réseau et qui absorbent des courants non sinusoïdaux. Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire même la destruction totale de tous ces équipements.

Les réseaux électriques jusqu'à ces dernières années sont contrôlés mécaniquement. Malgré l'utilisation de la microélectronique, des ordinateurs et des moyens rapides de télécommunication dans le contrôle des réseaux, la dernière action dans ces systèmes de commande est prise avec des dispositifs mécaniques ayant un temps de réponse plus au moins long et avec lesquels l'action d'amorçage et de réamorçage ne peut être répétitivement exécuté à une fréquence élevée par rapport aux dispositifs à base d'interrupteurs statiques (semi-conducteurs).

Le développement rapide de l'électronique de puissance a grandement affecté l'amélioration des conditions de fonctionnement des réseaux électriques par la procédure de contrôle de leurs paramètres et par l'introduction de dispositifs de contrôle basés sur des composants électroniques très puissants. (GTO, IGBT) communément appelé FACTS : (Flexible Alternating Current Transmission System).

Un FACTS est un équipement d'électronique de puissance utilisé pour améliorer la contrôlabilité et les capacités de transfert des réseaux de transmission d'électricité, agit

généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau. Ceci a pour effet de modifier l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible. Ils sont utilisés aussi pour le filtrage des Courants harmoniques et la stabilisation de la tension.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne particulièrement l'étude par simulation d'un STATCOM à compenser les courants harmoniques générés par une charge non-linéaire dans un réseau triphasé.

Notre travail a été divisé en cinq chapitres.

Chapitre I : Généralités sur la qualité d'énergie électrique

Chapitre II : Effets des perturbations harmoniques et leurs solutions

Chapitre III : Concept de base des systèmes FACTS

Chapitre IV : Modélisation et Commande du STATCOM

Chapitre V : Simulation et résultats

CHAPITRE I :

GENERALITES SUR LA QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

I.1. INTRODUCTION

La qualité d'énergie électrique est un terme très répandu dans le domaine scientifique et industriel. Ce concept détermine les paramètres qui définissent les propriétés du produit électricité en conditions normales, en terme de continuité de la fourniture et des caractéristiques de la tension (symétrie, fréquence, amplitude, forme d'onde). Cette vision a pour but de déterminer les caractéristiques de la fourniture électrique afin de limiter son influence sur les différentes charges connectées au réseau

Selon l'IEEE, on appelle "power quality problem" toute variation dans l'alimentation en puissance électrique, ayant pour conséquence le dysfonctionnement ou l'avarie d'équipements des utilisateurs, telle que : creux de tension, surtension transitoire, fluctuations de tension, harmoniques, déséquilibre... Cependant, tous ces phénomènes affectent, essentiellement, la tension qui est fournie à l'utilisateur. Si ce dernier n'utilise pas de charge perturbatrice, le courant sera peut-être déformé, mais uniquement d'une manière qui résulte des caractéristiques de la tension fournie. C'est pourquoi on dit parfois que la qualité de l'énergie se réduit à la qualité de la tension ("power quality = voltage quality") [1].

I.2. QUALITE D'ENERGIE ELECTRIQUE

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et le courant. Nous allons donc définir ces deux notions.

I.2.1. Qualité de la tension

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales [2] :

a. Amplitude : Qui est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité et doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale, où des variations importantes de l'amplitude peuvent causer des perturbations telles que les creux de tension, coupures et surtensions [2].

b. Fréquence : Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production [2].

c. Forme d'onde : La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits [2].

d. Symétrie : La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre [2].

I.2.2. Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasés de $2\pi/3$ radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement lié à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension [3].

I.3. DIFFERENTS TYPES DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques [2] [3] :

- les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions, flicker),
- les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale,
- les modifications de la forme d'onde (harmoniques, inter harmoniques, bruits),
- la dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée [4] :

- les perturbations transitoires,
- les perturbations de courte durée,
- les perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre.

Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de courts-circuits. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques.

Dans la catégorie « perturbations permanentes » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle commande.

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories [2] [3] :

- les défauts au sein des réseaux électriques,
- la présence de charges non linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi être divisés en deux grandes familles :

- les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...),
- les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

Le tableau I.1 récapitule les remarques précédentes en présentant les principales perturbations, leurs origines ainsi que leurs conséquences. L'amplitude de la tension est également indiquée en pu (per unités) pour les perturbations importantes au niveau de l'amplitude et en % pour les variations faibles d'amplitude.

I.3.1. Creux de tension et coupures brèves

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10ms jusqu'à 1min. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10ms à 1min. Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées, et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension et pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps. Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles [5].

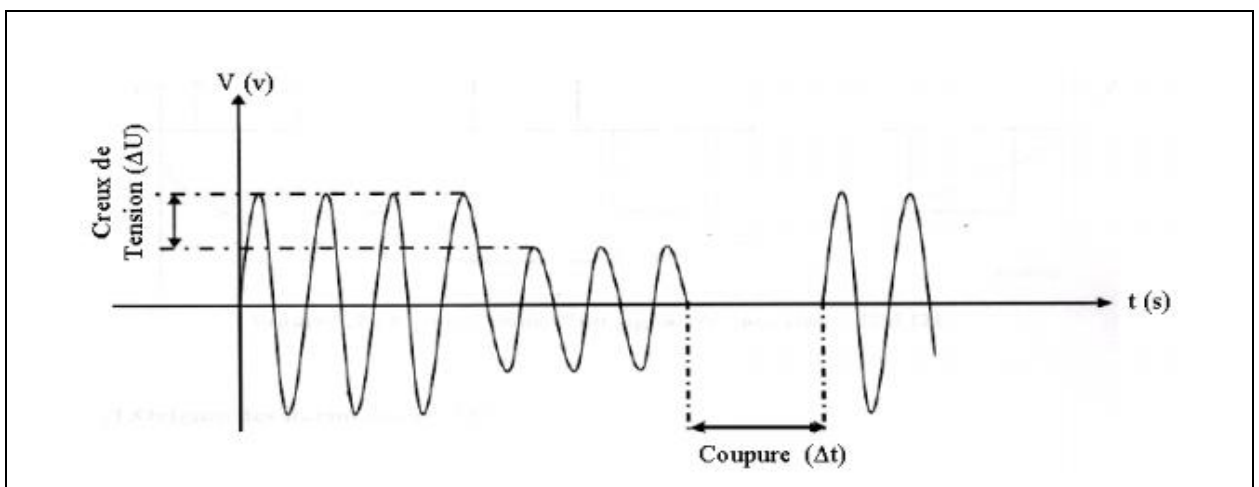
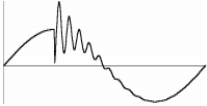
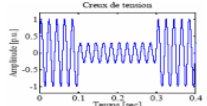
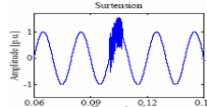
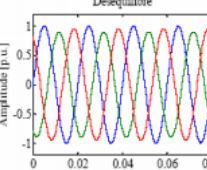
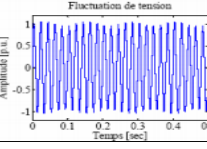
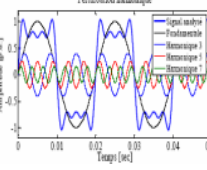
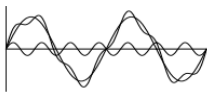


Figure I.1. Creux de tension et coupures brèves [6].

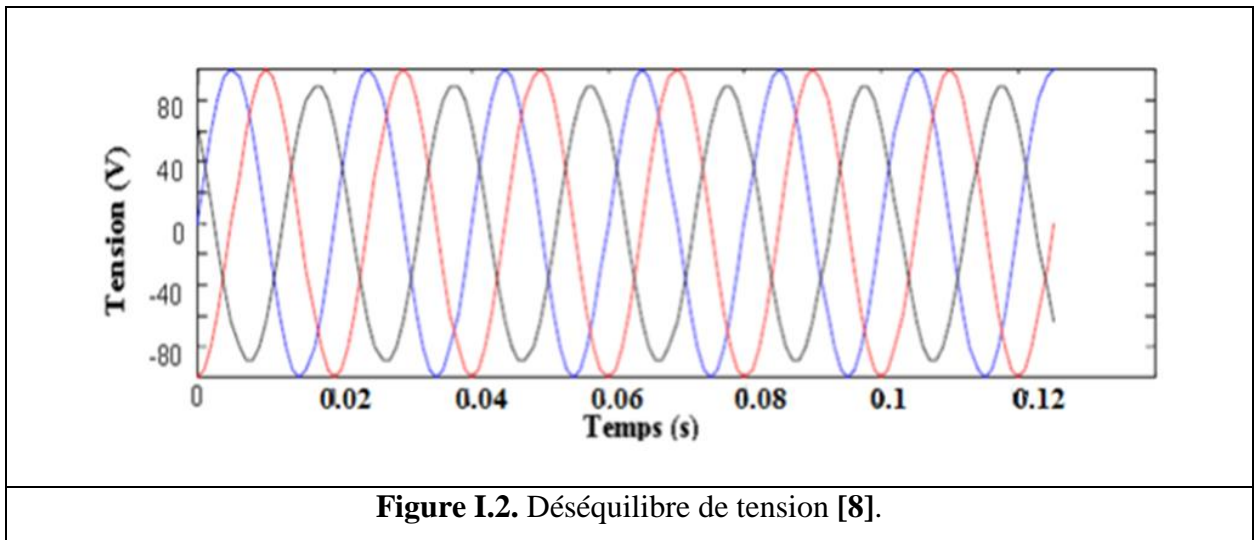
Tableau I.1. vue d'ensemble des principales perturbations électriques [3].

Types de Perturbations		Amplitude	Origine	Conséquence
Transitoires (impulsions et oscillations)		-	Déclenchement des appareils, enclenchement des condensateurs, commutations.	Dysfonctionnements gênants.
Creux de tension		0.1-0.9 pu	Courts-circuits, démarrage de gros moteurs, saturation des transformateurs.	Arrêts d'équipement, pertes de production.
Coupures brèves		<0.1 pu	Courts-circuits	Arrêts d'équipement, pertes de production.
Surtensions		1.1-1.8 pu	Courts-circuits, débranchement des charges importantes.	Déclenchements, dangers pour les personnes et pour les matériels.
Déséquilibre		-	Charges asymétriques ou monophasées.	Echauffements des machines tournantes, vibrations.
Fluctuation de tension		0.1-7%	Charges fluctuantes (fours à arc, moteur à démarrage fréquent, soudeuses, éoliennes).	Papillotements de l'éclairage.
Harmoniques		0-20%	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc, soudeuses, éoliennes).	Echauffements, vieillissements, pertes supplémentaires, troubles fonctionnels.
inetrharmoniques		0-2%	Charges non linéaires et fluctuantes (fours à arc, soudeuses, éoliennes).	Papillotements de l'éclairage.
Variations de la fréquence	-	-	Déséquilibres entre la production et la consommation.	Dysfonctionnements des équipements électriques.

I.3.2. Déséquilibre de tension

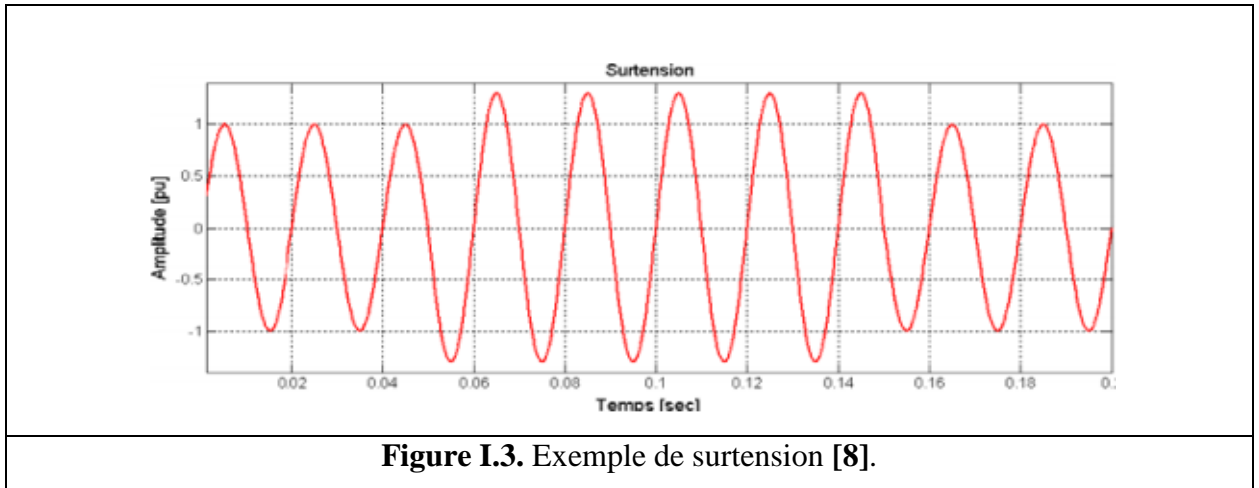
Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les réceptrices monophasées basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [7].

Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120°



I.3.3. Surtensions et surintensités

Les surtensions correspondent à des augmentations de l'amplitude de la tension de 1,1 pu à 1,8 pu. Les surtensions sont moins fréquentes que les creux de tension et sont généralement dues à des courts-circuits dans les systèmes à neutre isolé qui engendrent à la fois des creux de tension et des surtensions. En cas de court-circuit monophasé dans un tel système, les deux phases non concernées par le défaut peuvent prendre une valeur pouvant aller jusqu'à 1,73 pu, c'est à dire la tension composée. En cas de court-circuit biphasé, la phase non affectée par le défaut se caractérise par une surtension qui peut aller jusqu'à 1,5 pu.

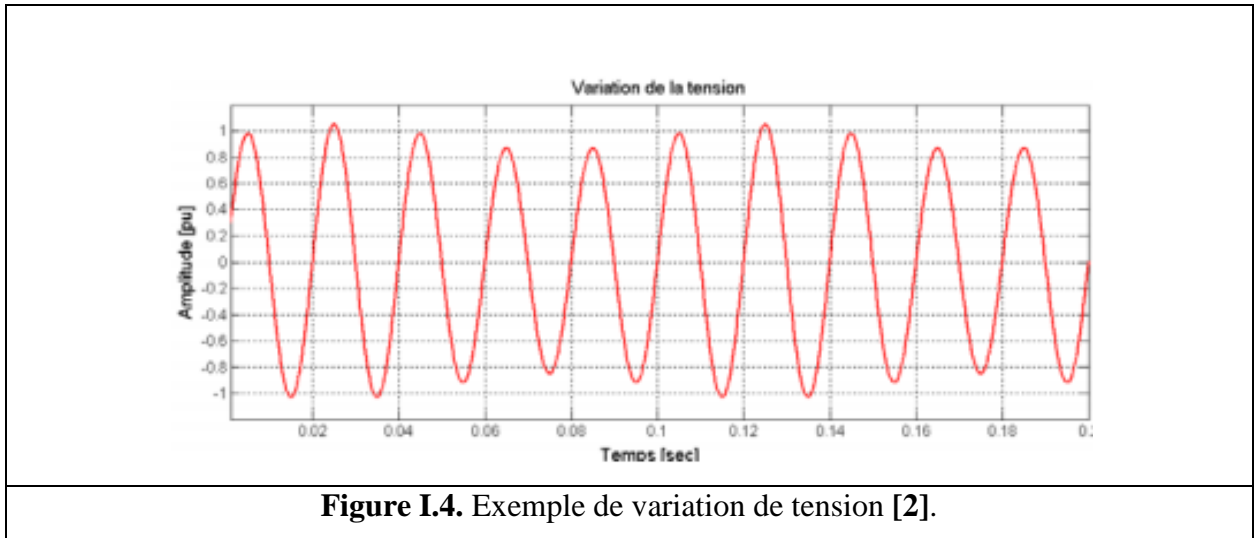


Des surtensions peuvent également être provoquées par des phénomènes d'origine atmosphérique (foudre), par des déclenchements de charges importantes, par des mauvais fonctionnements de régulateurs de tensions, par ferorésonance ou par des manœuvres sur le réseau. Ce type de surtensions se caractérise généralement par une durée très brève et s'assimile le plus souvent à des transitoires [3].

I.3.4. Variations de tension

La mise en service ou hors service des appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable entraînent des variations de tension qui se manifestent sous deux formes principales :

- Des variations lentes de tension se produisant à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. Ces variations sont dues principalement au branchement et débranchement des charges et en général ne dépassent pas les % $10\pm$ de la tension nominale. Ils ne causent pas de préjudice pour la plupart des équipements électriques.
- Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 5,0 et 25 Hz. Ces variations sont dues aux charges dont la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder, les moteurs à couples pulsatoires ou à démarrages fréquents. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs [3].



I.3.5. Harmoniques

Les harmoniques sont des tensions ou des courants sinusoïdaux dont la fréquence est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impaires existent.

La pollution harmonique est un des problèmes majeurs qui dégrade la qualité d'énergie électrique dans les réseaux. La circulation des courants harmoniques dans les lignes et entre les charges est difficile à prédire et à contrôler [9].

I.3.5.1. Charges linéaires et non-linéaires

Une charge est dite linéaire lorsque son impédance est constante, le courant qu'elle absorbe est alors sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale.

Une charge est dite non linéaire lorsque son impédance varie au cours d'une même période, le courant qu'elle absorbe n'est pas sinusoïdal lorsque la tension est sinusoïdale [10].

La figure I.7 montre un exemple d'un signal déformé qui est décomposé par plusieurs sinusoïdes d'harmoniques [10].

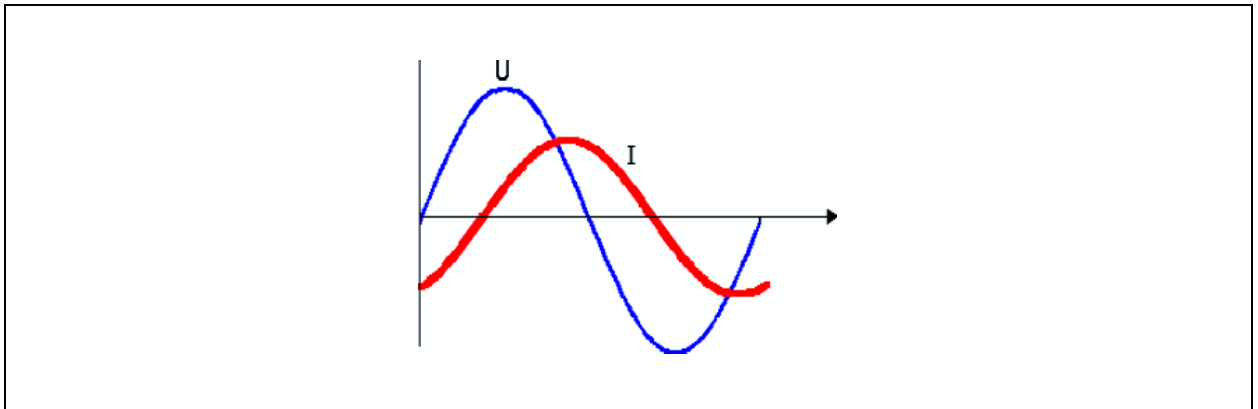


Figure I.5. Formes d'onde (tension, courant) d'une charge linéaire [6].

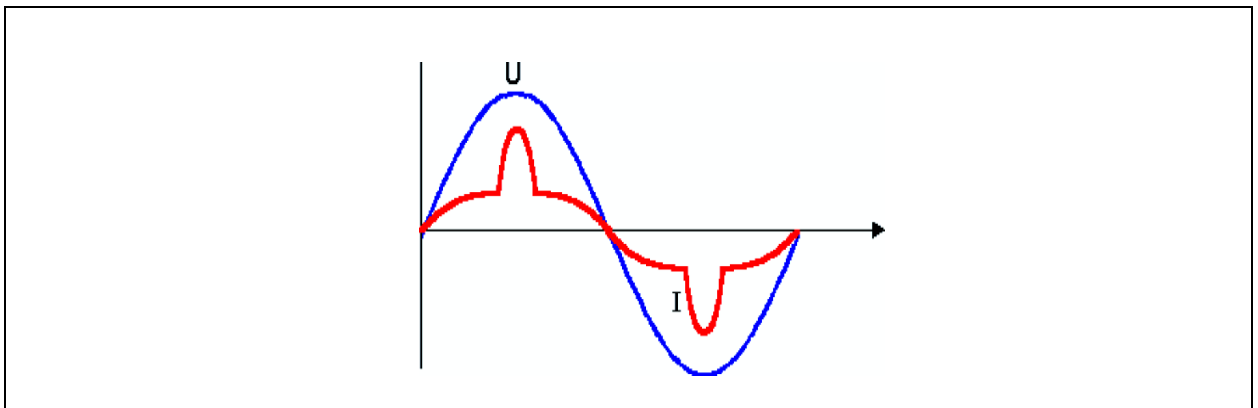
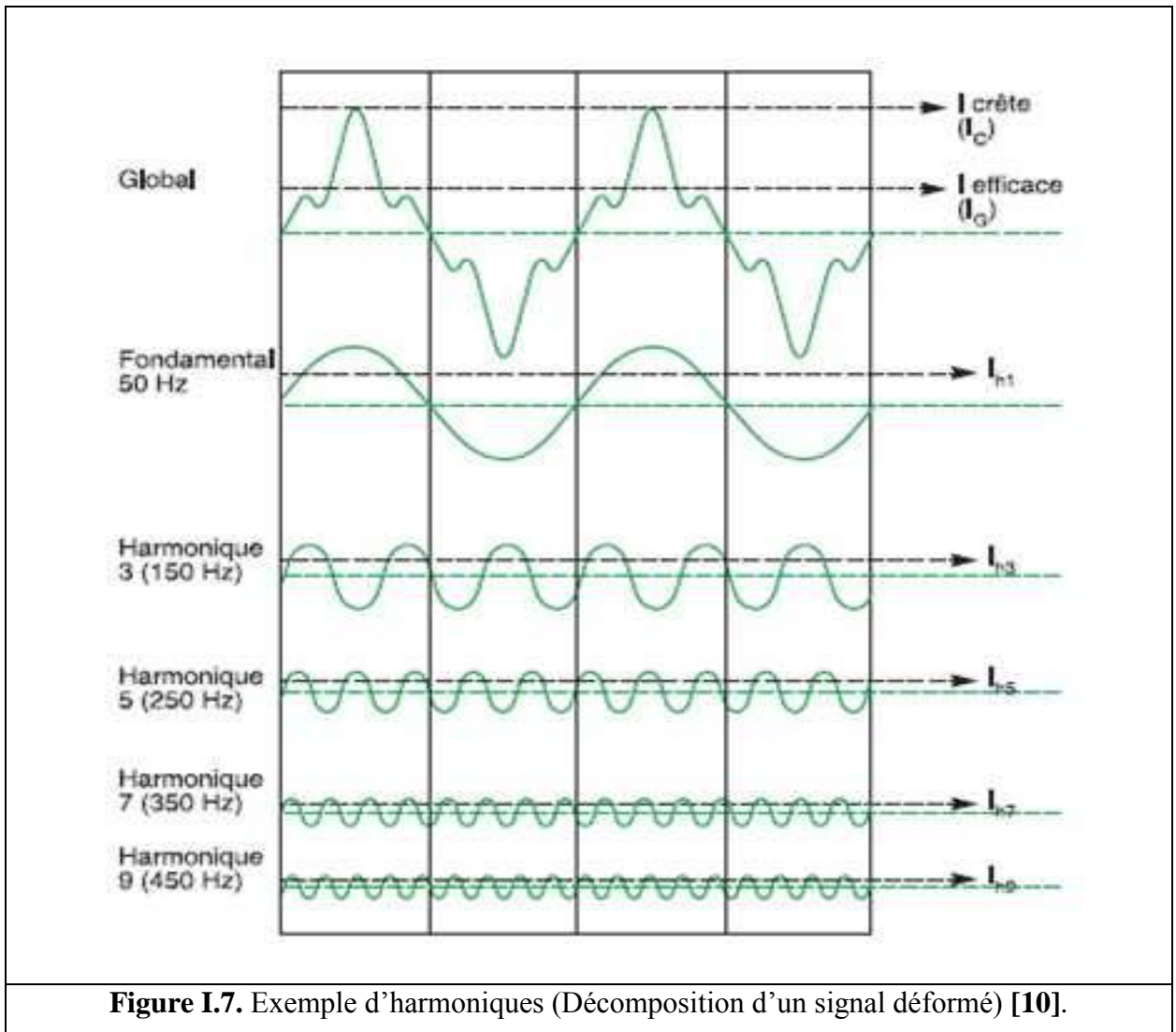


Figure I.6. Formes d'onde (tension, courant) d'une charge non linéaire [6].

I.4. PERTURBATIONS HARMONIQUES

Les signaux (tension et courant) relevés sur le réseau sont des signaux déformés et loin d'être des sinusoïdes parfaites.

Un signal déformé est la superposition d'un signal fondamental (à 50 Hz) et des signaux harmoniques de fréquences qui sont des multiples entiers de la fréquence du fondamental (100, 150, 200, 250...etc.). En pratique on s'intéresse qu'aux harmoniques significatifs (jusqu'au rang 40) [6].



I.4.1. Caractéristiques d'un signal

I.4.1.1. Rang d'un harmonique

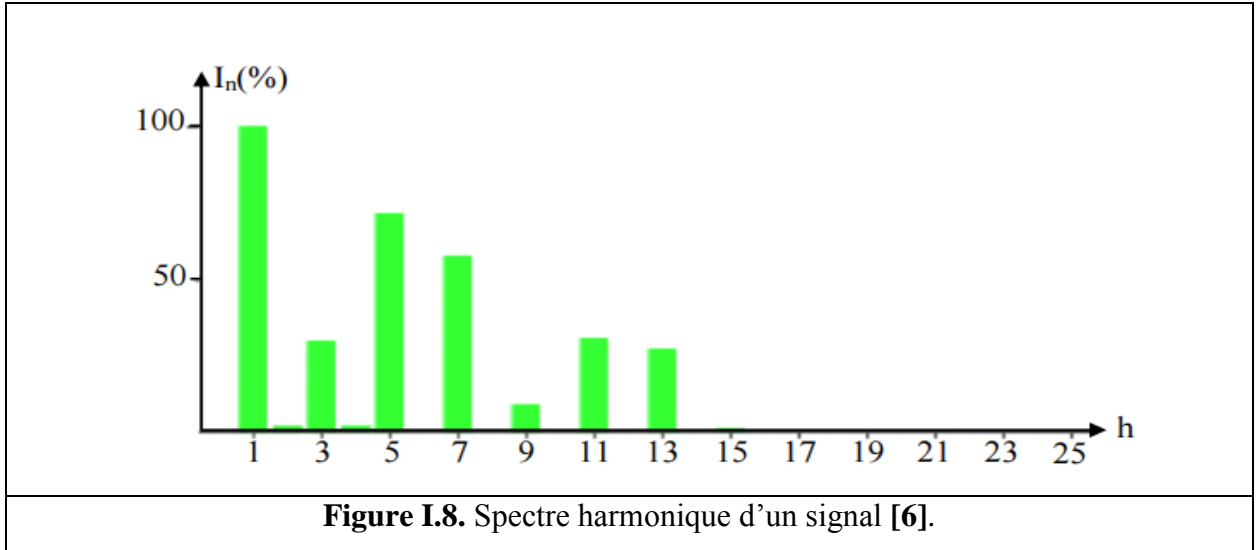
Le rang harmonique est le rapport de sa fréquence f_n à celle du fondamental, généralement la fréquence industrielle 50Hz ou 60Hz. Par principe, le fondamental f_1 a le rang 1 [11].

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{I.1})$$

I.4.1.2. Représentation spectrale

C'est un histogramme donnant l'amplitude de chaque harmonique en fonction du rang. L'amplitude est donnée en valeur relative par rapport au fondamental en un point spécifié [6].

La figure ci-dessous montre un exemple de spectre.



I.4.1.3. Analyse de Fourier

Sur le plan mathématique, on peut décomposer tout signal périodique en une série de sinusoides dont la fréquence est un multiple de la fréquence fondamentale du signal. Cette série se nomme série de Fourier, d'après le mathématicien français Joseph Fourier du début du XIXe siècle [9] [11].

Si $G(t)$ est un signal à décomposer en série de Fourier, la série s'écrit comme suit :

$$G(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos.(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin.(n\omega t) \quad (I.2)$$

Avec :

A_0 : Composante continue ou valeur moyenne du signal, généralement nulle en distribution électrique en régime permanent .

A_n et B_n : Amplitudes crêtes des composantes harmoniques de rang n .

ω : Pulsation fondamentale.

En électrotechnique, on utilise habituellement les valeurs efficaces plutôt que les valeurs crêtes. Par conséquent, l'équation précédente devient :

$$G(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\sqrt{2}} \cdot \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{B_n}{\sqrt{2}} \cdot \sin(n\omega t) \quad (\text{I.3})$$

On obtient les coefficients A_n et B_n par résolution analytique ou numérique des intégrales suivantes :

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T G(t) \cdot dt \quad (\text{I.4})$$

$$A_n = \frac{1}{T\sqrt{2}} \int_0^T G(t) \cdot \cos(n\omega t) \cdot dt \quad (\text{I.5})$$

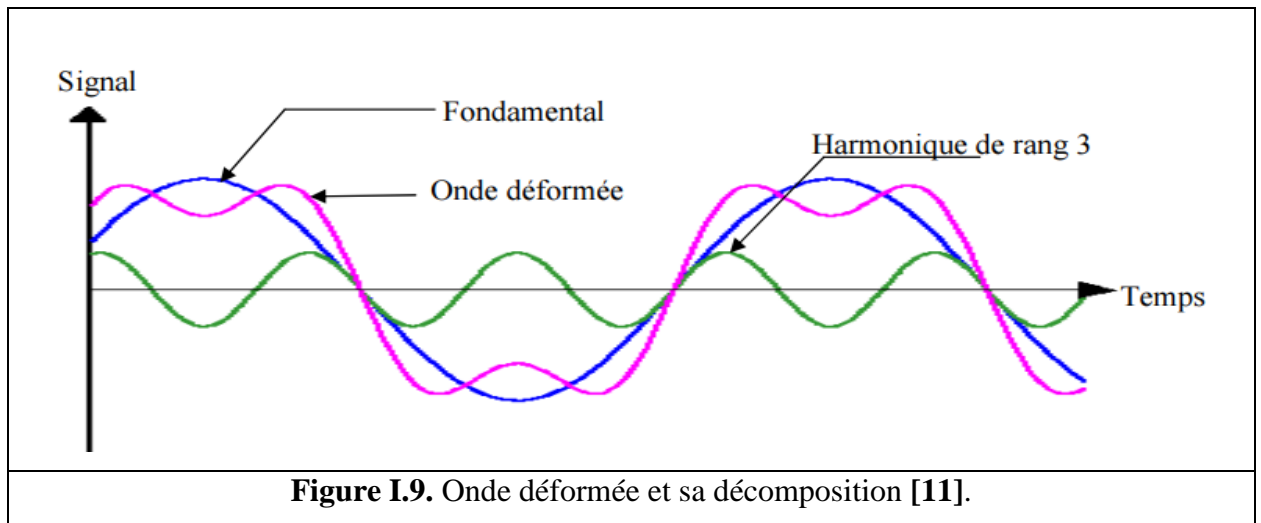
$$B_n = \frac{2}{T\sqrt{2}} \int_0^T G(t) \cdot \sin(n\omega t) \cdot dt \quad (\text{I.6})$$

Où T correspond à la période du signal qui est égale à $\frac{2\pi}{\omega}$ ou $\frac{1}{f}$

Remarque

L'amplitude des harmoniques des tensions décroît avec la fréquence, selon les normes on prend en considération les harmoniques jusqu'au rang 40 [11].

La figure (**Figure I.6**) illustre un exemple de cette décomposition



I.4.2. Valeur caractérisant un signal déformé

I.4.2.1. Valeur efficace d'une grandeur déformée [12]

Un procédé couramment utilisé pour décrire un signal $G_{(t)}$ périodique de période T est l'évaluation de sa valeur efficace :

$$G_{\text{eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T G^2(t) \cdot dt} \quad (\text{I.7})$$

Lorsque le développement en série de Fourier d'une fonction périodique est continu, on peut déterminer sa valeur efficace comme suit :

$$G_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (G_h)^2} \quad (\text{I.8})$$

h : Rang harmonique de rang h .

Remarque

Lorsqu'un signal comporte des composantes harmoniques, sa valeur efficace est différente de la valeur efficace du signal fondamental. Il est donc possible d'évaluer grossièrement la déformation du signal en comparant la valeur efficace de la composante fondamentale et la valeur efficace [12].

I.4.2.2. Taux individuel

Il donne une mesure de l'importance de chaque harmonique par rapport au fondamental ou C 'est le rapport de la valeur efficace de l'amplitude de l'harmonique du rang n à celle du fondamental [11].

$$T_i(\%) = 100 \cdot \left(\frac{G_n}{G_1}\right) \quad (\text{I.9})$$

I.4.2.3. Taux de distorsion harmonique global (%)

Il donne une mesure de l'influence thermique de l'ensemble des harmoniques ; C 'est le rapport de la valeur efficace des harmoniques à celle du fondamental [11].

$$\text{TDH (\%)} = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (G_n)^2}}{G_1} \quad (\text{I.10})$$

- Taux de distorsion harmonique en courant TDH_i

$$\text{TDH}_i = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (I_n)^2}}{I_1} \quad (\text{I.11})$$

I_n : Courant harmonique de rang n.

I_1 : Fondamental de courant.

Différents taux de distorsion en courant sont proposés dans le tableau suivant [13] :

Tableau I.2 : TDH_i pour diverses charges non linéaires.

Charges non linéaires	TDH_i
Variateurs de vitesse	80
Alimentation de micro-ordinateur	70
Tubes fluorescents	>100

- Taux de distorsion harmonique en tension TDH_v

$$\text{TDH}_v = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2}}{V_1} \quad (\text{I.12})$$

V_n : Tension harmonique de rang n.

V_1 : Tension fondamentale

Remarque

Le TDH_i ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le TDH_v est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court-circuit imposée par le réseau Z_{cc} .

$$\text{TDH}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (|Z_{cc}| \cdot I_n)^2}}{V_1} \quad (\text{I.13})$$

I.4.2.4. Facteur de crête [12]

Le facteur de crête est défini par le rapport entre la valeur de crête d'un signal et sa valeur efficace. Il caractérise la surtension ou la surintensité instantanée maximale subie par un appareil.

$$F_c = \frac{G_c}{G_{\text{eff}}} \quad (\text{I.14})$$

G_c : Valeur crête

G_{eff} : Valeur efficace

Pour une onde sinusoïdale, le facteur de crête est égale à $\sqrt{2} = 1.41$.

Une onde ayant un facteur de crête inférieur à cette valeur ($\sqrt{2}$) sera plutôt aplatie, par contre, si le facteur est supérieur à ($\sqrt{2}$) l'onde sera plutôt pointue.

I.4.2.5. Facteur de puissance [14]

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties : active P , réactive Q et déformante D . Son expression est donnée par l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (\text{I.15})$$

Pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance F_p est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S :

$$F_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (\text{I.16})$$

Le facteur de puissance sera toujours inférieur à 1.

I.4.2.6. facteur de déphasage

Le facteur de déphasage est le rapport entre la puissance active et apparente de la composante fondamentale [15].

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (\text{I.17})$$

Comme il peut être défini par le cosinus du déphasage entre les composantes fondamentales de courant et de la tension.

$$\varphi_1 = \text{déphasage } (V_1, I_1) \quad (\text{I.18})$$

I.4.2.7. Facteur de déformation

Il caractérise le lien entre le facteur de puissance et le facteur de déphasage [15].

$$F_d = \frac{F_p}{\cos\varphi_1} = \frac{\cos\varphi}{\cos\varphi_1} \quad (\text{I.19})$$

I.4.3. Inter-harmoniques

Les inters harmoniques sont des signaux de fréquence non multiples entiers de la fréquence fondamentale (130Hz, 170Hz, 220Hz.....) c'est-à-dire situées entre les harmoniques.

Certains sont émis par les charges non linéaires d'autres sont injectés intentionnellement par les distributeurs sur leurs réseaux pour télécommander des relais et ainsi piloter les changements de tarification des compteurs domestiques et professionnels [12] [15].

I.4.4. Impédance harmonique

L'impédance harmonique présentée par le réseau dépend de la fréquence à laquelle on la considère. On peut définir en tout point du réseau une impédance harmonique Z_n qui dépend du rang harmonique n considéré.

Elle représente la mise en parallèle de toutes les lignes qui convergent vers ce point. Les courants harmoniques émis par une charge perturbée se propagent entre les différentes lignes.

Le produit des harmoniques du courant provenant des charges non linéaires I_n et de l'impédance Z_n donne une tension harmonique selon la loi d'Ohm [12].

$$V_n = Z_n \cdot I_n \quad (\text{I.20})$$

I.4.5. Harmoniques de courant & de tension

I.4.5.1. Courant harmonique

Les courants harmoniques présents sur le réseau électrique proviennent de l'utilisation des charges non linéaires. Ces charges se comportent approximativement comme des sources harmoniques. L'amplitude de ces courants ne dépend que de la charge, elle est d'autant plus élevée que la charge est importante. Le (Tableau I.3) illustre les limites des composantes harmoniques en courant [16] [17].

Tableau I.3. Limite des composants harmoniques en courant [17]

Harmoniques impairs		Harmonique pairs	
Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)	Rang	Courant harmonique admissible maximal (A)
3	2.30	2	1.08
5	1.14	4	0.43
7	0.77	6	0.33
9	0.44	8 ≤ K ≤ 40	0.23*8/K
11	0.33		
13	0.21		
15 ≤ K ≤ 39	0.15*15/K		

Remarque

Au niveau international, les normes 1000 de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) définissent le niveau des courants et des tensions harmoniques à ne pas dépasser. La norme CEI-1000-3-2 (Tableau I.2) fixe la limitation des courants injectés dans le réseau public pour des équipements dont le courant par phase est inférieur à 16A. Il s'agit là des appareils du domaine domestique. Aussi du fait de leur puissance, les équipements industriels sont exclus du champ d'application de cette norme. Par ailleurs, un projet de norme (CEI-1000-3-4) est en cours d'élaboration pour les appareils dont le courant consommé est supérieur à 16A [13].

I.4.5.2. Tension harmonique

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

Tableau I.4. Niveaux de compatibilité des harmoniques en tension [17].

Harmoniques impairs non multiple de 3		Harmoniques impairs multiple de 3		Harmonique pairs	
Rang	Vk(%)	Rang	Vk(%)	Rang	Vk(%)
5	6	3	5	2	2
7	6	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	$0.2+0.5*25/k$				

L'émission harmonique en tension due aux matériels du réseau n'est pas assez importante, elle est due aux imperfections de construction des bobinages, des machines tournantes, des moteurs, des alternateurs et des transformateurs. Le Tableau I.4 donne les différents niveaux de compatibilité des harmoniques en tension.

I.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présentés les perturbations électriques et leurs types, ainsi que les perturbations harmoniques et leurs propriétés.

Et dans le prochain chapitre, nous verrons l'impact de ces problèmes sur le réseau électrique, et les solutions que nous mettons en œuvre

CHAPITRE II :

EFFETS DES PERTURBATIONS HARMONIQUES ET LEURS SOLUTIONS

II.1. INTRODUCTION

Avec l'augmentation des sources d'harmoniques dans le réseau électrique, les ondes de courant et de tension sont devenues plus déformées et donc l'apparition de divergences dans la qualité de l'énergie électrique et est devenue l'un des plus gros problèmes qui existent actuellement.

Les conséquences sur les systèmes d'alimentation électrique deviennent préoccupantes du fait de l'utilisation croissante de ces équipements, mais aussi de l'utilisation des composants de l'électronique de puissance dans presque toutes les charges électriques. En effet, une charge non linéaire impose au réseau un courant triphasé, déformé avec une amplitude très importante et son fondamental est déphasé par rapport à la tension du réseau. Cette discontinuité s'accompagne de deux inconvénients perturbant le réseau d'alimentation :

- La consommation de l'énergie réactive,
- L'injection sur le réseau de courants harmoniques.

Ce qui se traduit par un facteur de puissance très faible de l'installation globale. La présence de ces harmoniques génère des effets négatifs sur la quasi-totalité des composants du système électrique, en créant de nouvelles contraintes diélectriques, thermiques et/ou mécaniques ainsi que des perturbations électromagnétiques et acoustiques importantes [18].

II.2. EFFET DES HARMONIQUES

On peut considérer que les perturbations provoquées par les harmoniques se manifestent de deux façons sur les appareils et les équipements électriques.

II.2.1. Effets instantanés

II.2.1.1. Perturbation des convertisseurs statiques et des matériels électroniques

Les tensions harmoniques peuvent perturber les dispositifs de régulation des systèmes électroniques. Elles peuvent influencer les conditions de commutation des thyristors lorsqu'elles déplacent ou multiplient les passages par zéro de la tension.

Les appareils utilisant la valeur crête de la tension à des fins de régulation pourront également être perturbés [19].

Les redresseurs eux même générateurs d'harmoniques, sont perturbés par ceux qu'on leur impose, par exemple :

- Les redresseurs hexaphasés sont sensibles aux rangs 2 et 4.
- Les redresseurs dodécaphasés aux rangs 5 et 7 [20].

II.2.1.2. Vibrations et bruits

Les vibrations et les bruits acoustiques dans les appareils électromagnétiques générés par les forces électrodynamiques proportionnels aux courants harmoniques (transformateur, inductances).

Des couples mécaniques pulsatoires engendrent des vibrations dans les machines tournantes [19].

II.2.1.3. Perturbation des systèmes de télécommande centralisée

La télécommande centralisée permet de piloter certains appareils au travers du réseau grâce à des signaux à 175 ou 188 Hz superposés aux ondes de courant et de tension à 50 Hz, un taux d'harmoniques élevé préexistant à ces fréquences peut entraîner l'enclenchement intempestif des relais commandés par ces signaux [19].

II.2.1.4. Dysfonctionnement des systèmes de protection et des relais

Les relais et les dispositifs de protection utilisant les courants de charge peuvent être affectés par la présence d'harmoniques, dans la mesure où ceux-ci modifient la valeur instantanée de ces courants [19].

II.2.2. Effets différés

Ce sont les effets qui apparaissent après une exposition plus au moins longue au phénomène. Ils se traduisent par une perte partielle des fonctionnalités, une indisponibilité et même une destruction complète de l'appareil.

Les effets différés sont classés selon le délai avant destruction comme suit :

- Effets à court terme (quelques secondes) ;
- Effets à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ;
- Effets à long terme (de quelques heures à quelques années) [21].

II.2.2.1. Echauffement des condensateurs

Les pertes, causes de l'échauffement, sont dues à deux phénomènes : conduction et hystérésis dans les diélectriques. Elles sont en première approximation proportionnelles au carré du courant efficace.

Les condensateurs sont donc sensibles aux surcharges, quelle soient dues à une tension fondamentale trop élevée ou à la présence de tensions harmoniques [11].

Les surchauffes des condensateurs, lors des surtensions, sont nocives car s'il n'y a pas claquage immédiat ; pour une surtension de 10% il en résulte une augmentation de 7% de la température et une réduction de l'espérance de vie du condensateur de 30% [22].

II.2.2.2. Echauffement des machines tournantes et des transformateurs

Les écarts de vitesse importants entre les champs tournants harmoniques et le rotor causent des pertes supplémentaires dans les machines tournantes.

Les pertes supplémentaires des transformateurs sont dues à l'effet de peau qui se traduit par une augmentation de la résistance apparente du cuivre avec la fréquence, ainsi qu'à l'hystérésis et aux courants de Foucault dans le circuit magnétique [18].

II.2.2.3. Echauffement des câbles et des équipements

Les pertes des câbles traversés par des courants harmoniques sont majorées, d'où une augmentation de température. Parmi les causes des pertes supplémentaires on peut citer :

- Une augmentation de la valeur efficace du courant pour une même puissance active consommée ;
- L'élévation de la résistance apparente de l'âme avec la fréquence, phénomène dû à l'effet de peau ;

- L'augmentation des pertes diélectriques dans l'isolant avec la fréquence, si le câble est soumis à une distorsion de tension non négligeable [18].

Remarque

Les effets à moyen terme et à long terme génèrent des échauffements dans les condensateurs et les conducteurs et provoquent un vieillissement prématuré du matériel ou encore des échauffements dus aux pertes supplémentaires dans les machines et les transformateurs.

II.3. SOLUTIONS DE DEPOLLUTION TRADITIONNELLES

On a plusieurs solutions de dépollution traditionnelles des réseaux électriques. Ce sont des techniques qui apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées.

II.3.1. Utilisation une inductance (selfs) série

Les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés utilisent cette solution, il consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant une efficacité limitée. Il faut installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [23].

II.3.2. Transformateur à couplage spécial

Il s'agit de limiter la circulation des courants harmoniques à une partie aussi petite que possible de l'installation à l'aide de transformateurs à couplage approprié. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle zigzag, empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre, ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques [23].

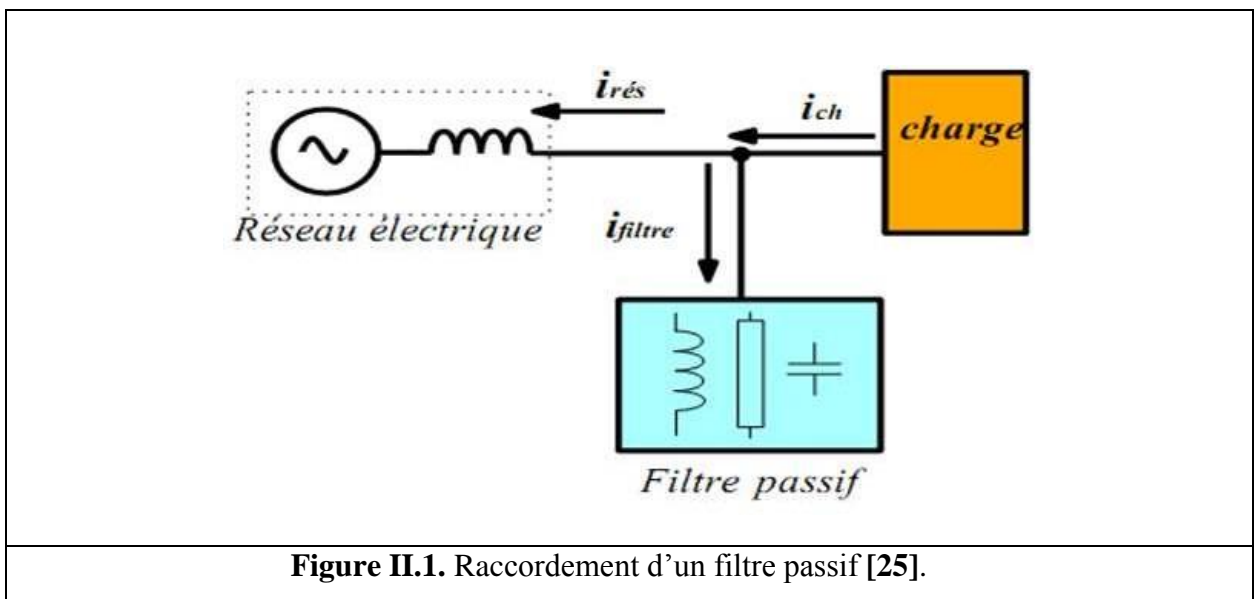
II.3.3. Compensation de la puissance réactive

Les moteurs asynchrones et plus récemment les dispositifs à base d'électronique de puissance majoritairement il consomment la puissance réactive. Pour relever le facteur de

puissance on utilise différentes méthodes de compensation. La plus simple consiste à placer des batteries de condensateurs en parallèle avec le réseau. L'inconvénient de cette méthode réside dans le fait que la puissance réactive fournie par les condensateurs est constante et qu'elle ne s'adapte pas à l'évolution du besoin [24].

II.3.4. Filtrage passif

Le filtrage passif est basé sur l'utilisation de circuits électriques RLC (résistance, inductance, capacité) dit filtre passif, dont le principe est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants et à éliminer les tensions harmoniques. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. Donc avant le choix des éléments constituant le filtre passif et leur dimensionnement, une connaissance précise des rangs harmoniques qui devront être filtrés et des atténuations requises est nécessaire, car plusieurs types de filtres passifs sont utilisés pour différentes dépollutions à réaliser [25].



Avantages

- Amélioration du taux de distorsion harmonique en courant TDH_i

Inconvénient

- Risque de résonance.
- Pas d'adaptabilité.

II.3.4.1. Principe de fonctionnement

Le principe du filtrage passif est d'éviter les courants harmoniques au même temps éliminer les tensions harmoniques résultantes en modifiant l'impédance locale du réseau [26].

On peut classifier les filtres passifs selon les paramètres suivants:

- Leur emplacement sur le réseau
- Leur mode de connexion
- Leur degré d'amortissement
- Leur fréquence de résonance

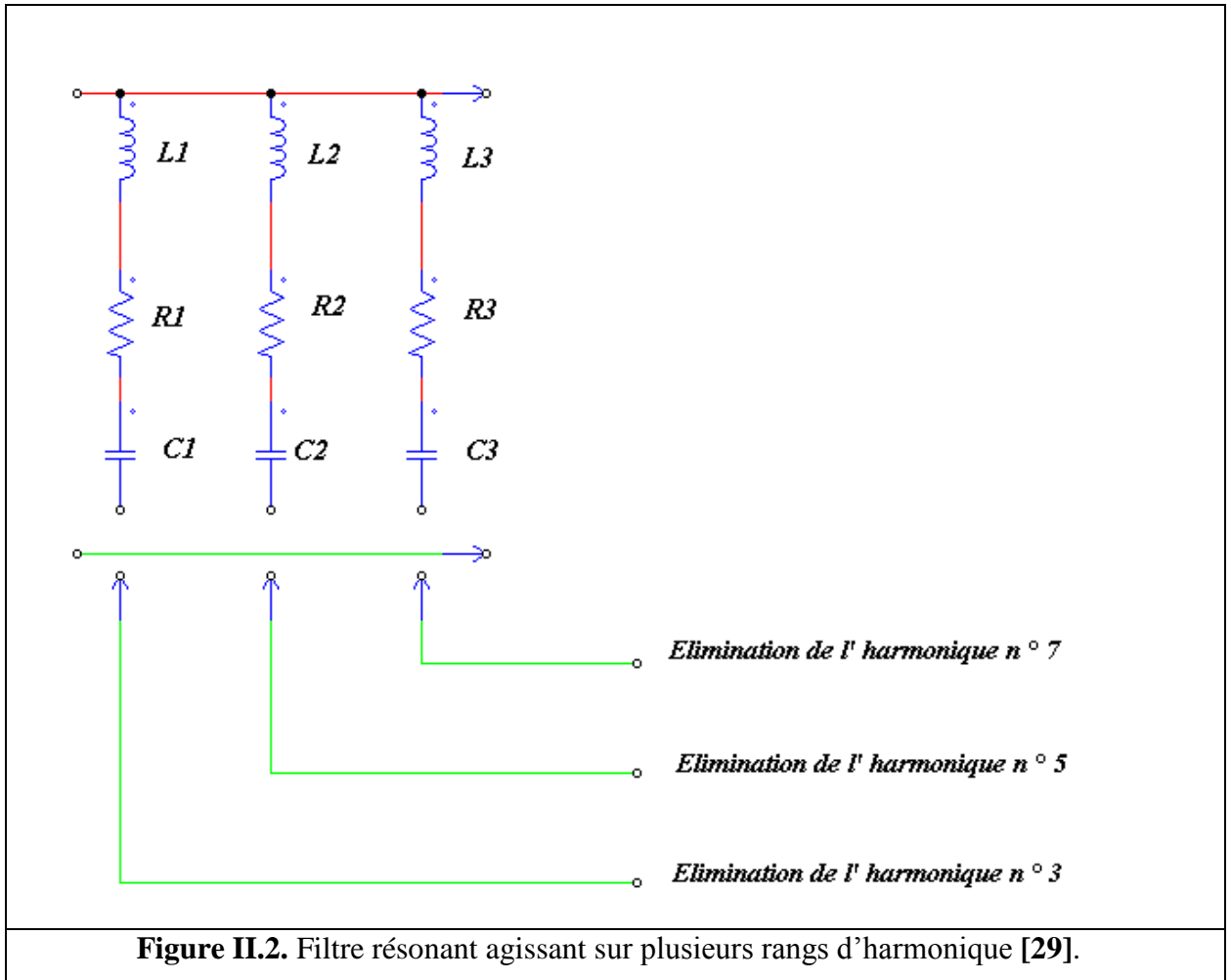
II.3.4.2. Filtre passif résonant

Le filtre passif résonant (figure II.2), est constitué d'un circuit résonant composé d'un condensateur et d'une inductance en série accordé sur la fréquence de l'harmonique que l'on veut éliminer. Ce filtre a pour caractéristique une impédance très faible à un courant harmonique déterminé [31].

Lorsqu'on souhaite réaliser le filtrage d'un signal déformé entaché par plusieurs courants harmoniques, il est nécessaire de prévoir un ensemble de filtres, chacun d'entre eux agit sur le rang harmonique à éliminer [30] [26].

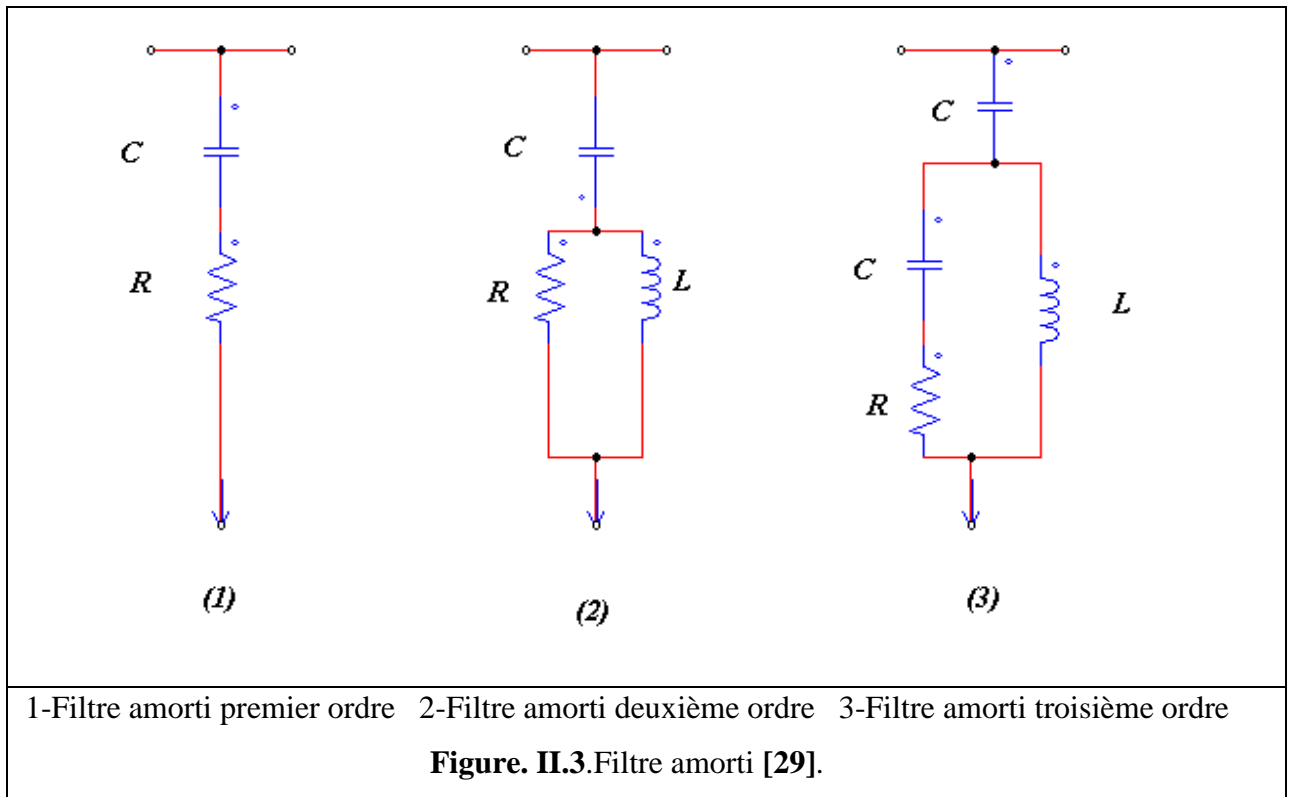
II.3.4.3. Filtre passif amorti

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. On distingue trois types de filtre amorti (figure II.3): le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordre sont plus performants [27] [28].



Quelques avantages du filtre amorti

- Performances moins sensibles aux variations de température, aux déviations de fréquence et aux tolérances des composants ;
- Faible valeur d'impédance pour une large gamme de fréquence harmonique [26].



II.4. SOLUTIONS DE DEPOLLUTION MODERNES

II.4.1. Filtrage actif

Ces solutions sont proposées comme des solutions efficaces de dépollution des réseaux électriques afin de traiter les inconvénients inhérents aux solutions traditionnelles que présentent les filtres passifs (non adaptabilité aux variations de la charge et du réseau, apparition des résonances). 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 parallèle (FAP), soit en série (FAS) suivant qu'il est conçu respectivement pour compenser les courants ou les tensions harmoniques, soit associé à des filtres passifs pour constituer ce qu'on appelle les filtres hybrides [31] [32] [33].

Les avantages des filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants [34] :

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

Ils présentent, par ailleurs, quelques inconvénients :

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

II.4.1.1. Rôle du filtre actif

En principe le rôle du filtre actif est d'éliminer les composantes harmoniques qui se prolifèrent dans les réseaux et cela en injectant des courants d'amplitude similaire mais de phase opposée au courant harmonique créé par la charge afin que le courant dans la ligne garde une allure sinusoïdale [26].

II.4.1.2. Principe de fonctionnement du filtre actif

Les filtres actifs sont composés d'onduleurs qui sont des convertisseurs statiques de puissance alimenté par une source de courant ou de tension continue, l'onduleur peut délivrer un courant ou une tension dont le contenu harmonique dépend uniquement de la loi de commande de commutation des interrupteurs [29].

Les filtres actifs agissent donc comme des sources de tension ou de courant harmoniques en opposition de phase avec ceux du réseau afin de rétablir un courant de source quasi sinusoïdal [26].

- Il existe trois types de topologies de filtres actifs

II.4.1.3. Filtre actif série (F.A.S)

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

Il vise à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibrés) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Cette structure est proche, dans le principe, à des conditionneurs de réseau. Toutefois, cette topologie présente quelques

difficultés et inconvénients lors de sa mise en œuvre, elle ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge.

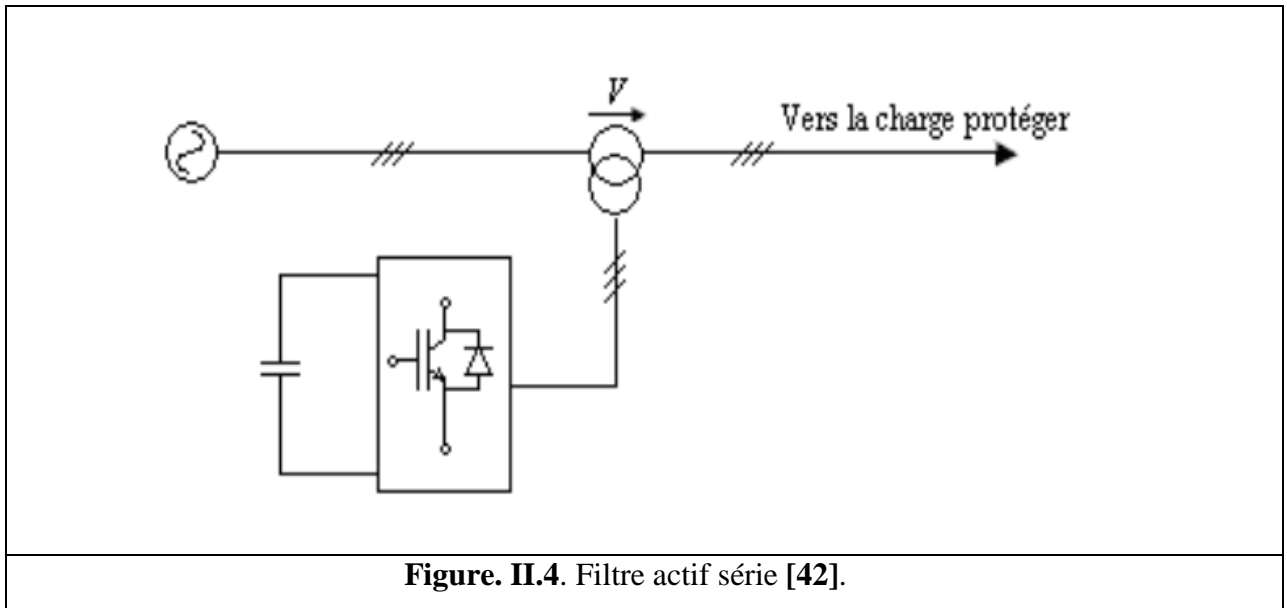


Figure. II.4. Filtre actif série [42].

II.4.1.4. Filtre actif parallèle (F.A.P)

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau est le plus souvent contrôlé comme un générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Le courant coté réseaux sera ainsi sinusoïdal, cependant la tension au point de raccordement ne le sera que si la tension ne contient pas d'harmoniques. Ainsi l'objectif d'un filtre parallèle générateur de courant consiste à empêcher les courants harmoniques absorbés par la charge non linéaire de circuler à travers l'impédance du réseau située en amont du point de connexion du filtre. Le dimensionnement du filtre actif est lié au courant harmonique à générer. La majorité des filtres actifs parallèles actuellement installés sur les réseaux électriques fonctionnent selon ce principe [35].

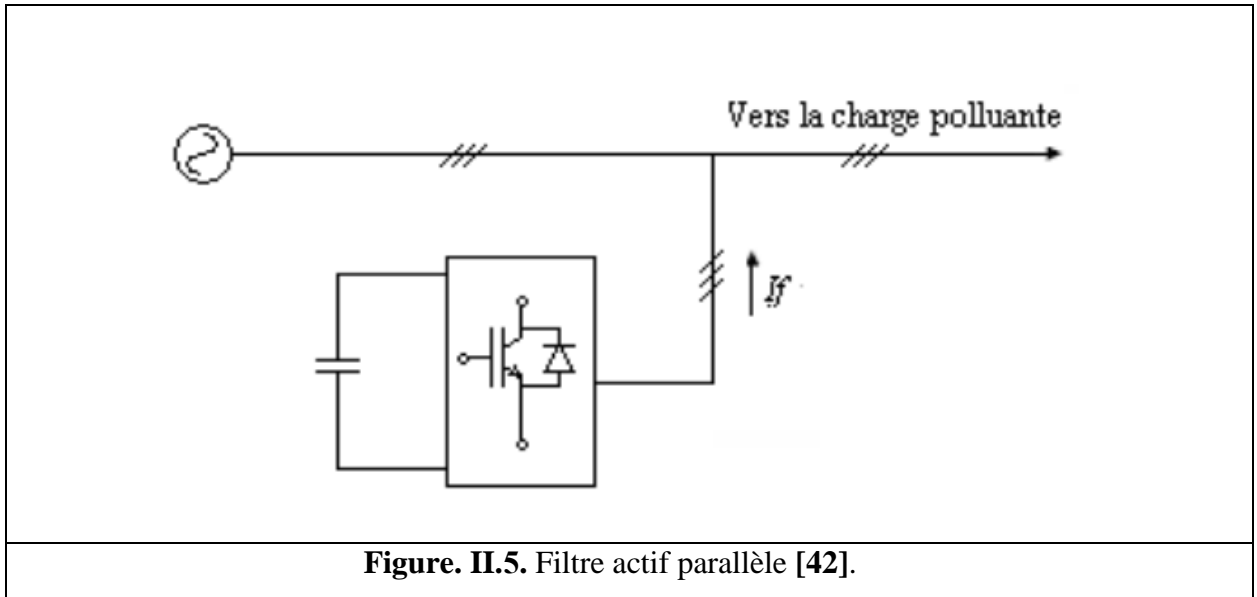


Figure. II.5. Filtre actif parallèle [42].

II.4.1.5. Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

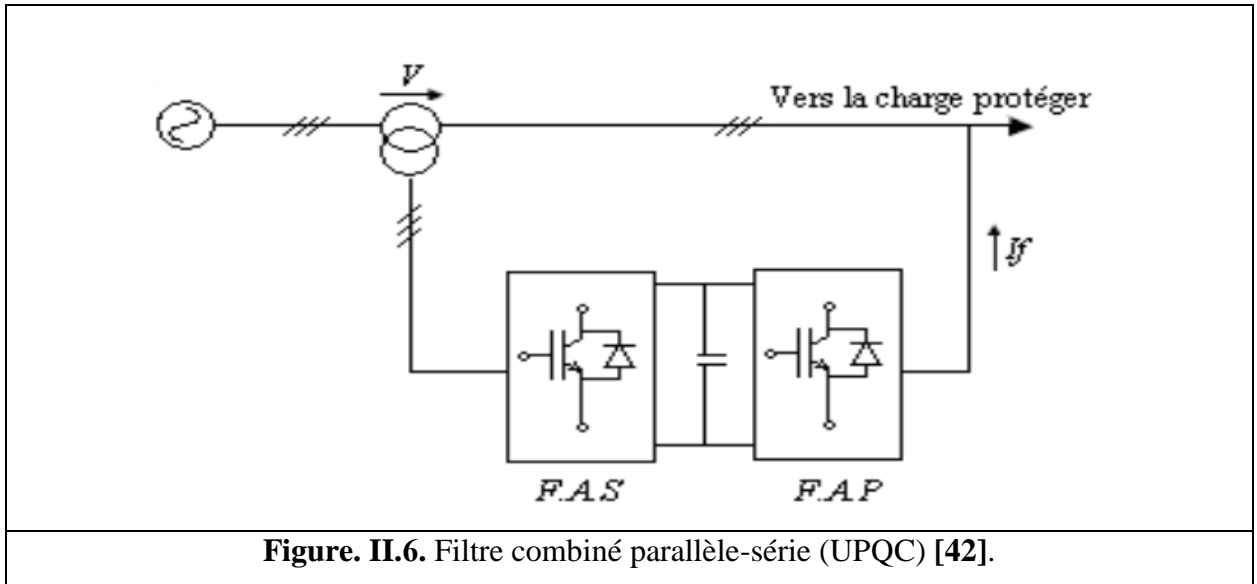
D'après ce qui précède, ni le FAP, ni le FAS de puissance ne sont capables d'effectuer un filtrage total, donnant une tension sinusoïdale du côté de la charge et un courant sans harmoniques du côté du réseau. Cet objectif peut être atteint en utilisant un conditionneur d'énergie électrique de puissance communément appelé (Unified Power Quality Conditioner : UPQC) composé de ces deux filtres actifs de puissance connecté en série et l'autre en parallèle avec la charge. L'UPQC permet de réaliser simultanément l'isolation harmonique, tension ou courant, entre la source et la charge et la compensation des différents types de perturbations : harmoniques de courant et de tension, creux tension, surtension et déséquilibre de tension [38] [37] [36] [32].

II.4.1.6. Combinaison hybride active et passive

Par conséquent le prix des filtres actifs et afin de réduire le dimensionnement, 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. [32]

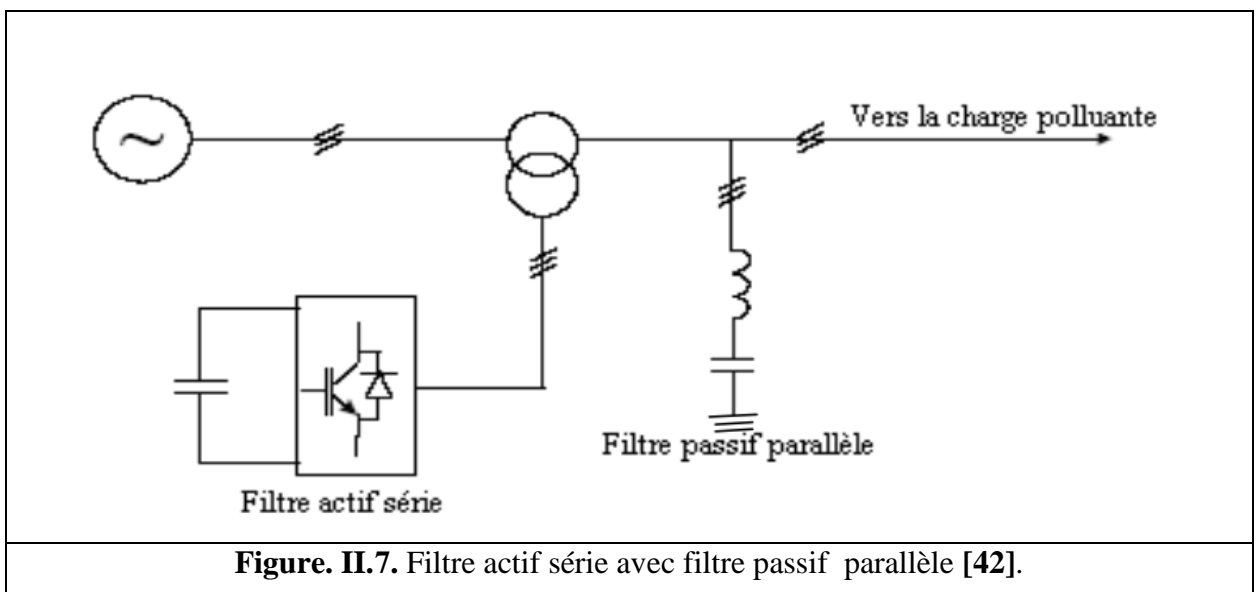
Les filtres hybrides les plus étudiés sont :

- 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.



II.4.1.6.1. Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles

Le rôle du FAS dans ce cas est d'empêcher les courants harmoniques de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences comme le montre la Figure. II.7 [39].



II.4.1.6.2. Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles

Le principe de fonctionnement de cette configuration, présentée en Figure (II.8) est la même que la précédente avec l'avantage de réduire encore le dimensionnement du FAS car le courant qui le traverse est plus faible. De plus, le FAS est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge [40][39].

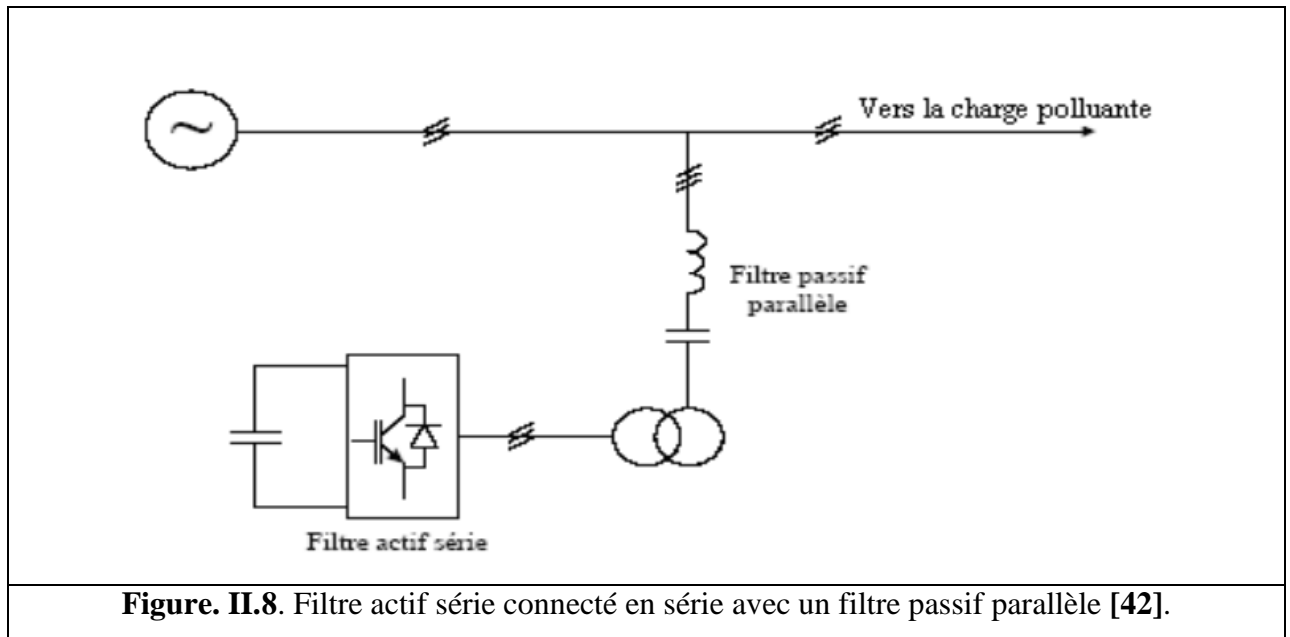
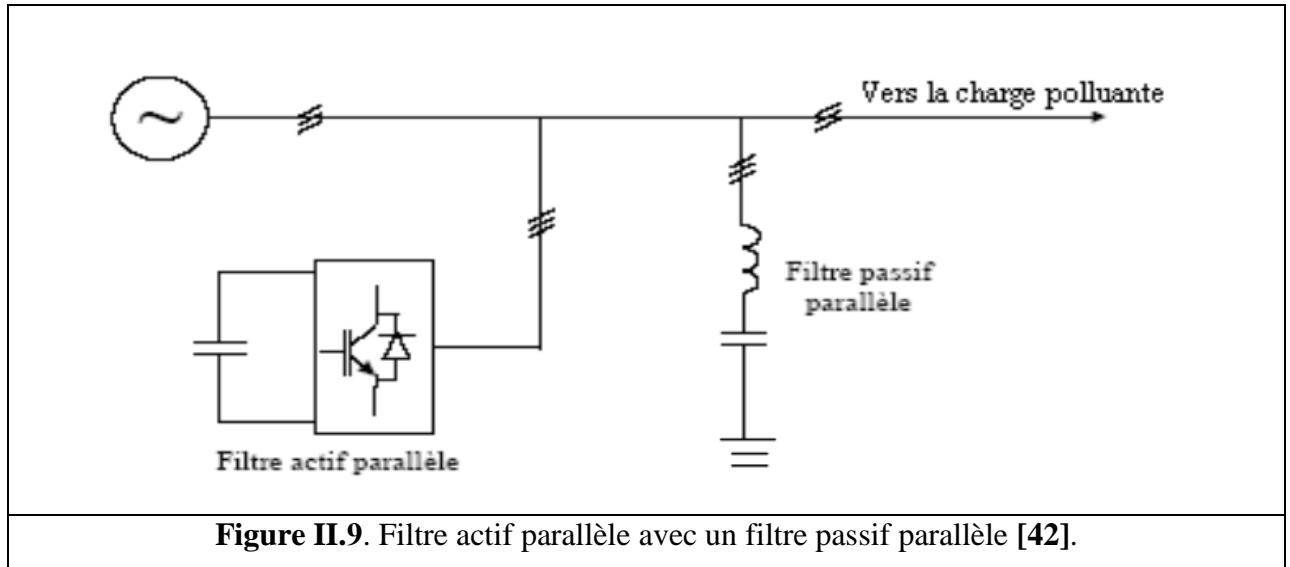


Figure. II.8. Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle [42].

II.4.1.6.3. Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle

La compensation de courantes harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante, et le rôle du filtre actif parallèle dans cette configuration, montrée en Figure (II.9).

Le filtre passif accordé sur une fréquence élevée, élimine les harmoniques hautes fréquences y compris ceux créés par le filtre actif parallèle. La compensation des courants harmoniques émis par un cyclo convertisseur de forte puissance a été déjà appliquée dans ce type de filtrage [40].



- Comparaison des différents filtres

Tableau II.1 Avantages et inconvénients des différents filtrages [41].

Principes	Avantages	Inconvénients
Filtrage passif	Amélioration de la forme du courant	Risque de résonance, pas d'adaptabilité, encombrant
Filtrage actif parallèle	Amélioration de la forme du courant, adaptabilité aux variations de la charge du réseau	Amélioration de la forme de tension n'est pas toujours évidente
Filtrage actif série	Amélioration de la forme de tension, adaptabilité aux variations de la charge du réseau	Pas d'amélioration de la forme du courant
Combinaison parallèle série actif	Amélioration de la forme du courant, Amélioration de la forme de tension, adaptabilité aux variations de la charge du réseau	Réalisation difficile

Tableau II.2 Comparaison entre le filtre actif et le filtre passif.

Caractéristiques	Filtre actif	Filtre passif
Adaptation à l'évolution de la charge du réseau	Oui, automatiquement	Non
Limite de compensation du rang harmonique	Compense dans la limite de sa bande passante qui est déterminée par la fréquence de commutation maximale des semi-conducteurs de son onduleur	Le filtre résonant ne compense qu'un rang harmonique à la fois le filtre amorti compense dans la limite de sa band passante
Risque de la résonance entre le filtre et réseau	Non	Oui
Compensation de la puissance réactive	Oui, le cout est plus élève que celui du filtre passif	Oui
Possibilité de surcharge lorsque le courant harmonique dépasse le dimensionnement du filtre	Non	Oui
Compensation dans les réseaux hauts puissance	Oui, mais le cout est très élève	Oui

II.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons expliqué les perturbations harmonique et leur effet sur le réseau électrique que sont néfastes sur les équipements électriques, Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

Ainsi que nous avons présenté les différentes solutions traditionnelles et modernes de dépollution, Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème.

Les filtres passifs sont souvent pénalisés en termes d'encombrement et de résonance. Nous avons aussi présenté les différentes topologies des filtre actif série et parallèle.

La combinaison parallèle-série actifs est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension.

CHAPITRE III :

CONCEPT DE BASE DES SYSTEMES FACTS

III.1. INTRODUCTION

Avec le développement technologique et industriel que vit le monde entier la demande en énergie électrique est en augmentation continue et sans cesse. Pour satisfaire ces besoins et acheminer cette énergie aux points de consommation dispersés sur un large espace géographique; les réseaux électriques, ayant des capacités de transit limitées à cause des limites thermiques des lignes, doivent s'élargir et de nouvelles lignes d'extension seront ajoutées. Face à ce problème et devant les contraintes environnementales, écologiques et économiques de reconstructions de nouvelles lignes, la compagnie américaine EPRI (Electric Power Research Institute) a lancé, en 1988, un projet d'étude des systèmes FACTS afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques et d'augmenter leurs capacités de transfert.

Aussi ces réseaux électriques de taille importantes seront confrontés par divers problèmes de fonctionnement à cause du contrôle traditionnel utilisant des systèmes de commande électromécaniques de temps de réponse lent par rapport à ces nouveaux systèmes FACTS à base d'interrupteurs statiques et de court temps de réponse (moins d'une seconde). Aujourd'hui cette technologie "FACTS" s'impose pour les systèmes énergétiques en augmentant leurs capacités de transport, en améliorant le contrôle des paramètres de ces derniers donc leur assurer une flexibilité du transfert de l'énergie et améliorer sa stabilité [43].

III.2. DEFINITION DES FACTS

“FACTS” est un terme générique qui caractérise l'ensemble des équipements mettant en jeu de l'électronique de puissance (diodes, thyristors, GTO, IGBT....), Ces éléments jouent le rôle d'interrupteurs très rapides ; ce qui confère aux dispositifs FACTS une vitesse et une fiabilité bien supérieures à celles des systèmes électromécaniques classiques.

Ces équipements contrôlent dynamiquement ensemble ou séparément les différents paramètres du réseau : tension, impédance, la phase du réseau....

Ils sont utilisés pour améliorer, d'une façon générale les performances d'un réseau (stabilité, capacité de transport...) Les FACTS (abréviation anglaise de Flexible AC Transmission Systems), sont définis comme suit :

Ceux sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance. Ils peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques.

Il est possible d'augmenter la puissance active transitée entre deux réseaux soit en maintenant la tension des systèmes, soit en augmentant l'angle de transport entre les deux systèmes, en réduisant artificiellement l'impédance de la liaison. En jouant sur un ou plusieurs de ces paramètres, les FACTS permettant un contrôle précis des transits de puissance réactive, une optimisation des transits de puissance active sur les installations existantes et une amélioration de la stabilité dynamique du réseau, ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créés par des variations rapides de la demande de puissance réactive et ainsi d'augmenter les productions [44].

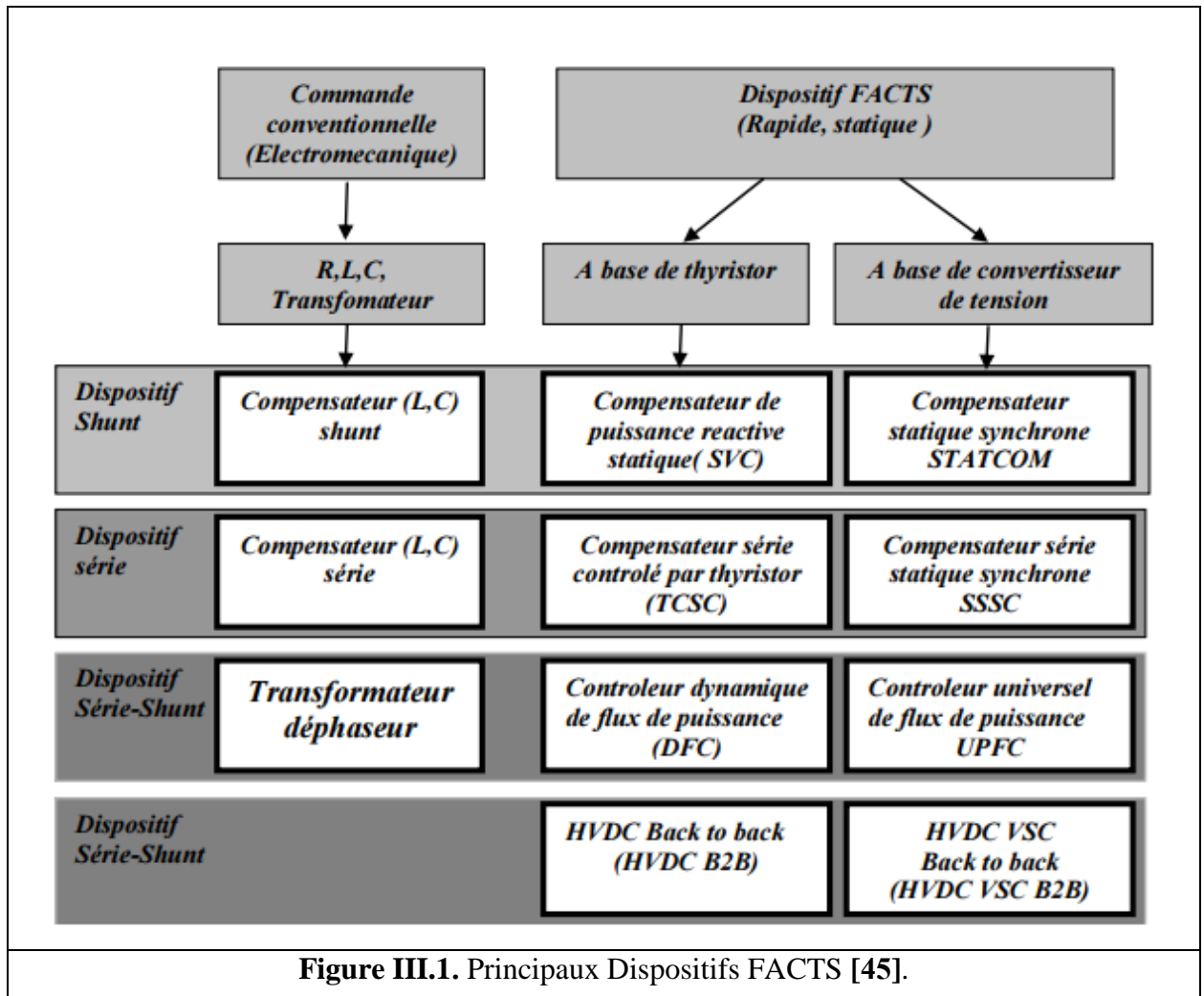
III.3. DIFFERENTES CATEGORIES DES FACTS

Le tableau de la Figure.III.1 représente te les grandes catégories des dispositifs de contrôle des réseaux électriques; la colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base R L C et transformateurs de valeurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteur mécaniques. Les dispositifs FACTS continents également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance.

La colonne gauche des systèmes FACTS présente les contrôleurs à base des thyristors ou bien à des convertisseurs à thyristor tel que le SVC et le TCSC qui sont connu depuis plusieurs dizaines d'années à titre de compensateurs shunt et série respectivement et qui ont prouvé leur fiabilité dans le contrôle des réseaux.

Les dispositifs dans la colonne de droite sont la technologie la plus avancée des FACTS avec des convertisseurs de sources de tension à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT (Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, le SSSC et l'UPFC. Ces convertisseurs de source de tension fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans

le réseau selon les exigences de contrôle en exerçant une MLI sur les gâchettes des interrupteurs de ces convertisseurs [43].



Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau. En général les FACTS sont divisés en trois grandes catégories principales :

- **Compensateurs séries :** ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. Utilisés pour la compensation série de la puissance réactive et par leur influence sur l'impédance effective des lignes ils interviennent dans le contrôle du flux de puissance et la stabilité de ce dernier. En général ces dispositifs séries injectent une tension en série avec la ligne de transmission.

- **Compensateurs shunts** : Ils consistent en une impédance variable, source variable ou une combinaison des deux. Ils injectent un courant dans le réseau à travers le point de connexion. Ils sont principalement pour la compensation de la puissance réactive et par conséquent contrôler de tension des nœuds.
- **Compensateurs hybrides série-shunt** : c'est une combinaison des dispositifs séries et shunts commandé d'une manière coordonnée afin d'accomplir un contrôle prédéfini. Ils permettent un contrôle multi variables, ils servent à contrôler le flux de puissance active et réactive, la tension et l'angle de transport de l'énergie [45].

III.4. APPLICATION DES DISPOSITIF FACTS DANS LES RESAUX ELECTRIQUE

Ces FACTS ont été intégrés depuis des années dans des réseaux où ils ont prouvé leur efficacité. Les tableaux (III.1) (III.2) résumant le rôle de chacun de ces dispositifs, ainsi que leur capacité de contribution pour différentes applications dans les réseaux électriques [46].

Le nombre d'astérix «*» attribué à chaque dispositif est proportionnel à son efficacité

Tableau III.1. Différentes des niveaux ascendant de contribution entre les FACTS

	Contrôle d'écoulement de puissance	Contrôle De la tension	Stabilité transitoire	Stabilité Dynamique
SVC	*	***	*	**
STATCOM	*	***	**	**
TCSC	**	*	***	**
UPFC	***	***	**	**

Tableau III.2. Le rôle des différents dispositifs FACTS

	Problème	Action à mener	Solutions conventionnel	Dispositifs FACTS
Limite de la Tension	Chut ou sur-tension	Fourniture ou absorption de l'énergie réactive	Condensateurs séries et shunts	SCV STATCOM
Limites thermiques	Surcharge des lignes	Réduction des charges	Ajouter de nouvelles lignes	TCSC UPFC SVC
Courants de boucles	Répartition de La puissance transférée	Réajustement de la réactance de ligne	Ajouter des condensateurs en série	TCSC UPFC SVC
Niveaux des Courts-circuits	Courant de court-circuit très élevé	Limitation du courant de court-circuit	Ajouter des condensateurs en série	TCSC UPFC
Résonances subsynchrones	Emballement des générateurs	Atténuation des oscillations	Compensation série	TCSC

III.5. STRUCTURE DES PRINCIPAUX DISPOSITIFS FACTS

III.5.1. Compensateurs shunts (parallèles)

Les compensateurs parallèles sont utilisés depuis longtemps dans les réseaux électriques principalement pour contrôler les tensions aux niveaux désirés lorsque les conditions du système changent. Des réactances fixes ou mécaniquement commutés sont appliqués pour réduire au minimum les surtensions du système dans des conditions de faible charge et des condensateurs shunt fixés ou mécaniquement commutés sont appliqués afin de maintenir des niveaux de tension dans des conditions de forte charge. Dans les deux cas, les compensateurs shunts produisent une impédance réactive shunt, variable qui est ajustée en fonction des conditions du réseau de transport. Les commutateurs mécaniques avaient commencé à être remplacés par les commutateurs statiques à base de thyristors vers la fin des années 70 [47].

Actuellement, les compensateurs shunts et notamment le SVC sont largement répandus dans les réseaux électriques.

III.5.1.1. Compensateur statique de puissance réactive (SVC)

La structure de base de ce contrôleur est l'association des dispositifs TCR et TSC en parallèles connectés au réseau à travers un transformateur de couplage figure III.2 :

- TCR (thyristor controlled reactor): c'est une réactance en série avec un gradateur, sa valeur est continuellement variable selon l'angle d'amorçage des thyristors.
- TSC (thyristor switched capacitor): des capacités commandées par thyristors fonctionnant en pleine onde.

Le premier SVC installé sur une ligne de transport d'énergie était en 1979 en Afrique du sud [48].

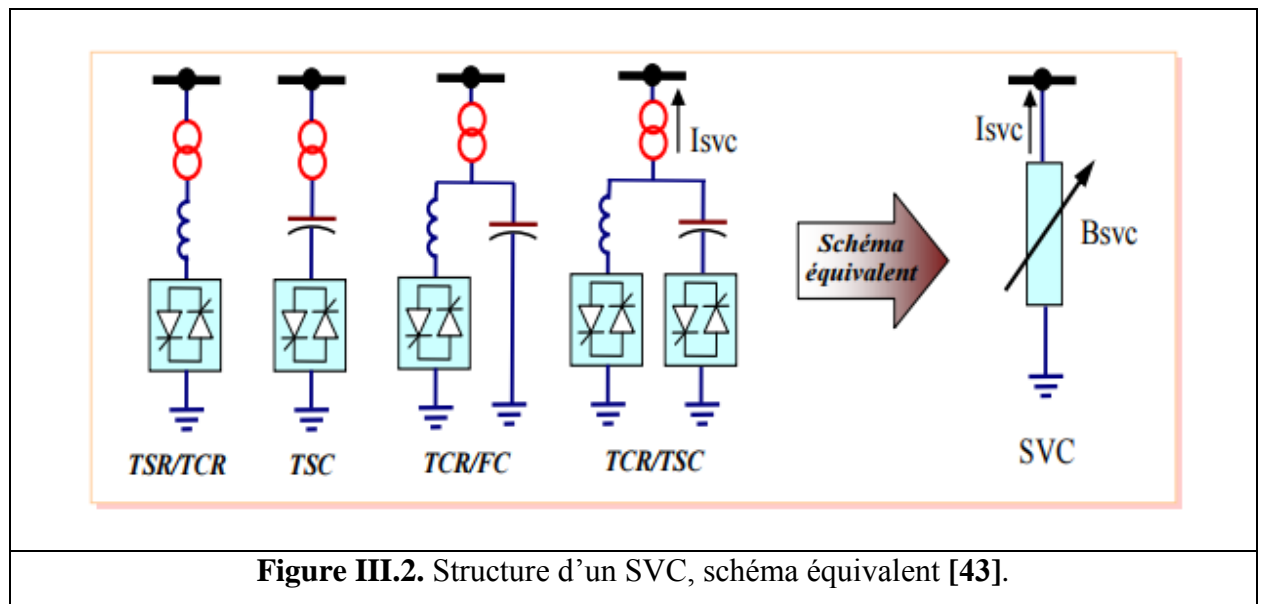


Figure III.2. Structure d'un SVC, schéma équivalent [43].

Un SVC supposé idéal ne contient pas de composant résistif $G_{SVC} = 0$ donc il ne consomme pas d'énergie active du réseau. Sa puissance réactive est fonction de la tension au jeu de barre de connexion et de la susceptance B_{SVC} .

$$P_{SVC} = 0 \quad (III.1)$$

$$Q_{SVC} = -|V_{bus}| \cdot B_{SVC} \quad (III.2)$$

III.5.1.2. Compensateur statique synchrone (STATCOM)

C'est en 1990 que le premier STATCOM a été conçu, c'est un convertisseur de tension à base de GTO ou de IGBT alimenté par des batteries de condensateur, l'ensemble est connecté parallèlement au réseau à travers un transformateur de couplage Figure III.3. Ce dispositif est l'analogie d'un compensateur synchrone; et comme c'est un dispositif électronique il n'a pas d'inertie mécanique présentant alors de meilleures caractéristiques tel que sa dynamique rapide et son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones [48].

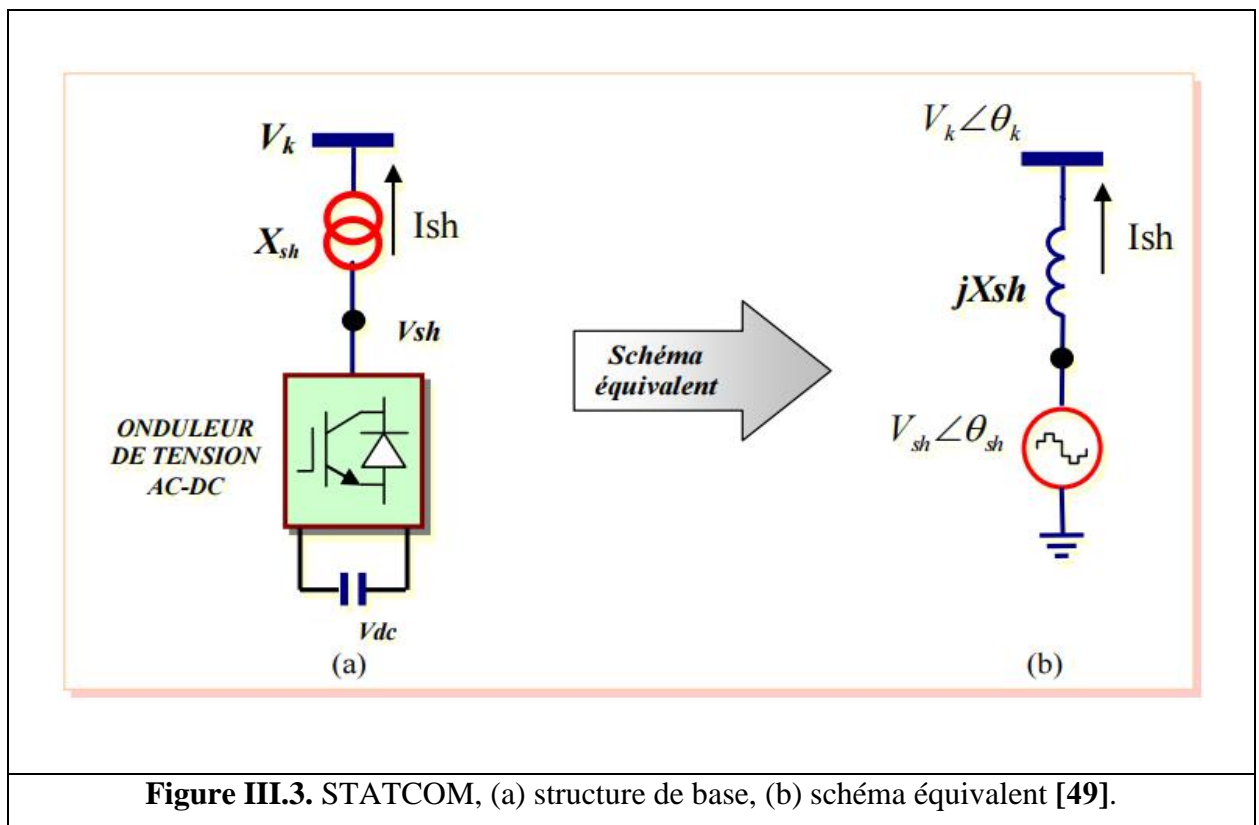


Figure III.3. STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent [49].

Le STATCOM permet le même contrôle qu'un SVC mais avec plus de robustesse, ce dispositif est capable de délivrer la puissance réactive même si la tension du jeu de connexion est très faible, d'après sa caractéristique on constate que le courant maximal du STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

III.5.2. Compensateurs Séries

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive ou capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport pour compenser la chute de tension inductive et modifient ainsi la réactance effective de la ligne. Ces compensateurs sont efficaces pour le contrôle de la puissance et l'amélioration de la stabilité dynamique du réseau électrique [50] [51].

III.5.2.1. Compensateur série commandé par thyristors (TCSC)

IEEE définit le TCSC comme étant un compensateur à réactance capacitif qui consiste en une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive. Le TCSC permet une compensation qui varie entre 20% inductive et 80% capacitive. L'ensemble monté en parallèle avec une capacité comme montre la figure (III.4) et connecté en série avec le réseau pour contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance $X_{TCSC}(\alpha)$ qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors α donné par l'équation (III.3). Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80 [52].

$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{jL\omega}{\frac{2}{\pi}(\pi - \alpha + \frac{\sin(2\alpha)}{2}) - L\omega^2} \quad (III.3)$$

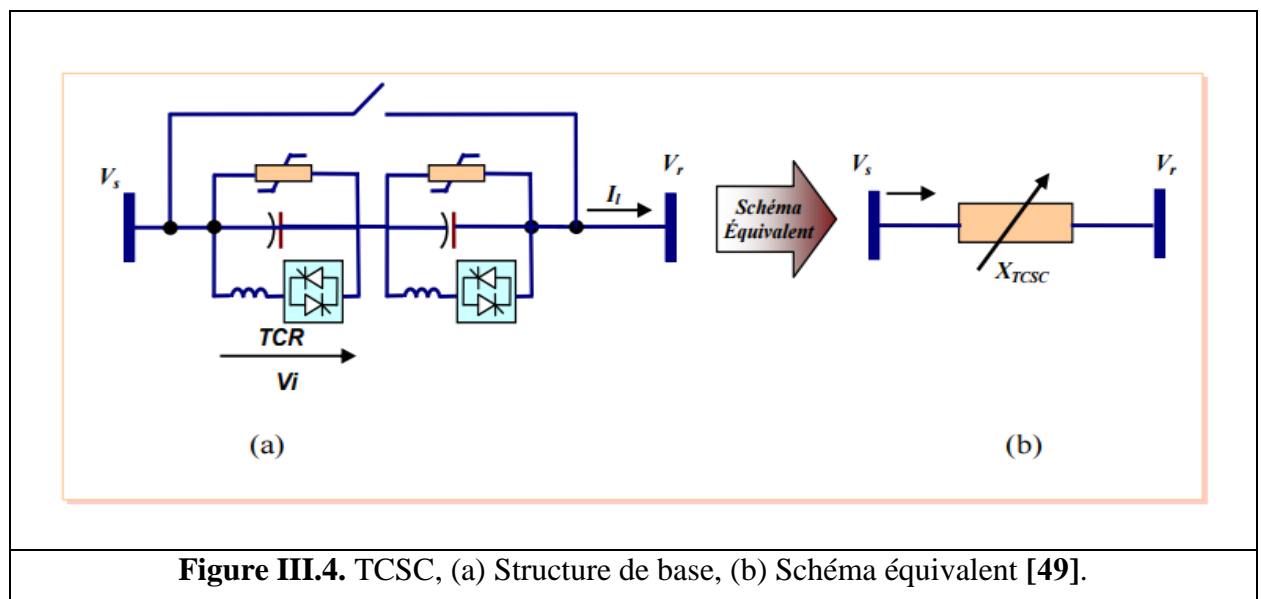


Figure III.4. TCSC, (a) Structure de base, (b) Schéma équivalent [49].

III.5.2.2. Compensateur série statique synchrone (SSSC)

Le dispositif FACTS à base d'onduleur de tension connecté en série au réseaux électrique et appelé Static Synchronous Série Compensator (SSSC) a été proposé par Gyugyi en 1989 [53]. Ce type de compensateur est le plus important dispositifs FACTS, similaire à un STATCOM mais avec une tension de sortie injectée en série dans la ligne, Représenté par la figure III.5. Ce dispositif appelé aussi DVR (Dynamic Voltage Restorer) est utilisé généralement dans les réseaux de distribution afin de résoudre les problèmes de qualité d'énergie tel que les creux de tensions et maintenir ces dernières à des niveaux constants [43].

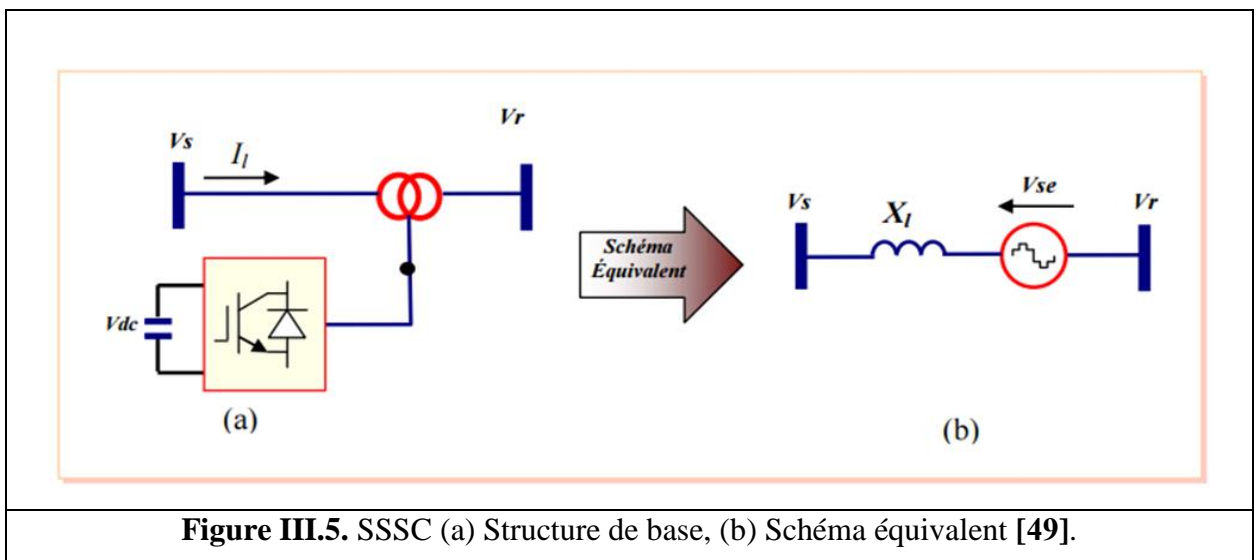


Figure III.5. SSSC (a) Structure de base, (b) Schéma équivalent [49].

III.5.3. Compensateurs hybrides (shunt-série)

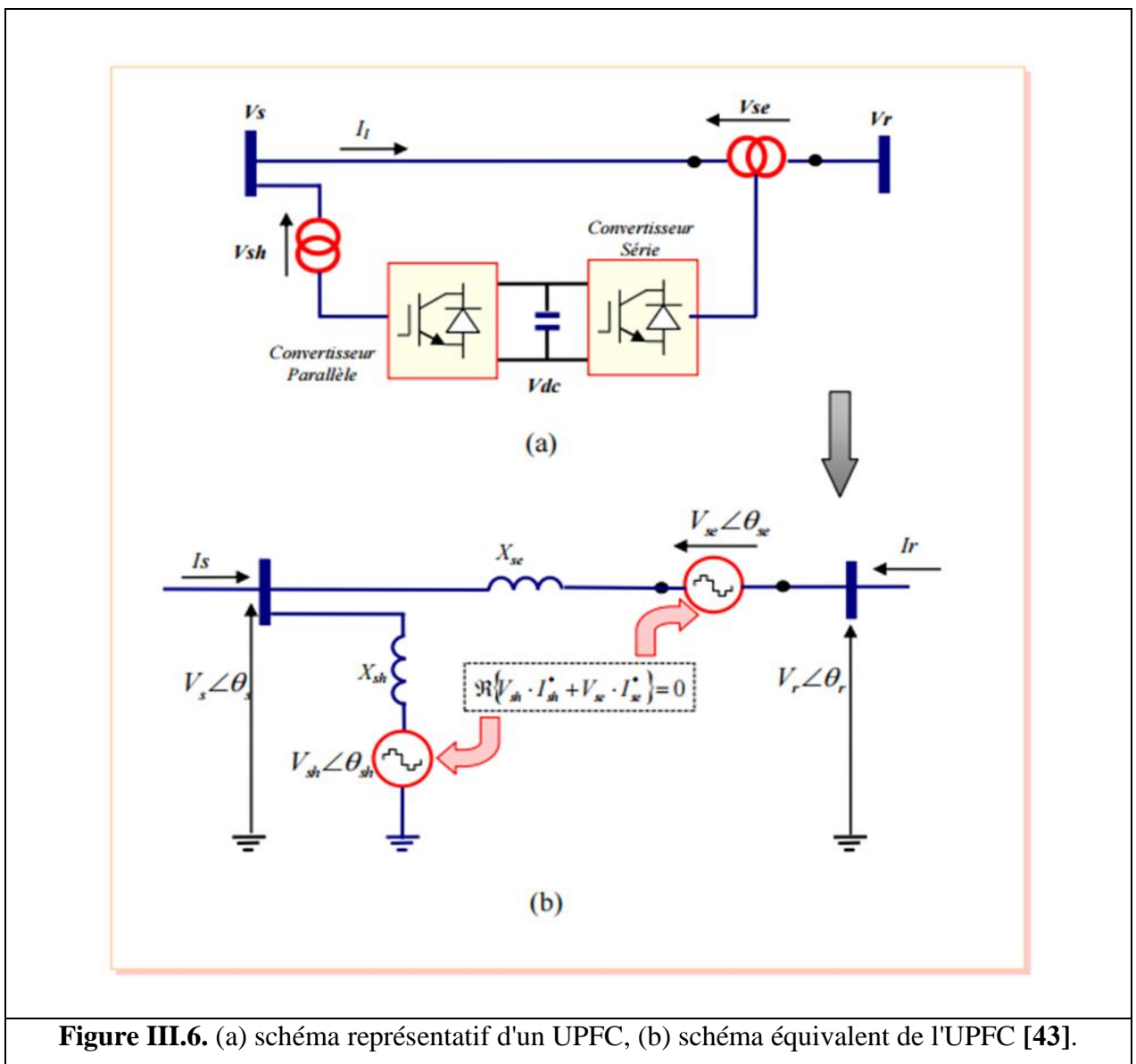
Il s'agit d'une combinaison de dispositifs séries et shunts contrôlés de manière coordonnée afin d'obtenir un contrôle pré-réglé. Il est capable de contrôler les trois paramètres, flux de puissance active et réactive, tension et angle de transport [54].

III.5.3.1. Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC)

L'UPFC est l'équipement FACTS le plus puissant. Il est dit universel car il comporte toutes les stratégies de compensation de puissance. Il a le pouvoir de contrôler la tension, l'angle de transit de puissance et l'impédance de la ligne. Il est constitué de (2) onduleurs triphasés de tension. Un onduleur est connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur shunt et l'autre est connecté en série avec le réseau par l'intermédiaire d'un transformateur série. Les

deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu représenté par un condensateur, la figure III.6 donne son schéma de principe et son schéma équivalent. De plus, il a la flexibilité de basculer de l'une à l'autre de ces fonctions instantanément, en changeant la commande des onduleurs, ce qui permet l'activation de la fonction nécessaire pour pouvoir faire face à des défauts ou à des modifications du réseau [55].

L'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de la puissance électrique, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance [51].



III.5.3.2. Static Phase Shifter (SPS)

Le déphaseur statique est un transformateur déphaseur à base de thyristors, ce dispositif a été conçu pour remplacer les anciens transformateurs déphaseurs commandés mécaniquement. Il est constitué de deux transformateurs l'un branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle [56] [48], Figure III.7. donne un schéma de principe de ce dispositif et son schéma équivalent

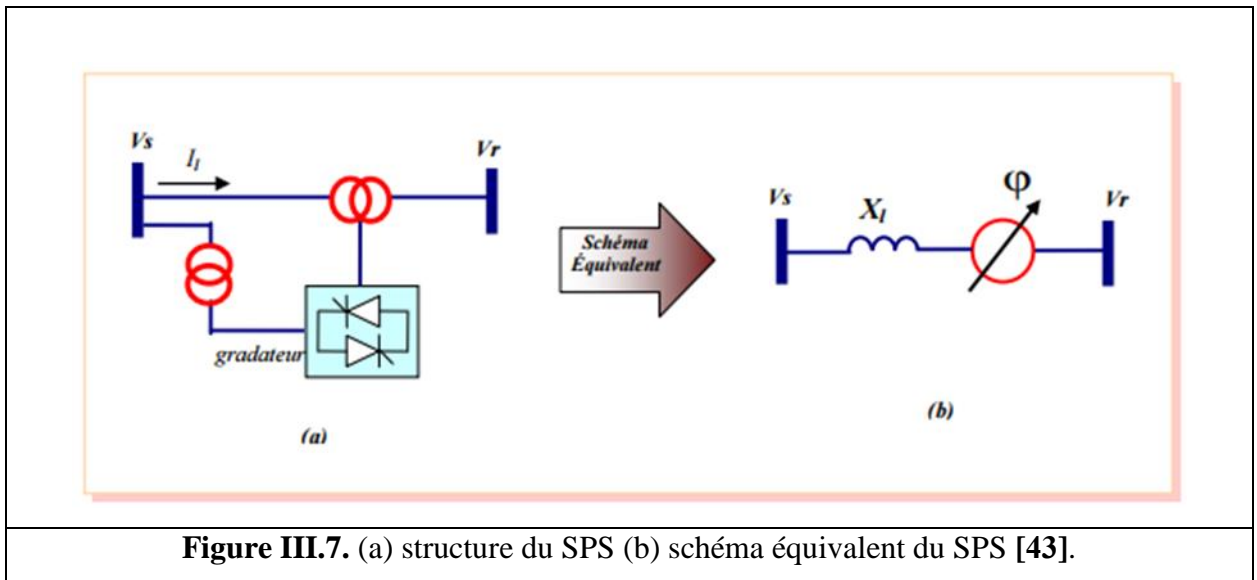


Figure III.7. (a) structure du SPS (b) schéma équivalent du SPS [43].

III.6. APPORTS ET AVANTAGES DES DISPOSITIFS FACTS

L'intérêt majeur de la technologie FACTS pour les opérateurs de l'énergie électrique est d'ouvrir plus d'opportunités pour le contrôle de la puissance et d'augmenter les capacités utilisables des présentes lignes sous les conditions normales. Ces possibilités résultent par l'habileté des contrôleurs FACTS de contrôler les paramètres intervenant qui gouverne la fonction de transmission de l'énergie dans une ligne telles que les impédances séries, impédances shunts, courant, tension angle de phase.

Par cette action, les contrôleurs FACTS permettent dans un système énergétique d'obtenir [57]

- Contrôle du flux de puissance qui est la principale fonction des dispositifs FACTS, ce contrôle doit être réalisé selon un cahier des charges prédéfini pour satisfaire les besoins des consommateurs,

- Améliorer la stabilité dynamique et transitoire du système et atténuer les oscillations de puissances,
- Contrôler des tensions aux jeux de barres,
- Augmenter les capacités de charge des lignes vers leurs limites thermiques,
- Contrôler la puissance réactive donc augmenter la puissance active transportée et minimiser les pertes.

III.7. COUT DES DISPOSITIFS FACTS

Mis à part les avantages techniques apportés par les FACTS, d'autres critères liés au coût doivent être pris en considération dans la décision d'installer un dispositif. Sur le plan économique, le critère généralement adopté dans l'évaluation des bénéfices obtenus par un FACTS est que l'accroissement des revenus doit excéder les coûts d'exploitations, de maintenance et d'amortissement de l'installation.

Le coût d'une installation FACTS dépend principalement des facteurs tels que les performances requises, la puissance de l'installation, le niveau de tension du système ou encore la technologie du semi-conducteur utilisé [58].

III.8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu des différents moyens de compensation (dispositifs FACTS). Nous avons aussi présenté quelques caractéristiques pour chaque compensateur étudié avec des schémas présentatifs.

Dans le chapitre suivant, nous choisissons d'étudier STATCOM plus en détail.

CHAPITRE IV :
MODELISATION ET COMMANDE D'UN
STATCOM

IV.1. INTRODUCTION

Un STATCOM, plus récent et plus élaboré, est une source de tension variable contrôlée en amplitude et en phase. Ce dispositif est très différent du point de vue construction, commande et fonctionnement [65].

Le STATCOM est composé d'un convertisseur de tension à base de semi-conducteur de haute technologie (IGBT, IGCT) associé à un condensateur comme source de tension continue et l'ensemble connecté en parallèle au réseau par le biais d'un transformateur de couplage comme le montre la figure (IV.1) [69].

Dans ce chapitre nous allons voir la modélisation et la commande du STATCOM, les différents modèles mathématiques de chaque circuit ainsi que certaines lois de commandes des régulateurs sont développés séparément.

En particulier, nous étudions également des méthodes d'identification et de réduction des harmoniques de courant dans les réseaux électriques en appliquant STATCOM, qui a le même principe qu'un filtre actif pour réduire les harmoniques.

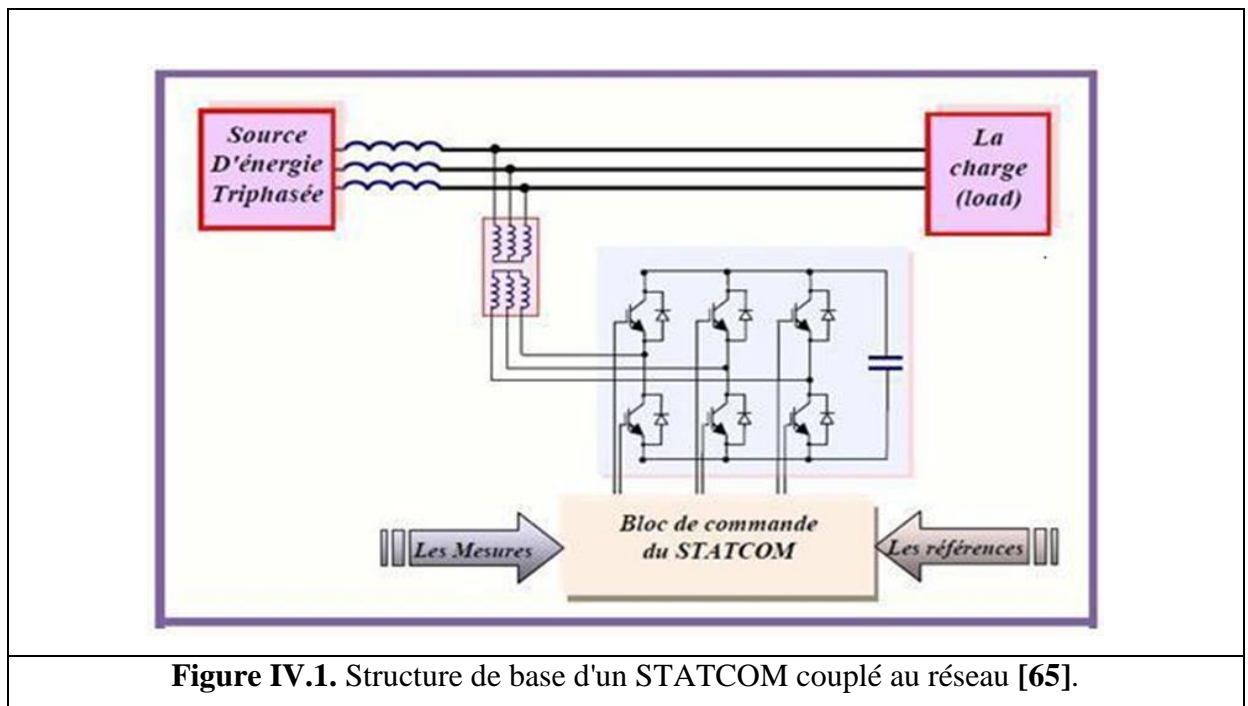
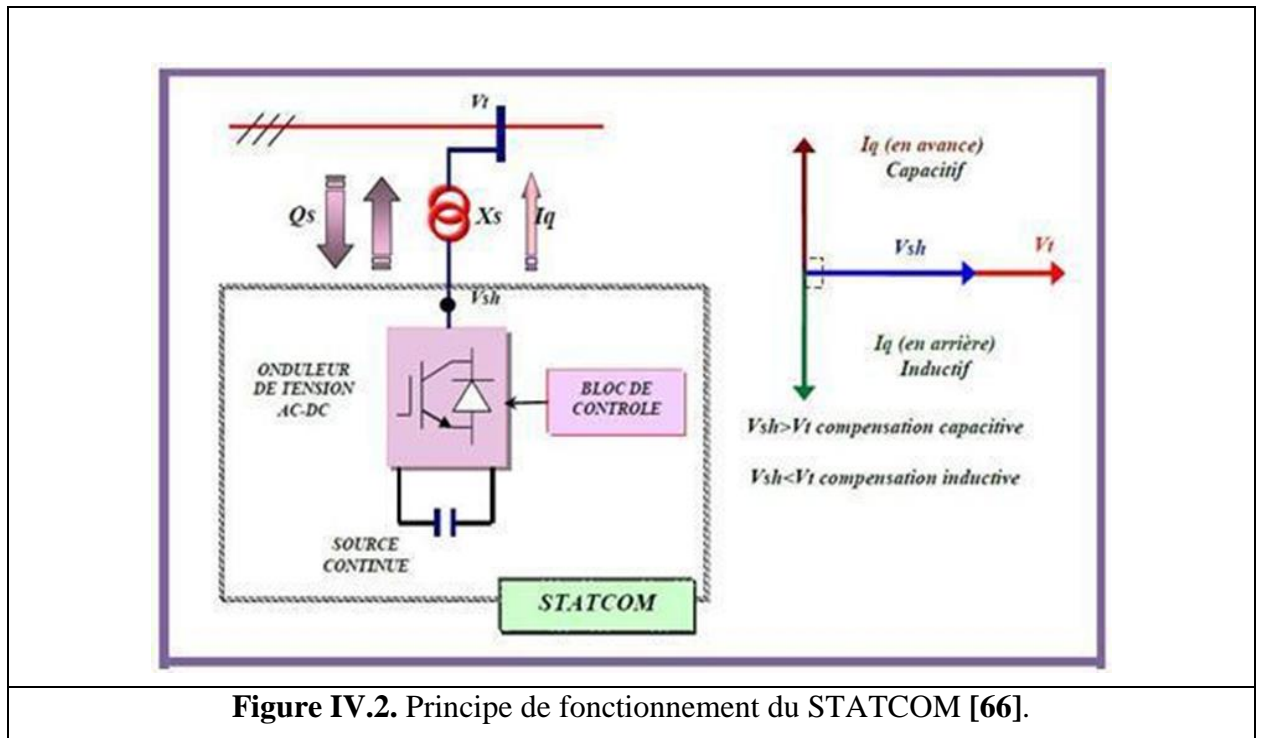


Figure IV.1. Structure de base d'un STATCOM couplé au réseau [65].

IV.2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN STATCOM

Les compensateurs shunts sont bien reconnus dans la compensation de l'énergie réactive et par conséquent la régulation de la tension au jeu de barre où ils sont connectés. Le STATCOM est un générateur synchrone statique qui génère une tension alternative triphasée synchrone avec la tension du réseau à partir d'une source de tension continue. L'amplitude de la tension du STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau ainsi que les courants.

La tension V_{sh} du STATCOM est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne et dans ce cas, il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais uniquement de la puissance réactive à injecter (ou absorber) par STATCOM comme le résume la figure IV.2 [59].



Le schéma équivalent de ce dispositif est donné par la figure (IV.3).

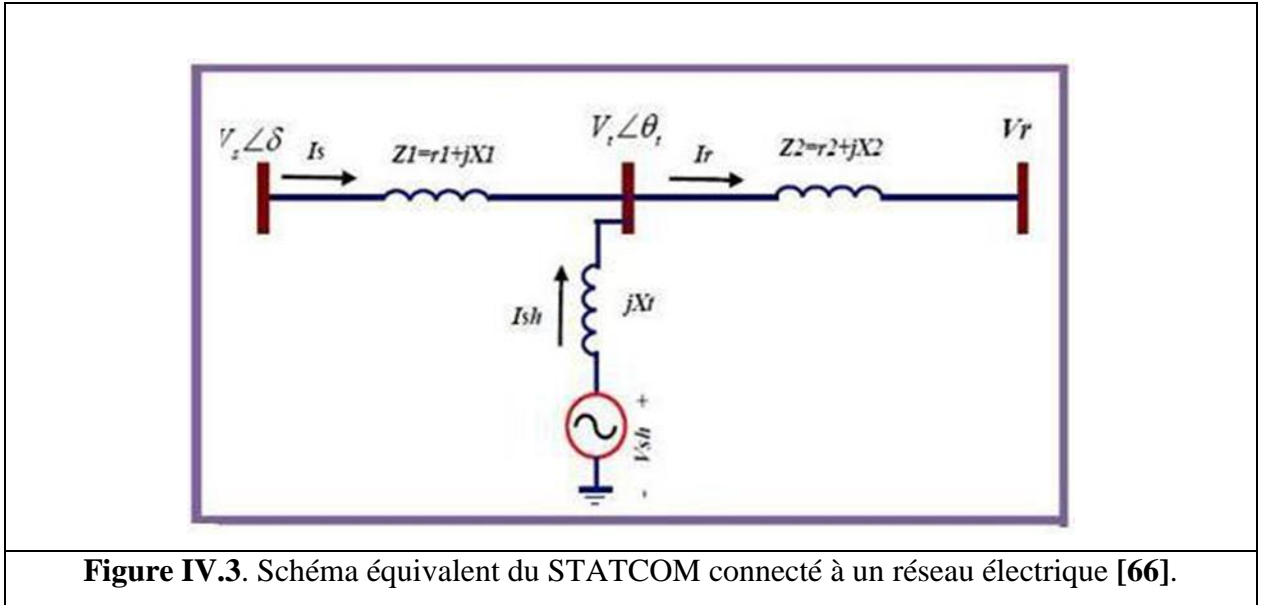


Figure IV.3. Schéma équivalent du STATCOM connecté à un réseau électrique [66].

- Mise en équations du système :

Le courant injecté par le STATCOM est donné par:

$$I_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \quad (IV.1)$$

La puissance injectée au jeu de barre "t" est donnée par l'équation suivante :

$$\bar{S} = \bar{V}_t \cdot \bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_t(\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t)}{-jX_t} = \frac{\bar{V}_t \cdot \bar{V}_{sh} - \bar{V}_t^2}{-jX_t} \quad (IV.2)$$

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le STATCOM au jeu de barre "t" exprimées par les formules qui suivent:

$$P_{sh} = -V_t \cdot V_{sh} \cdot \frac{\sin(\theta_t - \theta_{sh})}{X_t} \quad (IV.3)$$

$$Q_{sh} = V_t \frac{(V_{sh} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t)}{X_t} \quad (IV.4)$$

Avec l'hypothèse d'un STATCOM idéal (convertisseur sans pertes), la contrainte de fonctionnement que doit satisfaire le STATCOM est de ne pas échanger la puissance active avec le réseau :

$$P_{sh} = -V_t \cdot V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t \quad (IV.5)$$

D'où la condition:

$$\theta_t - \theta_{sh} = 0 \Rightarrow \theta_t = \theta_{sh} \quad (IV.6)$$

D'après cette condition la tension injectée par le STATCOM V_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement [59] [60].

Dans la pratique, il y a toujours, une petite quantité de la puissance active absorbée à partir du réseau pour couvrir les pertes des interrupteurs du convertisseur du STATCOM et les pertes au niveau du transformateur de couplage et pour maintenir la tension DC aux bornes du condensateur constante.

Avec les tensions V_{sh} et V_t sont en phase, le courant I_{sh} du STATCOM en quadrature avec la tension V_t , est donc un courant réactif son amplitude et sa puissance réactive correspondante échangée avec le réseau sont données par les équations (IV.7) (IV.8).

En admettant que la tension V_{sh} est sur l'axe d (comme référence des phases) :

$$V_{shd} = V_{sh} ; V_{shq} = 0$$

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t} \quad (IV.7)$$

$$Q_{sh} = V_{sh} \cdot I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(\frac{1 - V_t}{V_{sh}} \right) \quad (IV.8)$$

A partir de l'équation (IV.3), il paraît clair que si le module de la tension du STATCOM V_{sh} égale le module de la tension V_t du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.

Si $V_{sh} > V_t$ et $Q_{sh} > 0$, le STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau. (Figure IV.4)

Si $V_{sh} < V_t$ et $Q_{sh} < 0$, le STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductif. (Figure IV.5)

On constate que l'influence de l'augmentation de la tension V_{sh} est considérable sur la puissance réactive Q_s que sur la puissance P_s . Ainsi l'injection de la puissance réactive par le STATCOM fait diminuer la puissance réactive fournie par le générateur du réseau.

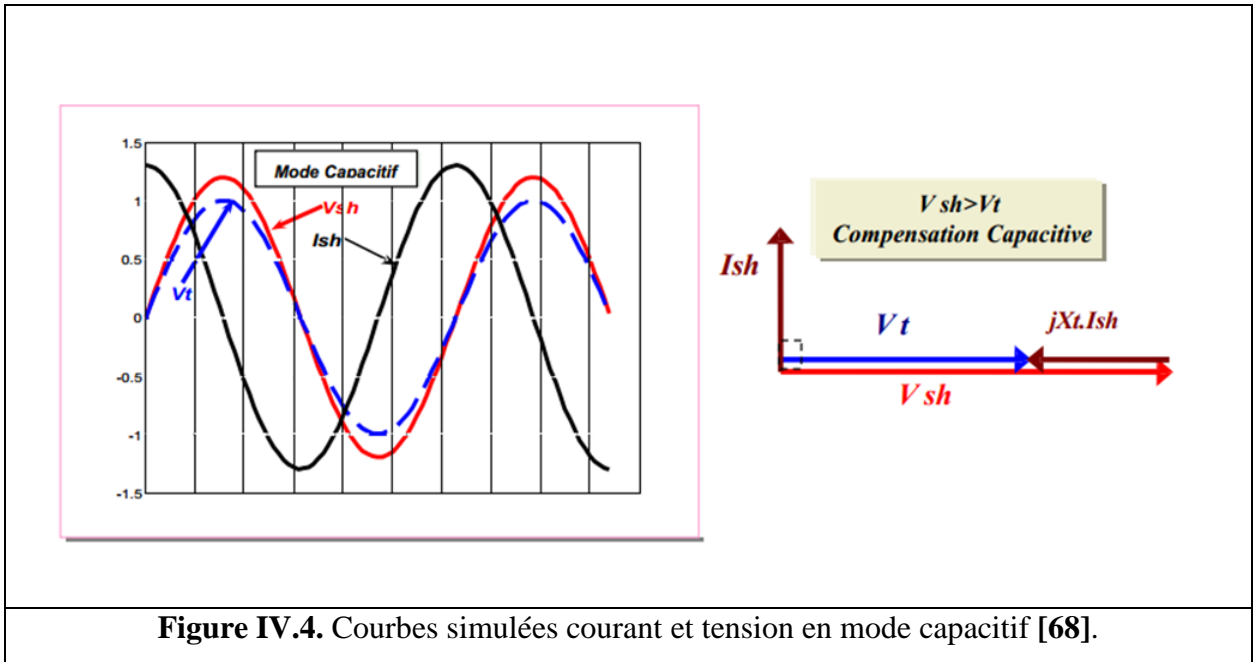


Figure IV.4. Courbes simulées courant et tension en mode capacitif [68].

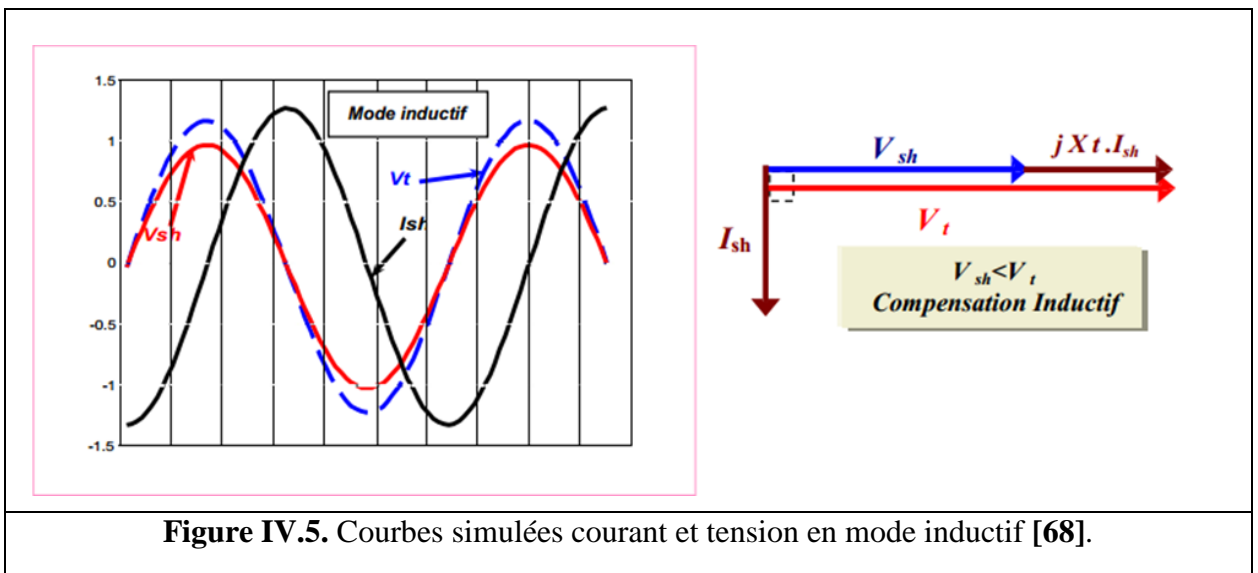


Figure IV.5. Courbes simulées courant et tension en mode inductif [68].

IV.3. MODÉLISATION D'UN STATCOM

IV.3.1. Modèle Mathématiques Simplifié

Pour le modèle simplifié du STATCOM on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma équivalent du STATCOM est comme reproduit sur la figure IV.6.

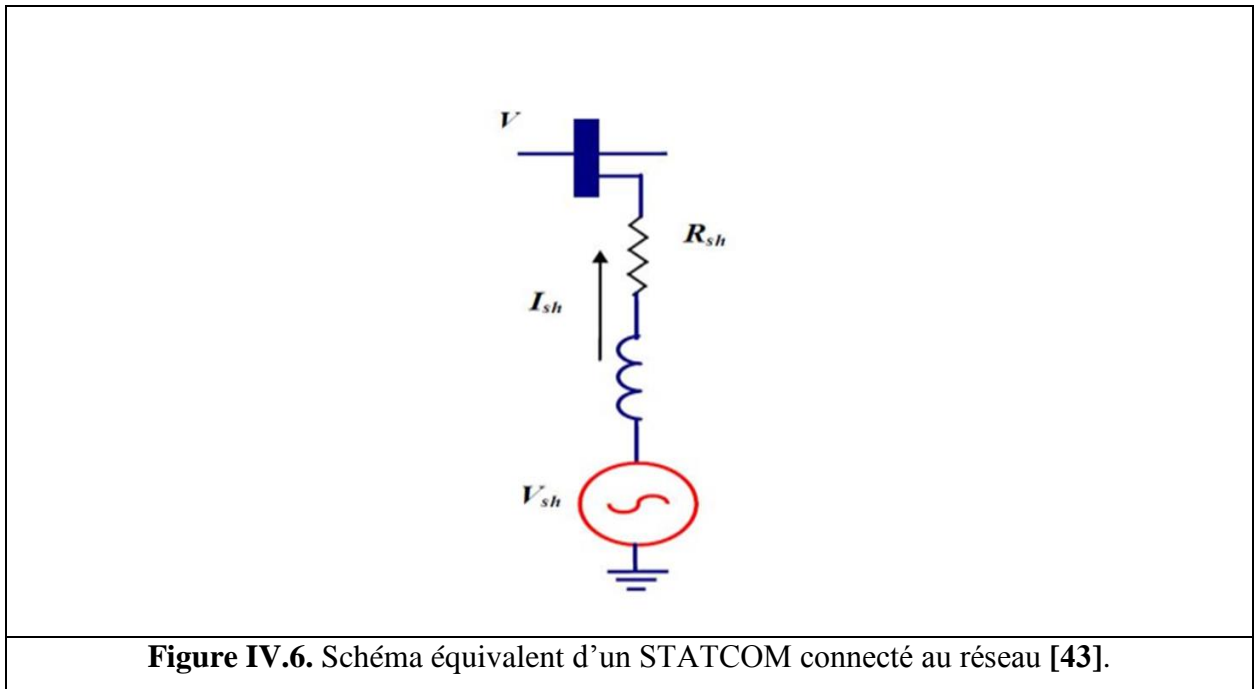
Donc le schéma équivalent de ce dispositif est une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance L_{sh} du transformateur de couplage, le circuit contient aussi une résistance en série pour représenter les pertes ohmiques du transformateur et les pertes dans les interrupteurs de l'onduleur [61] [62].

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système V (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM. On appliquant la loi d'ohm on a :

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \cdot \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (IV.9)$$

Où les grandeurs en triphasé sont :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \text{ et } \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{bmatrix} \quad (IV.10)$$



Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe (α, β) on multipliant l'équation (IV.9) par la matrice de la transformation de CLARK suivante:

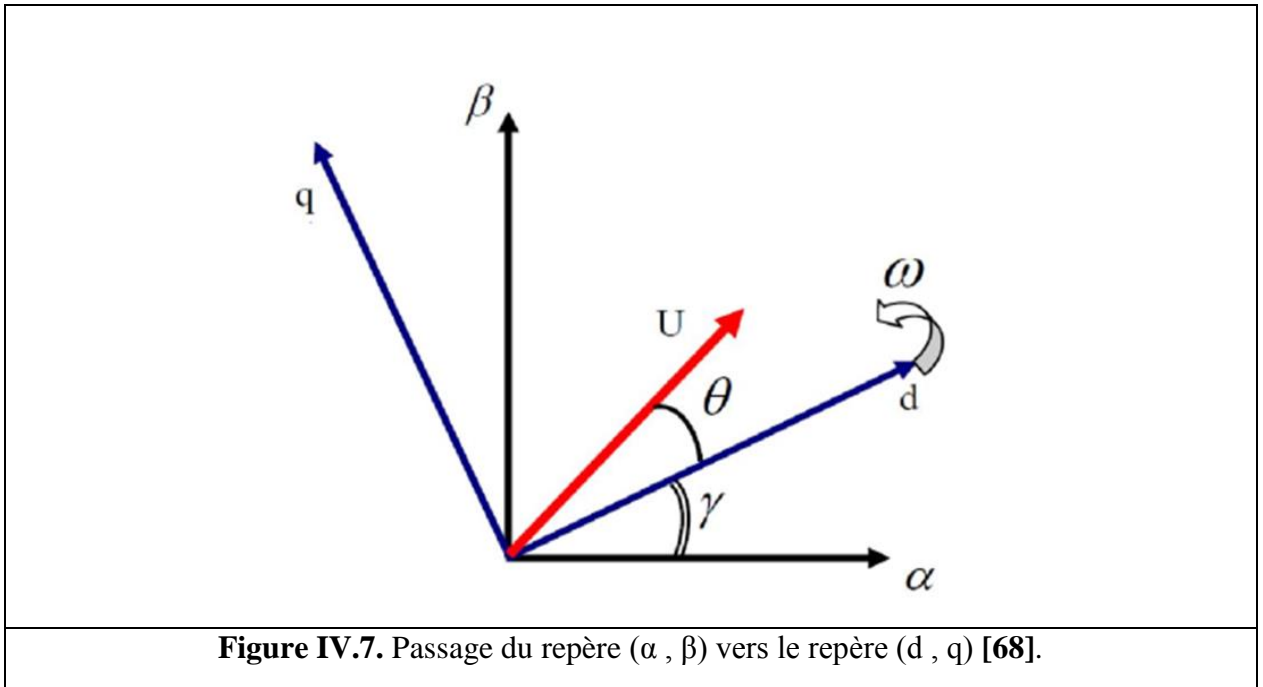
$$T_{\alpha,\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

On passe au repère tournant (d, q), le référentiel du synchronisme, en multipliant tout les grandeurs par le phaseur $e^{-j\gamma}$ avec $\frac{d\gamma}{dt} = \omega$, la pulsation des grandeurs en question voir la figure (IV.7). Donc :

$$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\gamma} \quad (\text{IV.12})$$

Et inversement

$$\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} \quad (\text{IV.13})$$



En appliquant cette écriture sur l'équation (IV.9) on aura:

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} = R_{sh} \bar{I}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} + L_{sh} \frac{d}{dt} (\bar{I}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma}) \quad (\text{IV.14})$$

Après simplification de calcul on trouve des équations dynamiques du STATCOM dans le repère (d, q) suivante:

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (IV.15)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (IV.16)$$

On écrit le système d'état du STATCOM Sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ \omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (IV.17)$$

Où le vecteur $\begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix}$ représente le vecteur de commande du système.

IV.3.2 Modèle Mathématiques en considérant le circuit DC

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse d'aucune variation de la tension continue U_{dc} durant les petites échanges de l'énergie active entre le réseau et la source DC.

Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite, le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu [61][63].

Le circuit continu est représenté par une source de courant connecté au condensateur C et une résistance shunt pour exprimer les pertes joules dans le circuit continue donner par la figure (IV.8) [62] [64].

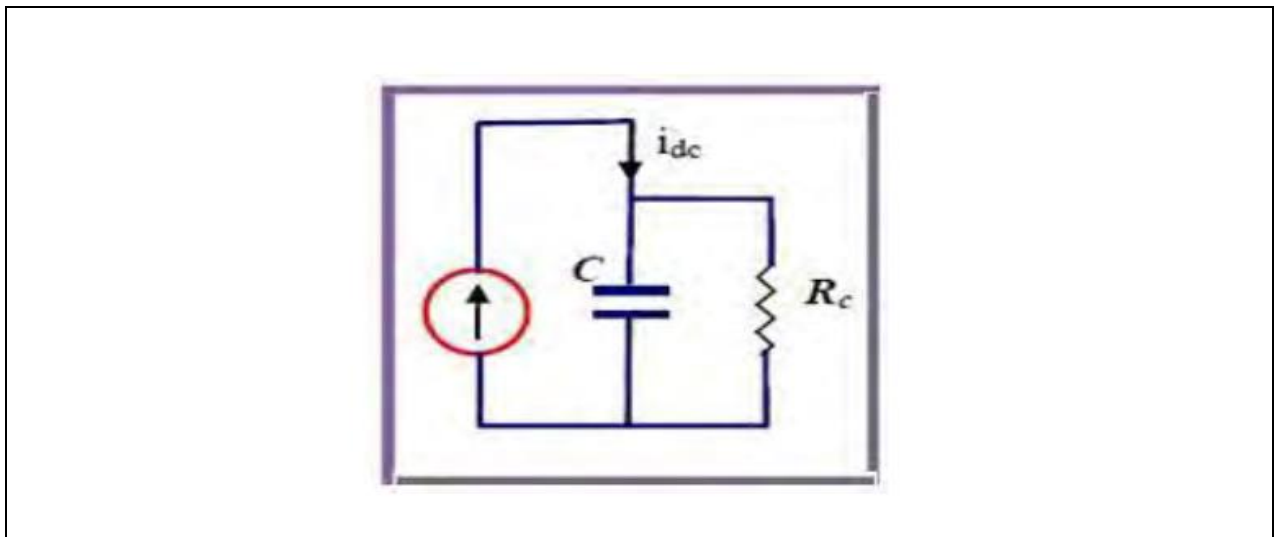


Figure IV.8. Schéma équivalent du Circuit DC du STATCOM [74].

On suppose que :

$$V_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + j V_{shq} = v \cos \theta + j v \sin \theta \quad (IV.18)$$

V: étant le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue U_{dc} et peut être exprimé par:

$$v = m \times U_{dc} \quad (IV.19)$$

m : l'indice de modulation, il ne dépend que du type de l'onduleur.

En substituant les équations (IV.18) et (IV.19) dans les équations (IV.15) et (IV.16) on trouve les équations suivant :

$$V_d - m U_{dc} \cos \theta = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (IV.20)$$

$$V_q - m U_{dc} \sin \theta = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (IV.21)$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (IV.22) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (IV.23):

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (IV.22)$$

$$U_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (IV.23)$$

Le courant I_{dc} est défini comme étant la somme du courant capacitif " i_c " et le courant résistif " i_{rc} " dans la branche de la résistance R_{dc} .

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (IV.24)$$

Dans ces équations (IV.18), (IV.19), (III.23) et (III.24) on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du STATCOM suivante:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{shd} \cos \theta - I_{shq} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (IV.25)$$

Les équations (IV.20) (IV.21) (IV.25) forme le système d'équation d'état du STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{1}{R_{dc} c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (IV.26)$$

Il y a deux paramètres de commande dans ce système avec trois paramètres d'état à contrôler et uniquement deux grandeurs peuvent être commandées indépendamment.

Ce système nous devons le rendre linéaire autour d'un point de fonctionnement sera de la forme suivante [61] [62] :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{3m}{2c} \sin \theta_0 & -\frac{1}{R_{dc} c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ 0 & 0 & -\frac{3m}{2c} (I_{shd} \sin \theta_0 + I_{shq} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (IV.27)$$

Le courant réactif est commandé indépendamment pour contrôler le flux de puissance réactive et les autres paramètres sont utilisés pour maintenir la tension continue U_{dc} constante [61] [67].

IV.4. COMMANDE D'UN STATCOM

Le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion, et par conséquence maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant I_{sh}^r , qui est l'image de la puissance à compensée. Ces courants (I_{shd}^r, I_{shq}^r) sont donc les grandeurs de références du STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées [43].

IV.4.1. Détermination des Références

Les puissances injectées par le STATCOM sont la puissance réactive Q_{shd}^r calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active $P_{sh}^r \approx 0$ représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur [62] [71].

Ces puissances qui sont les images des courants (I_{shd}^r, I_{shq}^r) active et réactive qu'on détermine depuis le système d'équation suivant écrit dans le référentiel tournant au synchronisme (d, q) :

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^r \\ I_{shq}^r \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{shd}^r \\ Q_{shq}^r \end{bmatrix} \quad (\text{IV.28})$$

Les tensions V_d et V_q sont les tensions du jeu de barre.

Nous pouvons résumer la méthode d'identification des courants de référence par l'algorithme de la figure IV.9

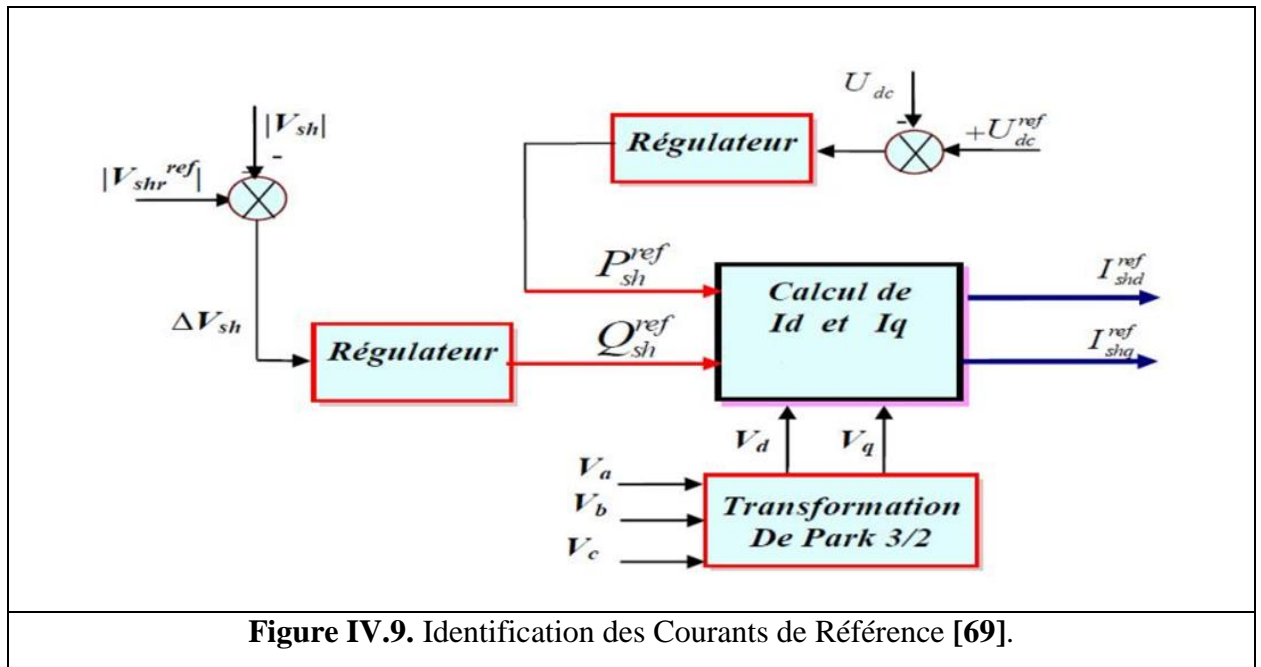


Figure IV.9. Identification des Courants de Référence [69].

IV.4.2. Méthode Watt-Var découplée [62] [70] [71]

Nous avons le système d'équation (IV.17) précédent :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (IV.29)$$

Sur le vecteur de commande on effectue le changement de variable suivant :

$$\frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (IV.30)$$

Avec $X_1 = \frac{1}{L_{sh}} (V_d - V_{shd})$ et $X_2 = \frac{1}{L_{sh}} (V_q - V_{shq})$ sont les nouvelles grandeurs de commande.

A partir de la première équation du système (IV.17) on obtient :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega \cdot I_{shq} + X_1 \quad (IV.31)$$

On appliquant la transformation de Laplace sur cette équation on trouve :

$$\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \right) I_{shd} = \omega \cdot I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1 \quad (IV.32)$$

D'où on arrive au transfert I_{shd} en fonction de \tilde{X}_1 suivant :

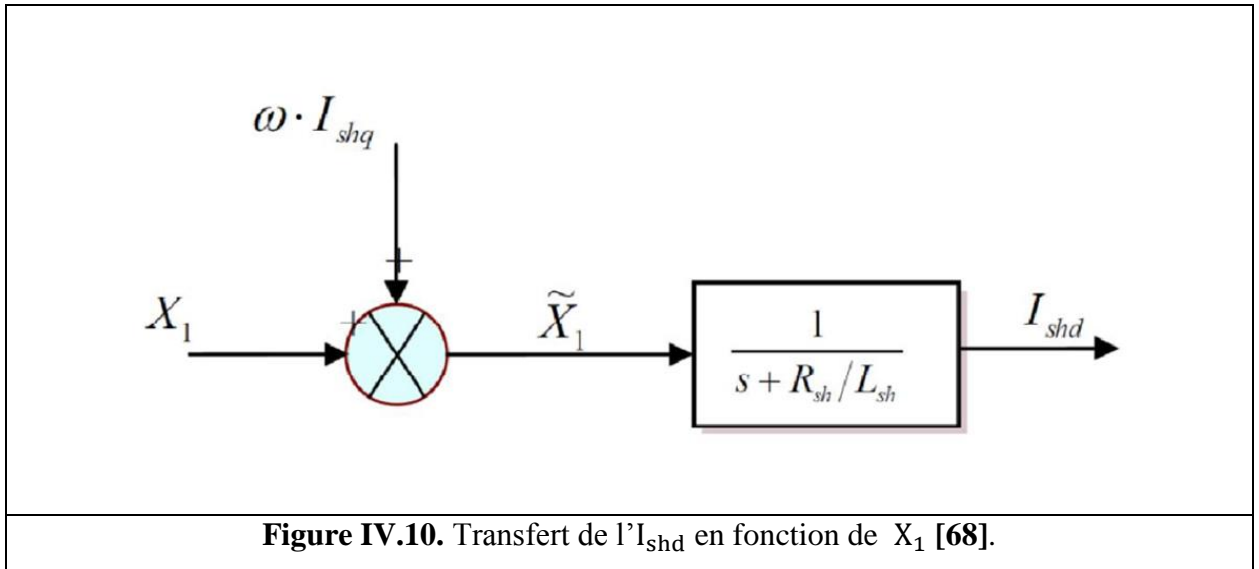
$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (IV.33)$$

Notre commande en réalité est en X_1 et comme $\tilde{X}_1 = \omega \cdot I_{shq} + X_1$, on va ajouter donc le terme $\omega \cdot I_{shq}$ pour retrouver \tilde{X}_1 à l'entrée de ce transfert comme l'indique le schéma de la figure(IV.10) suivante :

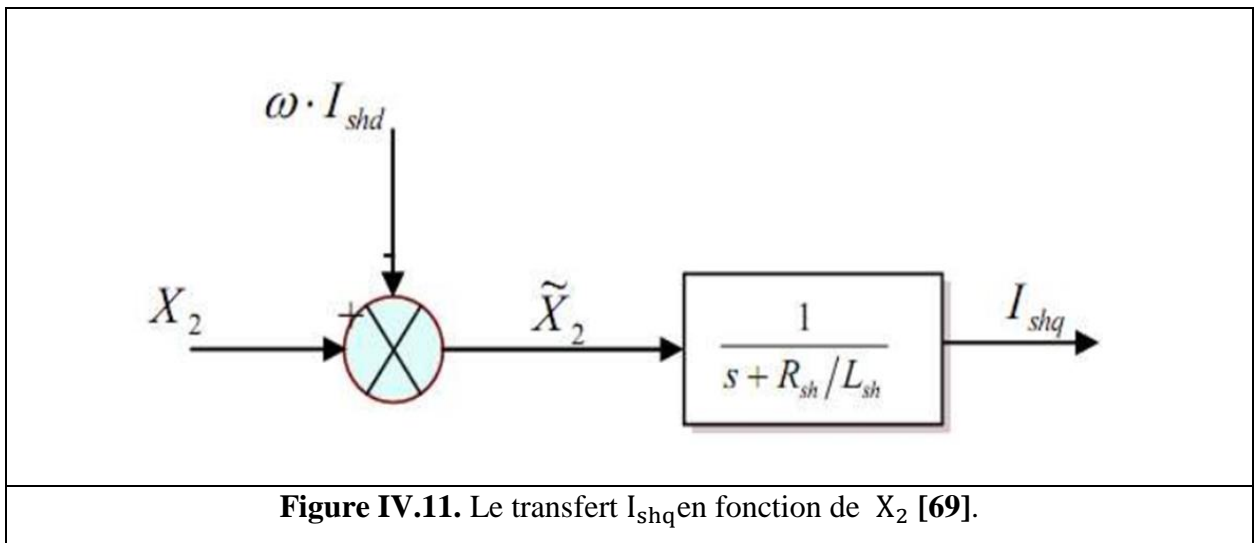
De la même manière en prenant la deuxième équation du modèle précédant on trouve le transfert I_{shq} en fonction de \tilde{X}_2 qui suit :

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (IV.34)$$

Avec : $\tilde{X}_2 = -\omega \cdot I_{shd} + X_2$

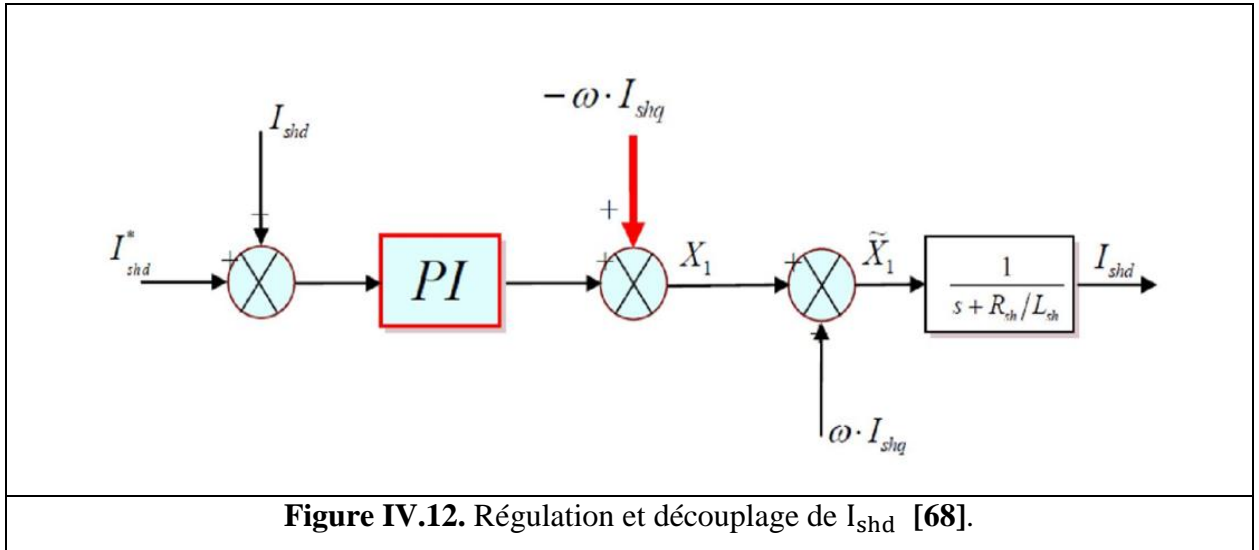


Le schéma suivant résume ce transfert :

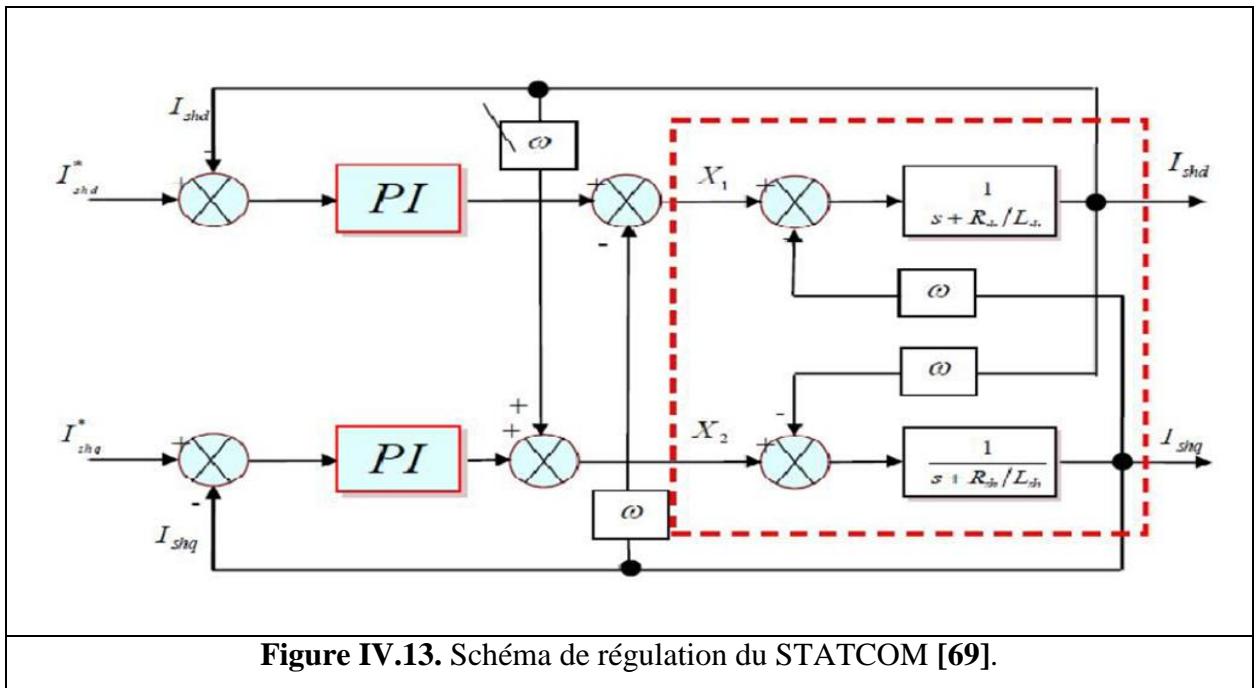


Comme nous avons remarqué qu'il y a un couplage naturelle dans les transferts des courants I_{shd} et I_{shq} . Pour éliminer ce couplage on utilise la méthode de compensation et avec des

régulateur PI on peut contrôler les courants de sortie du STATCOM et les faire suivre leurs consignes I_{shd}^r et I_{shq}^r comme le représente le schéma bloc de la figure IV.12.



Ce le même pour le courant réactif on doit ajouter la composante $\omega \cdot I_{shd}$ et finalement arriver au schéma de régulation par la méthode Watt-Var découplée de la figure IV.13



IV.4.3. Régulation PI avec compensation de pôles [75]

L'objectif de la régulation est de contrôler le courant à la sortie du STATCOM. En général pour la méthode « Watt-Var découplé » Nous choisissons le régulateur PI avec compensation de pôle parce qu'il assure une bonne régulation. Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure IV.14 :

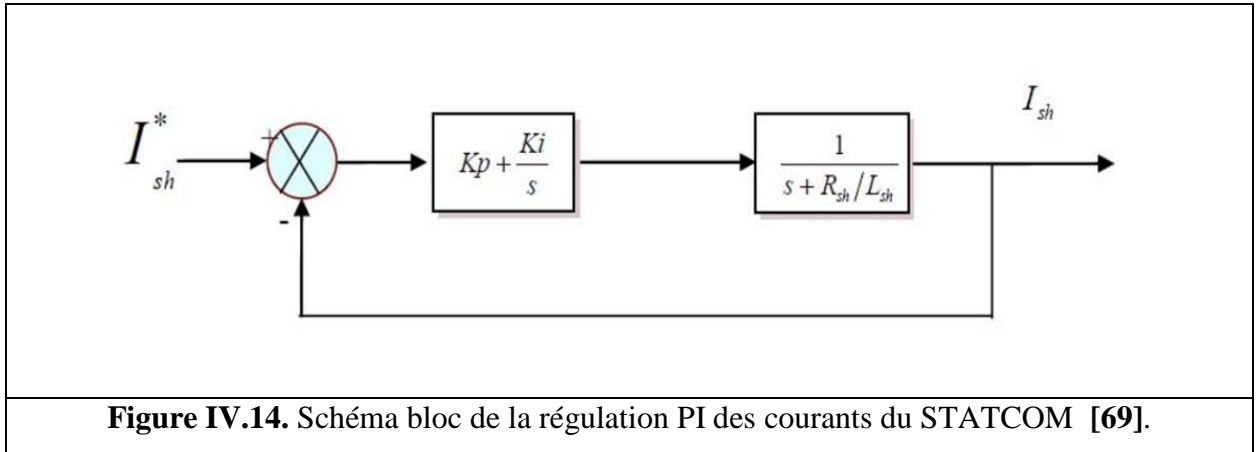


Figure IV.14. Schéma bloc de la régulation PI des courants du STATCOM [69].

La fonction de transfert de cette régulation en boucle ouverte FTBO est :

$$FTBO = G(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) = K_p \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) \quad (IV.35)$$

Et par compensation du pôle en doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad (IV.36)$$

Et $G(s)$ devient : $G(s) = K_p \left(\frac{1}{s} \right)$

T_{BO} : Constante de temps en boucle ouverte.

La fonction de transfert de la régulation précédente après compensation du pôle sera de la forme qui suit:

$$F(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_p}{s+K_p} = \frac{1}{T_{BF}(s)+1} \quad (IV.37)$$

$$T_{BF} = \frac{1}{K_p}$$

Avec T_{BF} est la constante de temps de la régulation en boucle fermée.

En faisant un choix convenable du temps de réponse en boucle fermée (de l'ordre 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (IV.36) et (IV.37)

Les gains du contrôleur PI .

$$K_p = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \text{ et } K_i = K_p \times \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (\text{IV.38})$$

IV.4.4. Régulation de la tension continue U_{dc}

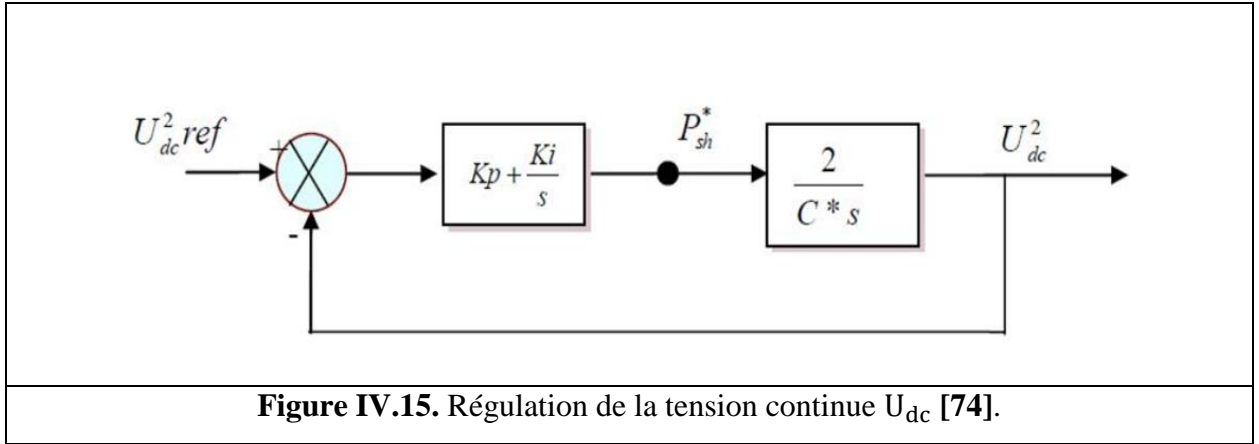
La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par l'adjonction d'un courant actif au courant de référence du STATCOM qui traduira l'absorption de la fourniture d'une puissance active sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation (IV.39) [43] [72] [73].

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2.P_{sh}}{C} \quad (\text{IV.39})$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C.s} \quad (\text{IV.40})$$

Pour obtenir le signal P_{sh} nous choisissons le régulateur proportionnel intégral (PI) puisqu'il est souvent préféré [72].



La fonction de transfert en boucle fermée de ce système suivant :

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc}^2 \text{ ref}} = \frac{\frac{2.K_p}{C}s + \frac{2.K_i}{C}}{s^2 + \frac{2.K_p}{C}s + \frac{2.K_i}{C}} \quad (\text{IV.41})$$

Avec :

$$\omega_n^2 = \frac{2.K_i}{C}, \xi = K_p \cdot \sqrt{\frac{1}{2.C.K_i}} \quad (\text{IV.42})$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi $\xi = 0.7$. Et à fin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir $\omega_n = \frac{2.\pi.300}{10} \text{ red/sec}$ et finalement on détermine à partir des équations (IV.42) les valeurs des gains K_p et K_i .

IV.5. COMMANDE D'UN L'ONDULEUR

Pour la commande appliquée sur l'onduleur de tension dans le STATCOM avec un technique a pour but de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs afin que la tension donnée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence.

Il y a deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

- Commande par hystérésis;
- Commande par MLI.

IV.5.1. Commande par hystérésis

Le principe de contrôle des courants par hystérésis consiste à maintenir chacun des courants générés dans une bande enveloppant les courants de références. Chaque violation de cette bande donne un ordre de commutation.

La différence entre le courant de référence est celui mesuré est appliquée à l'entrée d'un comparateur à hystérésis dont la sortie fournit directement l'ordre de commande des interrupteurs du bras correspondant de l'onduleur [59][75].

Cette technique est schématisée sur la figure IV.16 suivante.

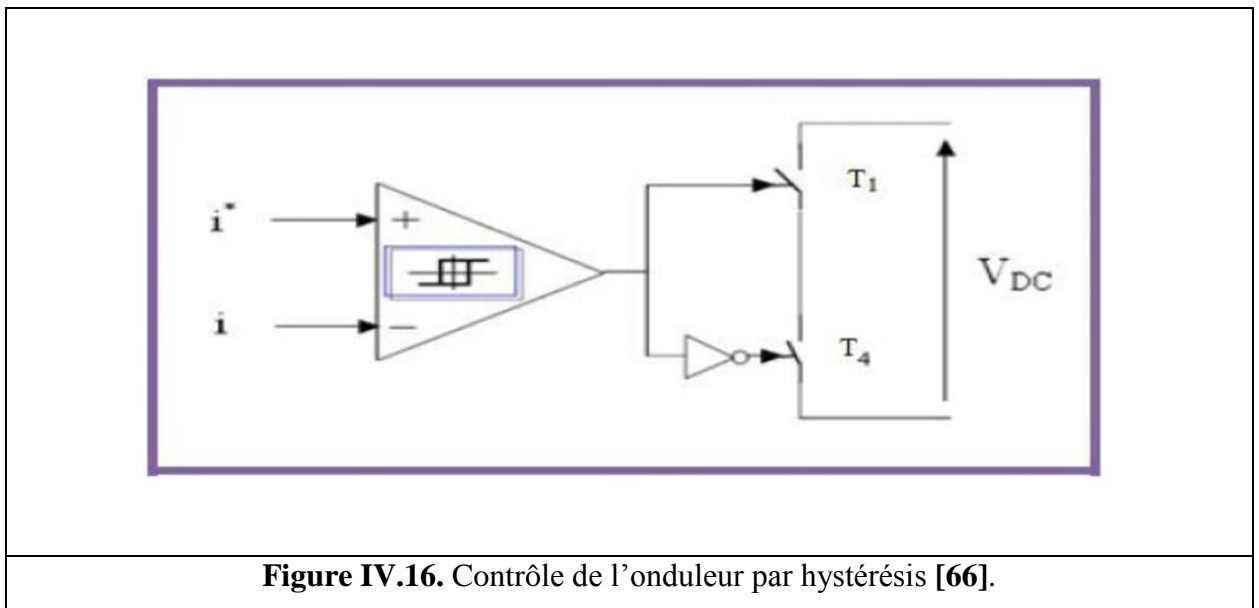


Figure IV.16. Contrôle de l'onduleur par hystérésis [66].

IV.5.2 Commande par MLI

Le principe de la méthode basée sur la MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) consiste à comparer la tension de référence de l'onduleur "Modulatrice" avec un signal en dent de scie à fréquence élevée "Porteuse", la sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs comme le montre le schéma de principe de la figure IV.17 [70][73].

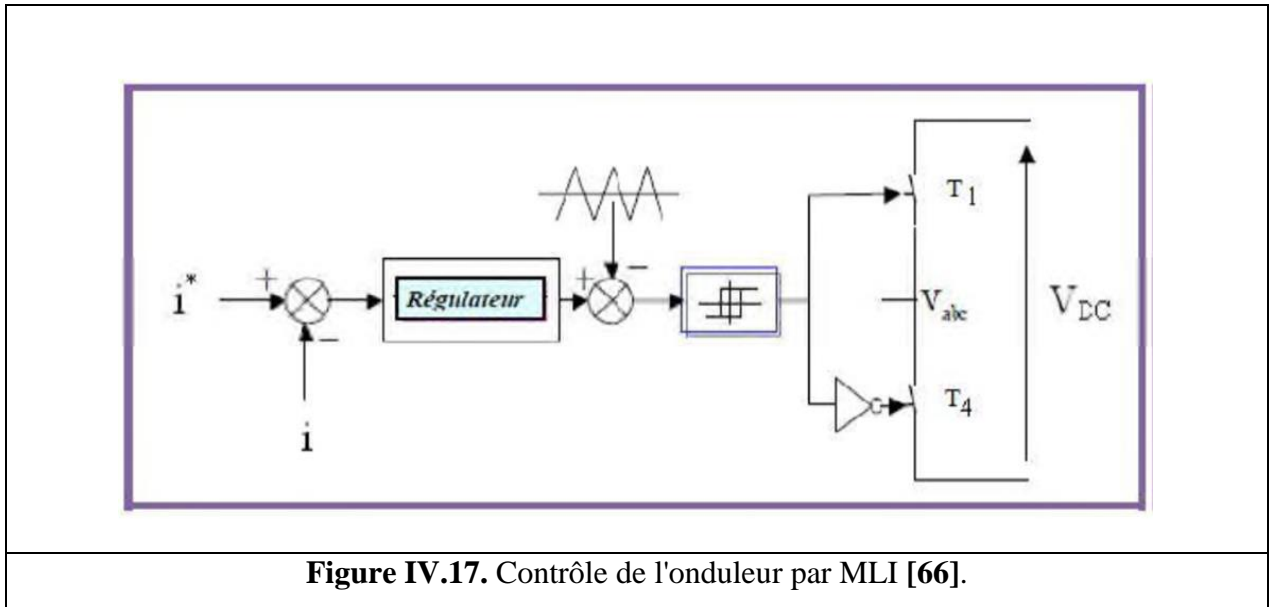


Figure IV.17. Contrôle de l'onduleur par MLI [66].

IV.6. IDENTIFICATION DES COURANT HARMONIQUE

Afin d'améliorer les performances des systèmes de dépollution traditionnelle, plusieurs méthodes ont été développées pour identifier les courants perturbés.

En général l'identification des composantes harmoniques se fait dans les courants, soit dans les puissances, les méthodes sont fondées sur le principe de la séparation du fondamental des harmoniques par filtrage [29] [32] [76].

IV.6.1. Méthode des courants :

Le but de cette méthode est d'identifier les courants harmoniques à partir du courant total et forcer l'onduleur pour injecté des courants harmoniques inverses dans le réseau, Ce qui permet réduction les harmoniques.

On capte le courant de charge polluante, ce courant est filtré, ce qui permet d'éliminer la composante harmonique et ne laisse passer que la composante fondamentale. Le courant total moins la composante fondamentale donne le courant harmonique. Le courant injecté par l'onduleur est réglé autour de ce courant harmonique de référence. Les deux techniques de régulation : MLI sinus-triangulaire et hystérésis sont utilisées [77].

IV.6.1.1. Algorithme de la méthode des courants :

Le courant absorbé par la charge non linéaire est constitué de courant fondamentale et courant harmoniques, après avoir fait la transformation de Fourier, nous obtenons [77].

$$i_{ch} = i_{ch1} + \sum_{i=2}^{\infty} i_h \quad (IV.43)$$

Avec :

i_{ch} : le courant total de la charge.

i_{ch1} : le courant fondamentale absorbé par la charge.

i_h : le courant harmonique absorbé par la charge.

Le filtre passe bande du deuxième ordre a pour principe d'extraire la composante fondamentale du courant.

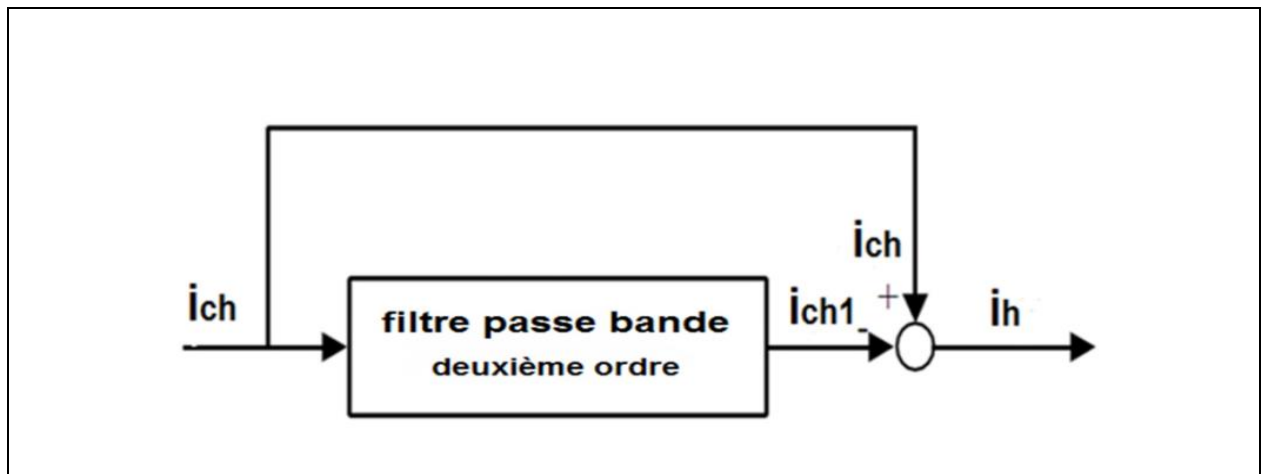


Figure IV.18. Schéma de principe d'identification des courants harmoniques [77].

IV.6.2. Méthodes sur les puissances instantanées :

La méthode des puissances instantanées n'est applicable que si la tension du réseau est parfaitement sinusoïdale et équilibrée.

Transformer la tension de la source V_s et le courant de la charge i_{ch} dans le repère α, β en utilisant la transformation de Concordia.

Permet de passer d'un système triphasé à un système biphasé, ce qui simplifie les expressions mathématiques.

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.44})$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.45})$$

Les composante ayant l'indice (0) représentant les composantes homopolaires du système triphasé de courant et de tension, on considère que le réseau étudié il est neutre et isolé, et constitué de trois fils ce qui barrière le mouvement des composantes homopolaire.

A partir des équations (IV.44 et IV.45), on a calculé les puissances instantanées, active et réactive, que sont données par la relation suivante:

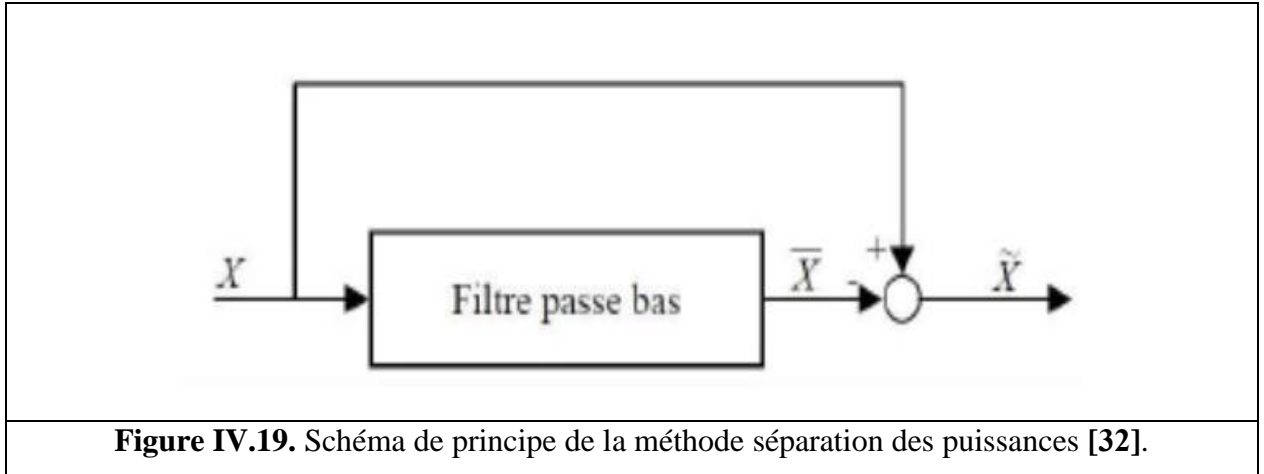
$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{IV.46})$$

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

$$p = \bar{p} + \tilde{p}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (\text{IV.47})$$

Le filtre de puissance est utilisé afin de séparer la composante de la puissance liée aux harmoniques de la puissance liée au fondamental [32].



Après avoir séparé les puissances, on calcule les courants perturbateurs dans le repère α, β en utilisant l'expression IV.47 comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{P} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (IV.48)$$

Avec :

$$\Delta = v_{\alpha}^2 + p_0 \quad (IV.49)$$

p_0 est la puissance active fournie par la boucle de tension nécessaire à la régulation de la tension continue.

Afin de compenser l'ensemble des harmoniques on utilise la relation IV.48, cette technologie permet également de compenser l'énergie réactive.

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} \quad (IV.50)$$

On utilise la relation IV.50 pour compenser la puissance réactive et l'ensemble des harmoniques.

$$\begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 - \tilde{P} \\ \bar{q} - \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (IV.51)$$

Le courant de référence $i_{ref\alpha}$, sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{ref1} \\ i_{ref2} \\ i_{ref3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ref\alpha} \\ i_{ref\beta} \end{bmatrix} \tag{IV.52}$$

La méthode des puissances instantanées est donnée par la figure IV.20 suivante :

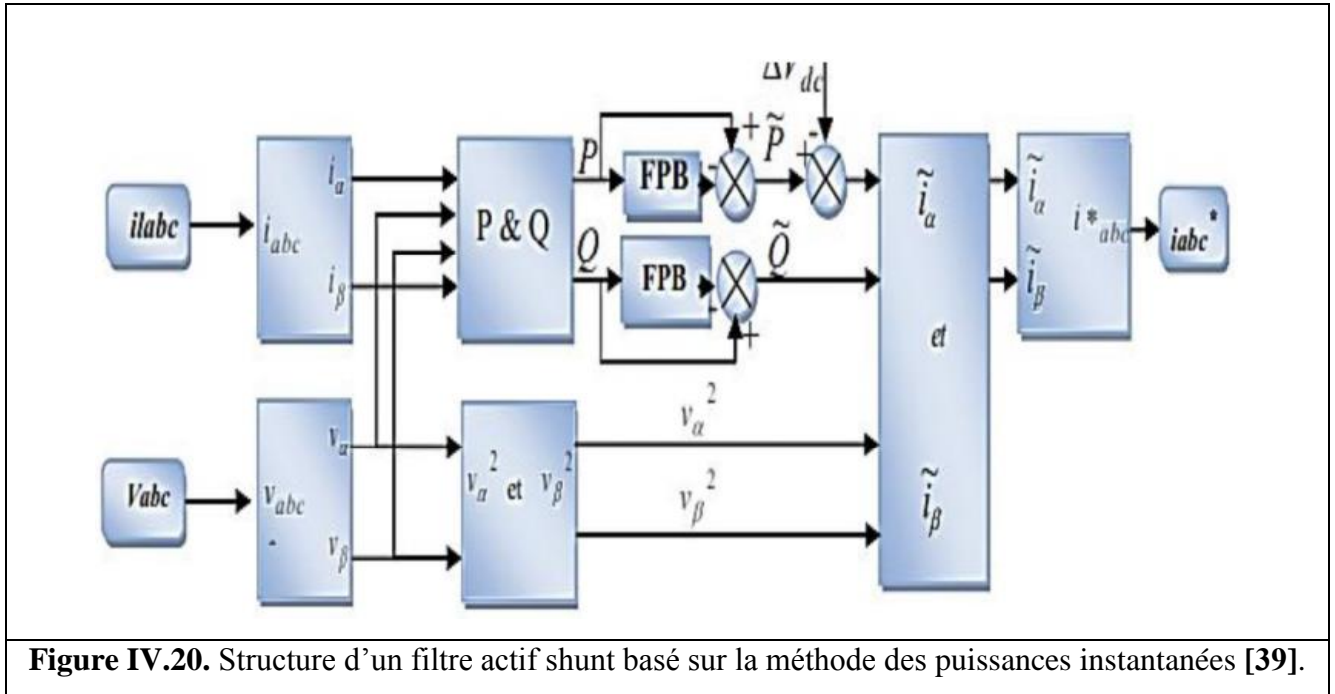


Figure IV.20. Structure d'un filtre actif shunt basé sur la méthode des puissances instantanées [39].

IV.6.3. Méthode de détection synchrone :

La méthode des courants instantanés travaille dans l'espace de Park dq, elle requiert de ce fait moins de calcul tout en étant précise et plus robuste. et cette méthode appelée aussi par la méthode de détection synchrone.

D'abord on ramène les courants triphasés de la charge polluante dans le domaine de Park en utilisant la transformée de Park comme suit :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \sin \theta & \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} \tag{IV.53}$$

On considère que le réseau étudié est composé de trois fils.

θ : est l'angle de la transformation de Park.

La pulsation de référence est fixe parce que nous avons dans le domaine de la dépollution des réseaux électriques.

L'angle de la transformation de Park est défini par :

$$\theta = \omega t \quad (\text{IV.54})$$

Les courants harmoniques sont composés d'une composante continue liée au fondamental, et d'une composante alternative liée aux harmoniques.

$$i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \quad (\text{IV.55})$$

$$i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \quad (\text{IV.56})$$

On utilise un filtre passe bas et un soustracteur pour séparer ces deux composantes de courant et extraire la composante continue comme montré dans la figure IV.19

On utilise la transformée inverse de Park pour calculer les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits de référence i_{ref} les courants sont donnés par la relation suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{ref d} \\ i_{ref q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 - \tilde{i}_d \\ -\tilde{i}_q \end{bmatrix} \quad (\text{IV.57})$$

L'identification des harmoniques par la méthode de détection synchrone est représentée par la figure IV.21 suivante :

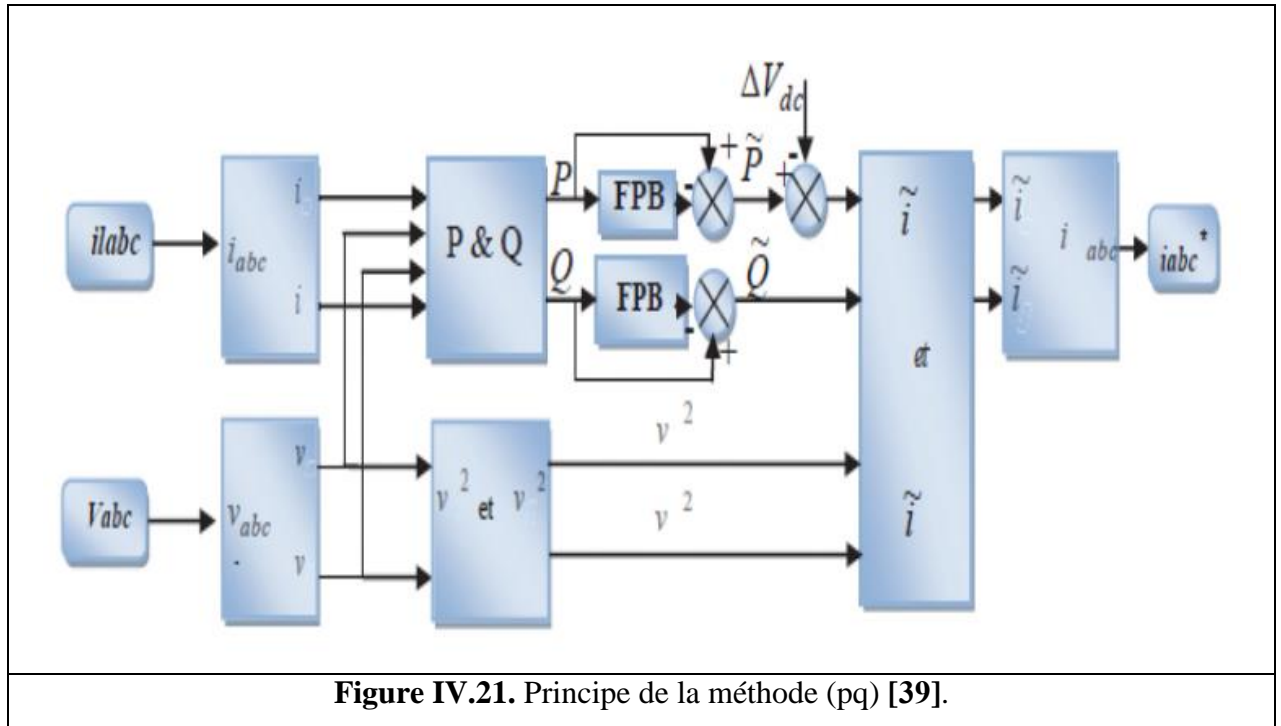


Figure IV.21. Principe de la méthode (pq) [39].

IV.7. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de contrôleurs « STATCOM » dans certaines fonctions de contrôle, la régulation de la tension par compensation de l'énergie réactive.

Nous avons également étudié les méthodes d'identification des courants harmoniques dans le réseau électrique et à cet égard une simulation sera menée dans le chapitre suivant puis une analyse des résultats obtenus sera effectuée.

CHAPITRE V :

SIMULATION ET RESULTATS

V.1. INTRODUCTION

Pour dépolluer le réseau électrique de perturbations, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles et modernes de dépollution, comme ils ont été présentés. Les solutions classiques ne sont pas très efficaces pour traiter ce problème.

Nous avons proposé dans ce chapitre de mettre en évidence les performances d'un STATCOM, connecté en parallèle avec le réseau électrique afin d'injecter les courants permettant d'éliminer la pollution harmonique engendrées par une charge non linéaire.

Cette étude est validée par des résultats de simulation obtenus sous environnement Matlab/Simulink.

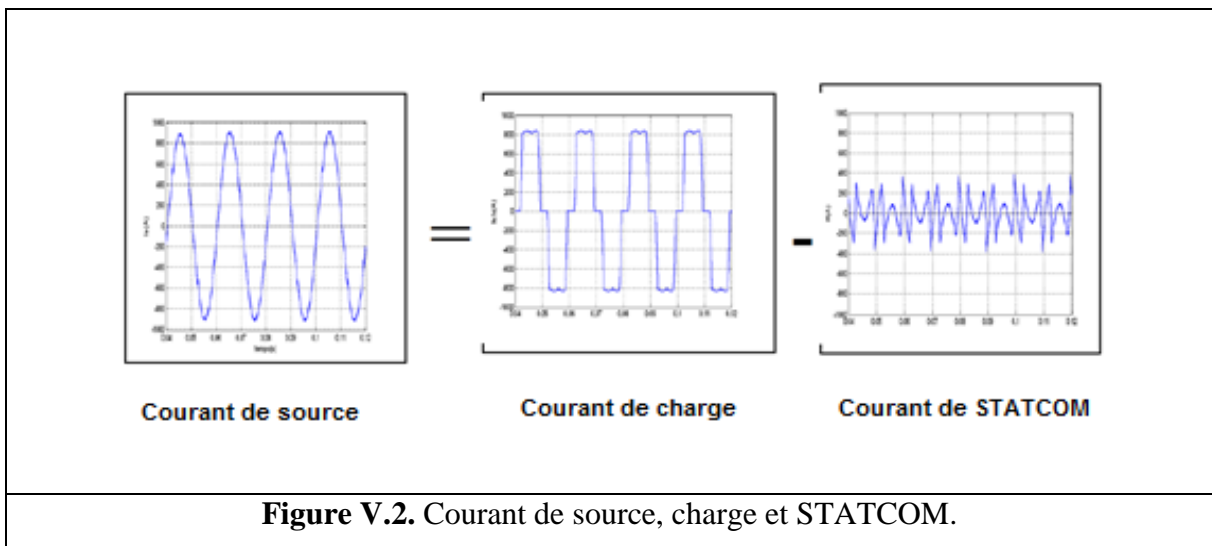
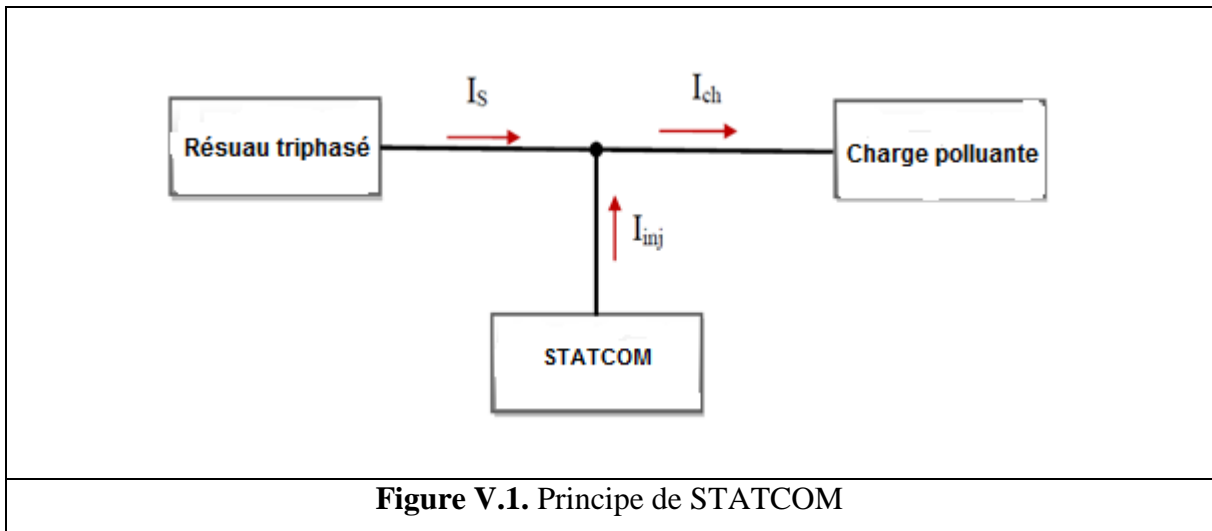
V.2. OBJECTIF

Afin de compenser les courants harmoniques générés par les charges polluantes connectées aux réseaux électriques. La Figure (V.1) rappelle la structure générale d'un STATCOM. Ce STATCOM peut être décomposé en deux parties : la partie de puissance et la partie de commande.

La première partie comporte un onduleur, un filtre de découplage et une source de stockage d'énergie. Ces deux derniers éléments déterminent la nature du STATCOM (structure tension ou courant), ce qui nous intéresse dans notre mémoire est un filtre à base d'un onduleur de courant. La Figure (V.2) représente le but fondamental, ainsi que le principe de notre travail.

V.3. PRINCIPE DE STATCOM

Ce STATCOM est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le courant du réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants alternatifs au niveau de la source du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de charge non linéaire.



V.4. MODELE UTILISE EN SIMULATION

Nous avons implémenté le modèle et la simulation dans l'environnement Matlab/Simulink principalement pour valider la modélisation du système et ses lois de commande associées. L'objectif est de valider et démontrer l'efficacité de l'utilisation du STATCOM sur une charge non linéaire pour éliminer les courants harmoniques. L'algorithme de contrôle est développé et testés en simulation est présenté à la figure suivant (V.3).

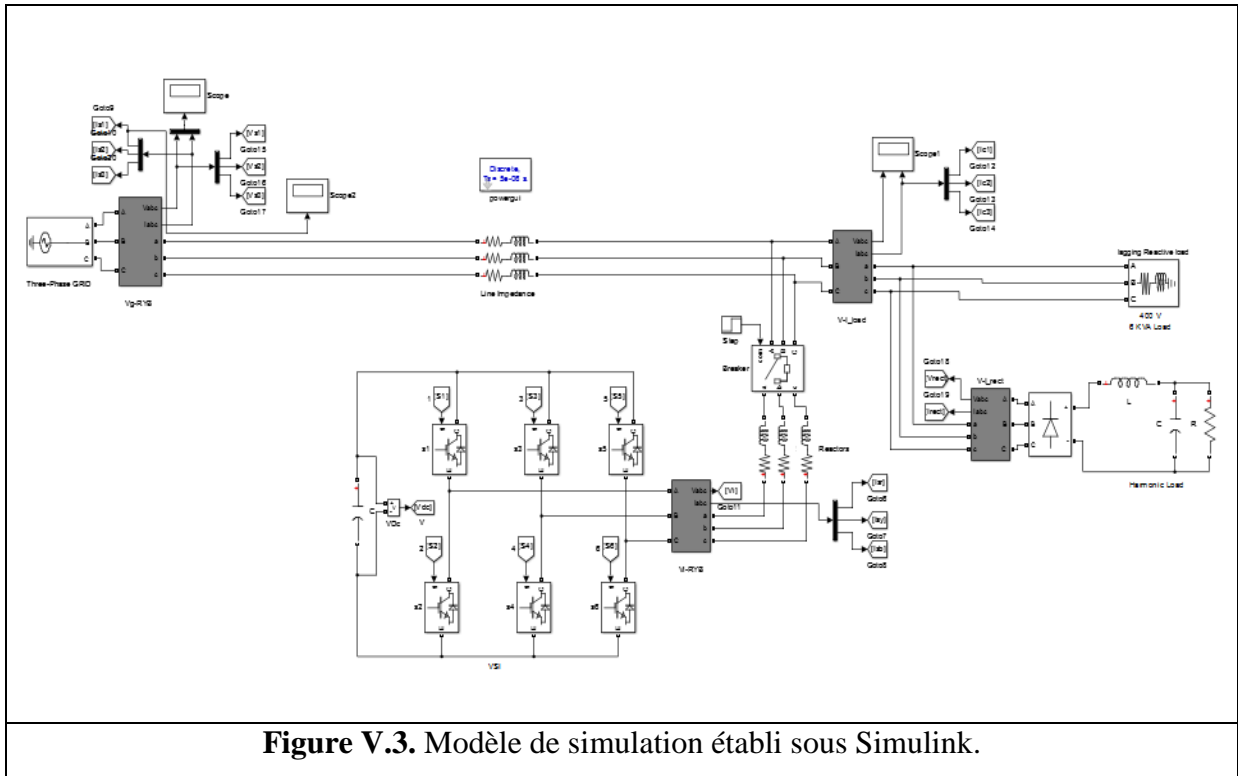


Figure V.3. Modèle de simulation établi sous Simulink.

Notre modèle est composé d'une source de tension 400V - fréquence 50 HZ et line d'impédance et alimenté une charge non linéaire.

Tableau V.1. Paramétrés de la charge non linéaire.

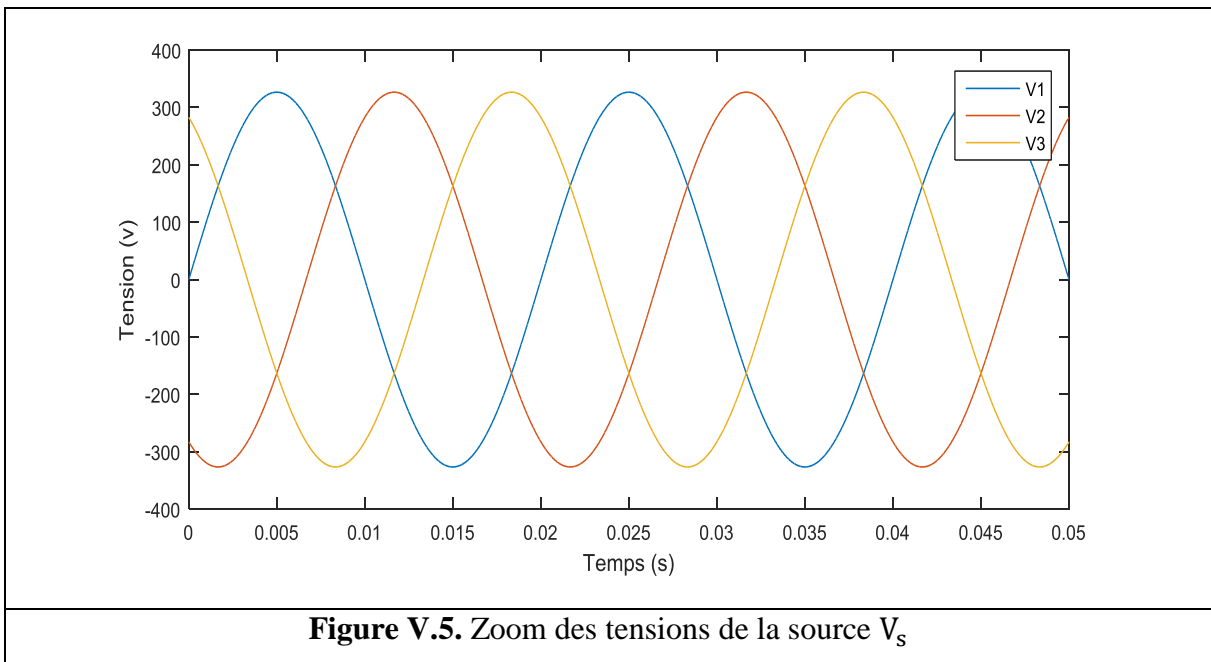
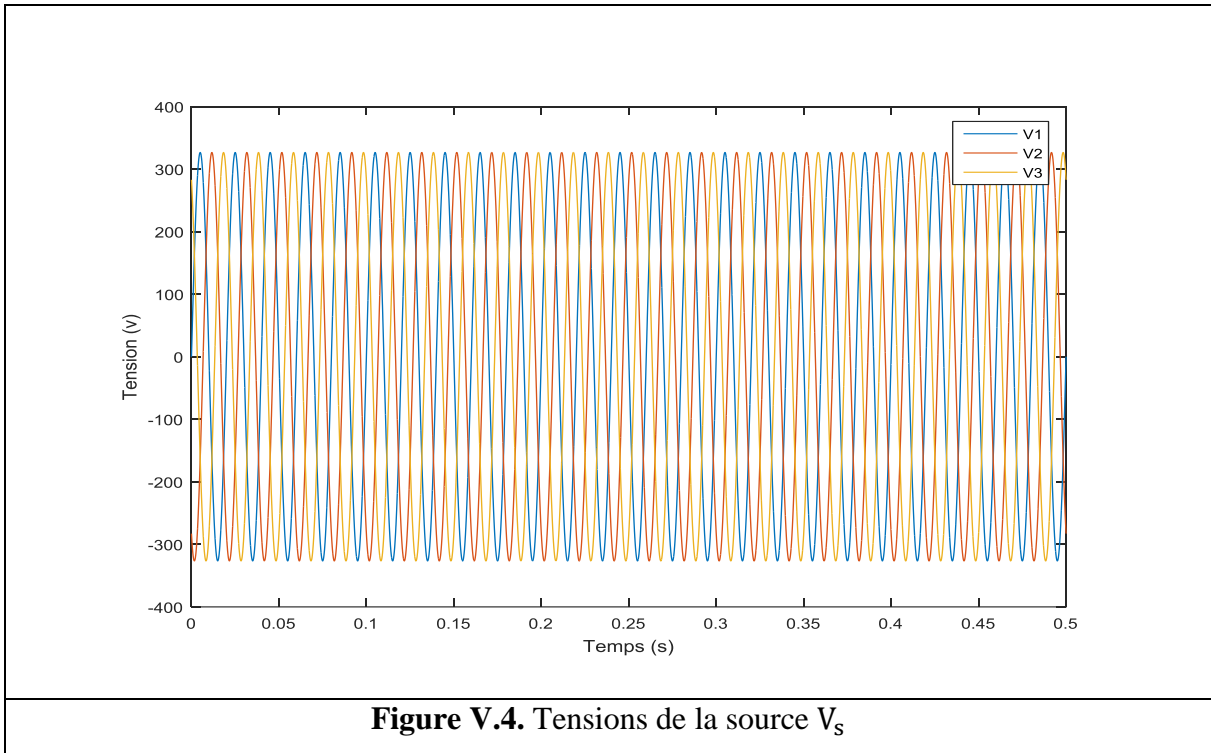
Paramètre	R (Ω)	L (H)	C (F)
Valeurs	20	0.1	0.0004

V.5. RESULTATS DES SIMULATIONS

V.5.1. Résultats sans STATCOM

Dans cette partie nous présenterons les résultats de la simulation pour le réseau étudié sans utiliser le STATCOM.

Les figures (V.4 et V.5) montrent respectivement les tensions de la source.



Les figures (V.6 et V.7 et V.8) montrent respectivement les courants de charge non linéaire.

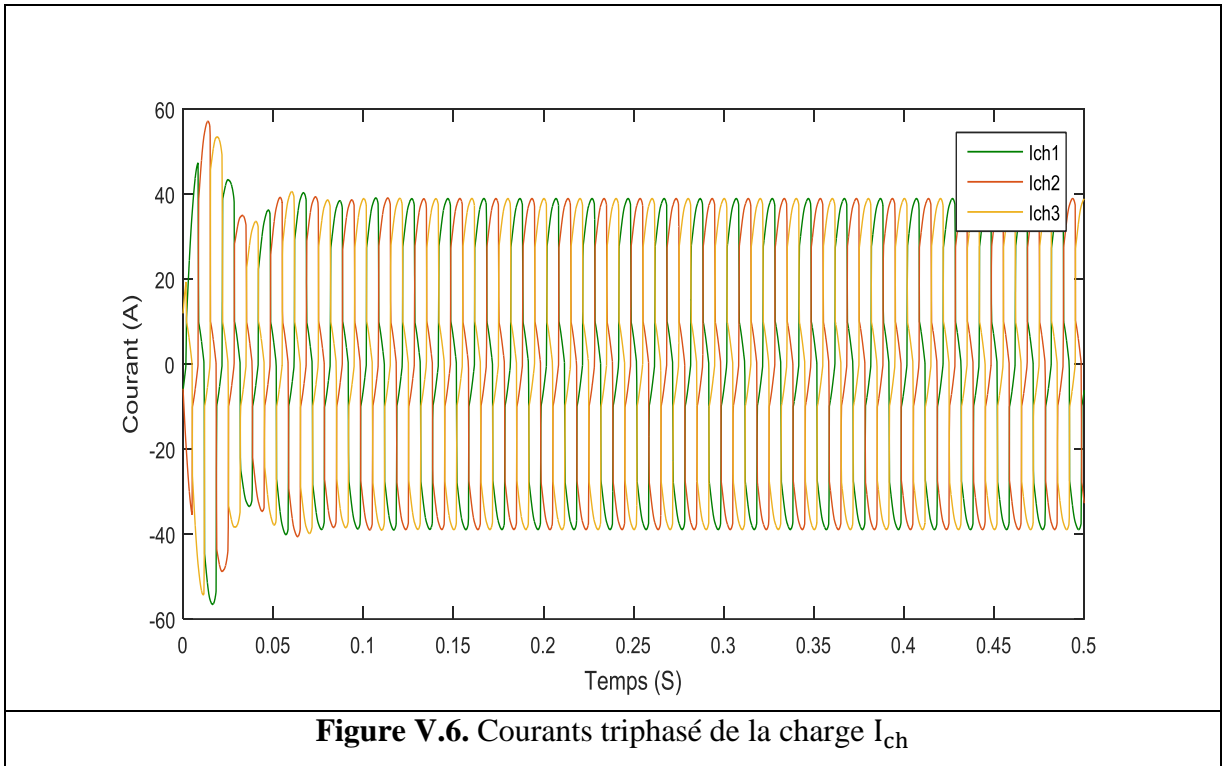


Figure V.6. Courants triphasé de la charge I_{ch}

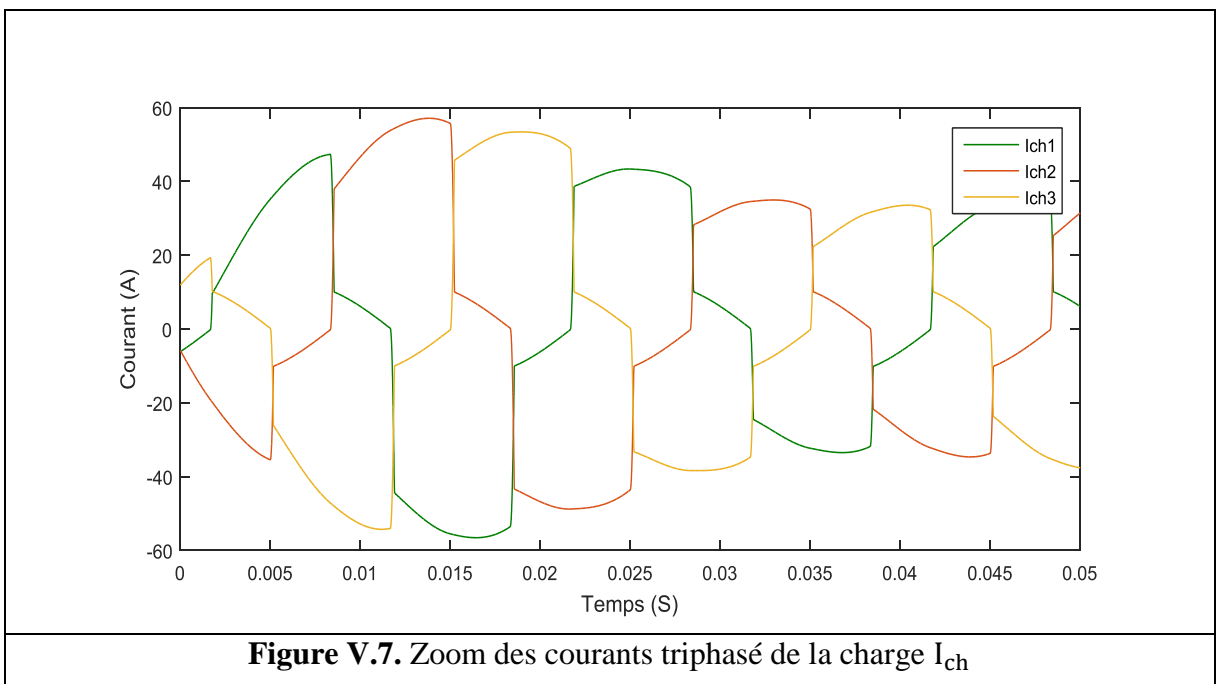


Figure V.7. Zoom des courants triphasé de la charge I_{ch}

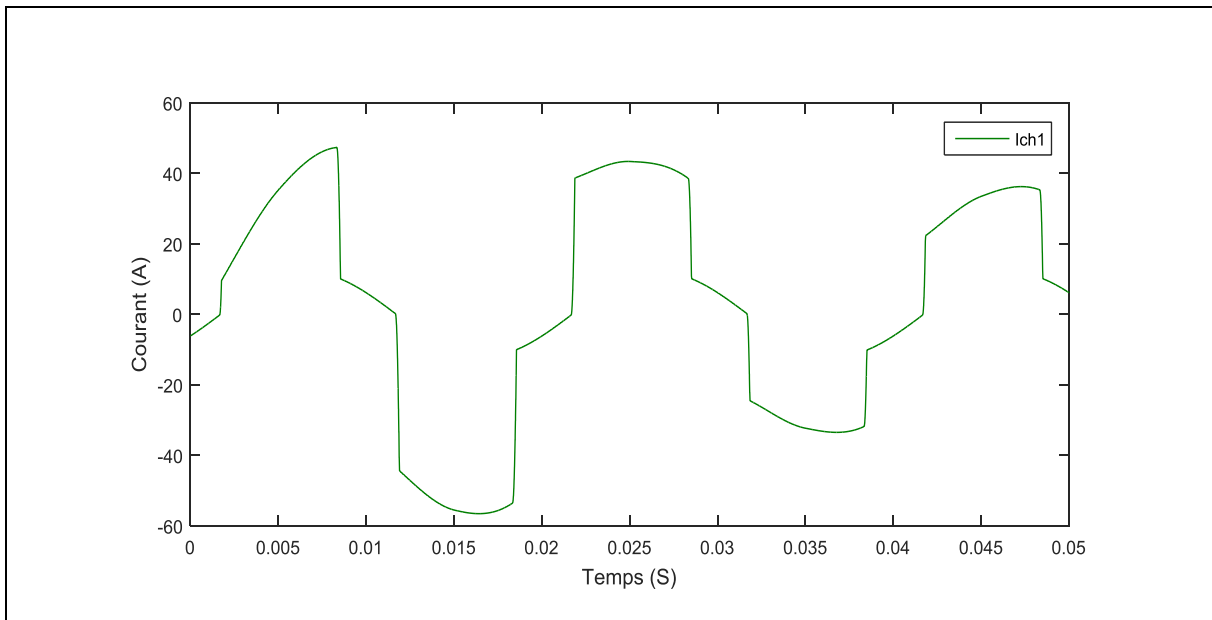


Figure V.8. Zoom de courant de la charge I_{ch1}

Les figures (V.9 et V.10 et V.11) montrent respectivement les courants de la source.

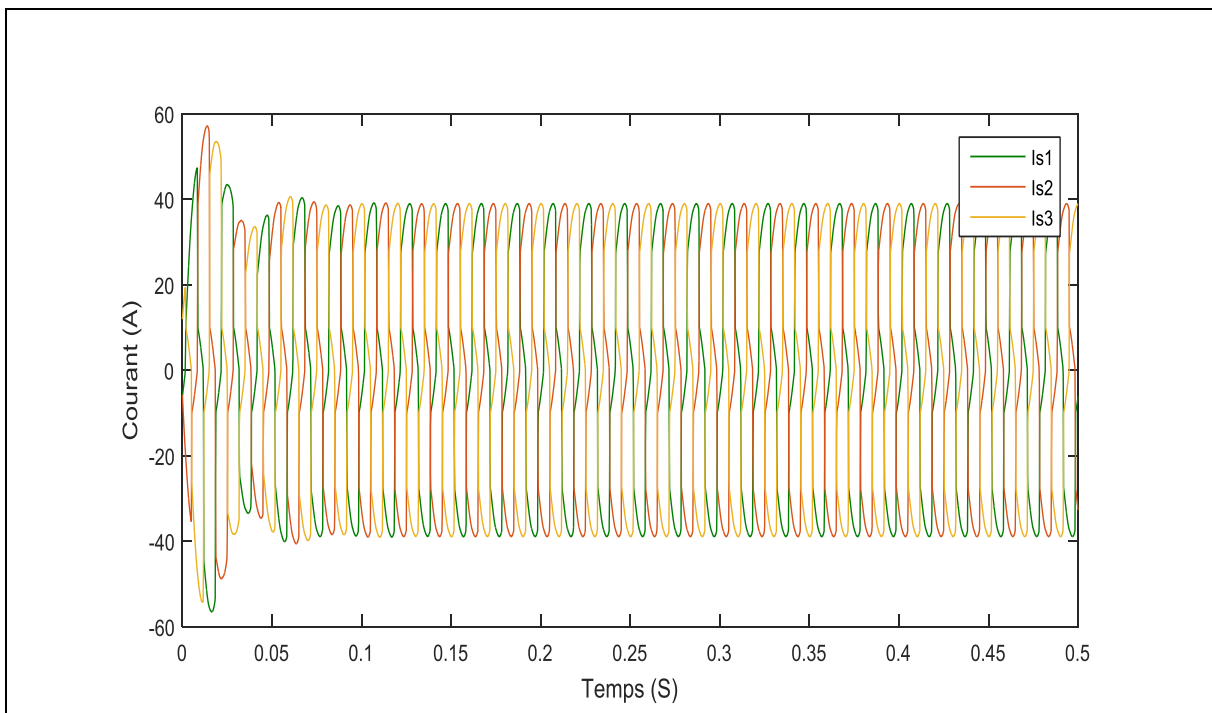
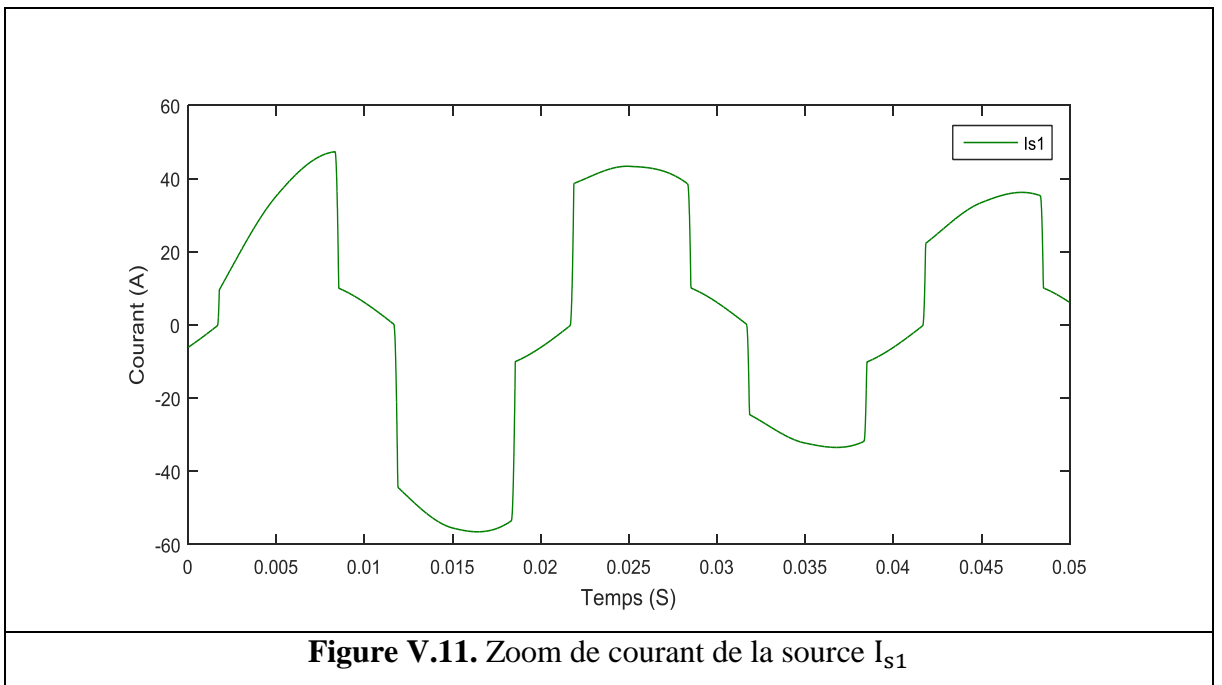
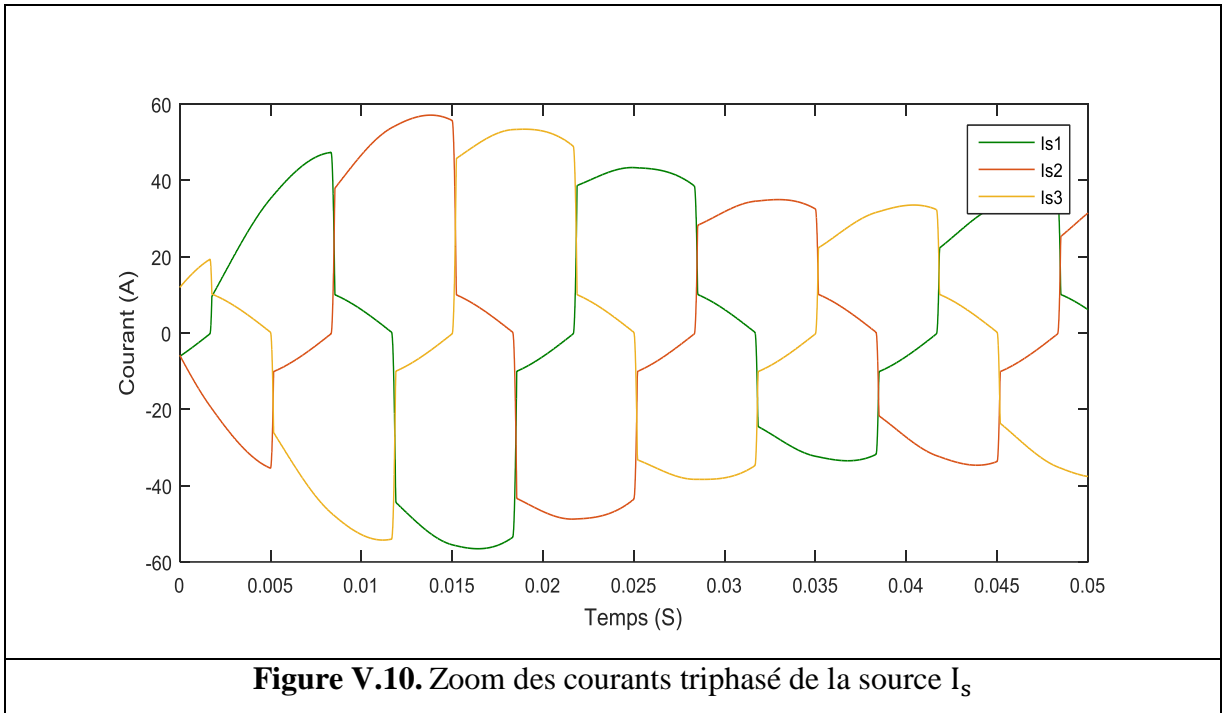
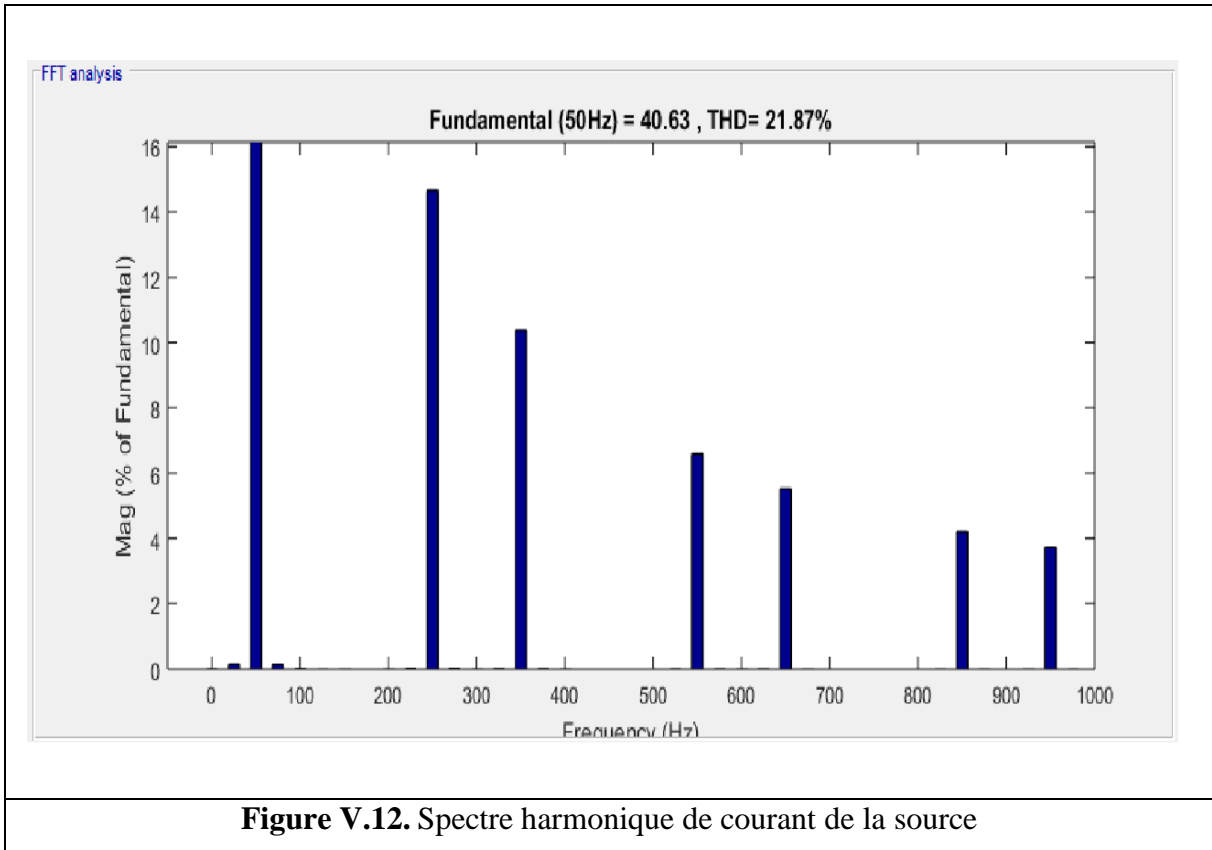


Figure V.9. Courants triphasé de la source I_s





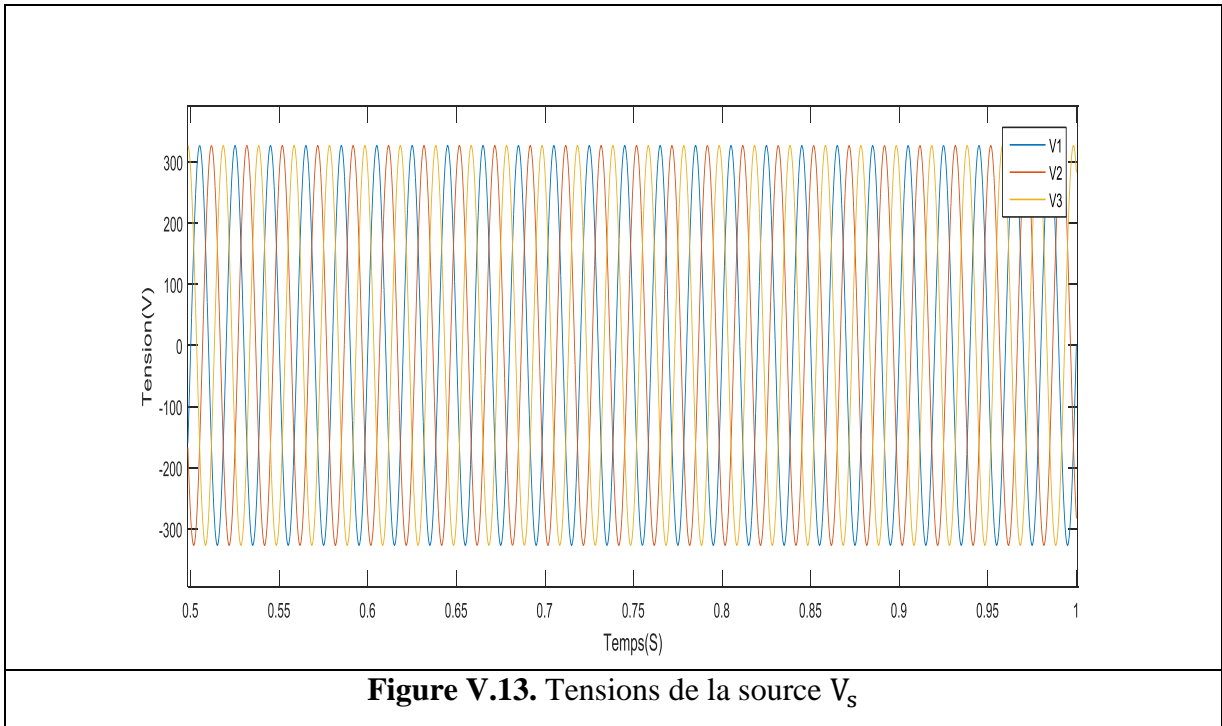
V.5.1.1. Interprétation des résultats

On remarque que la charge non linéaire génère des courants non sinusoïdaux qui déforment l'onde de courant source et perdent sa forme sinusoïdale, et donc une pollution se produit dans le réseau étudié.

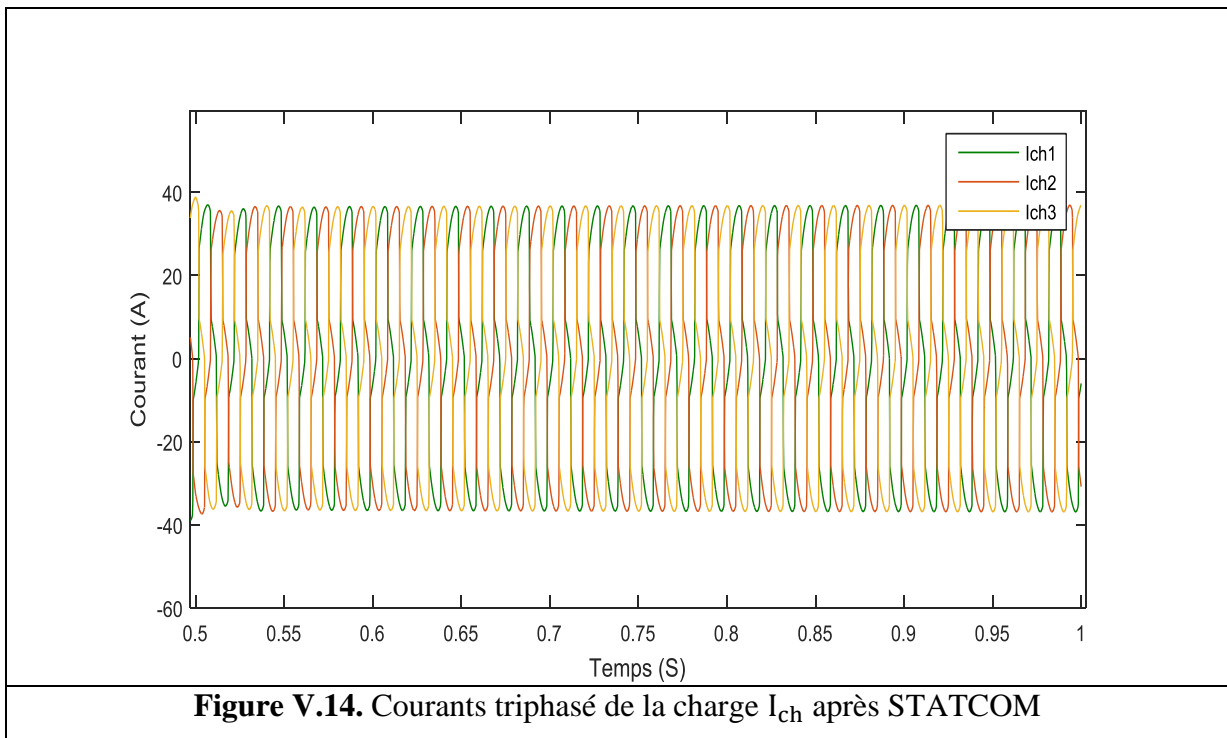
Le taux de distorsion (THD) est 21.87 %.

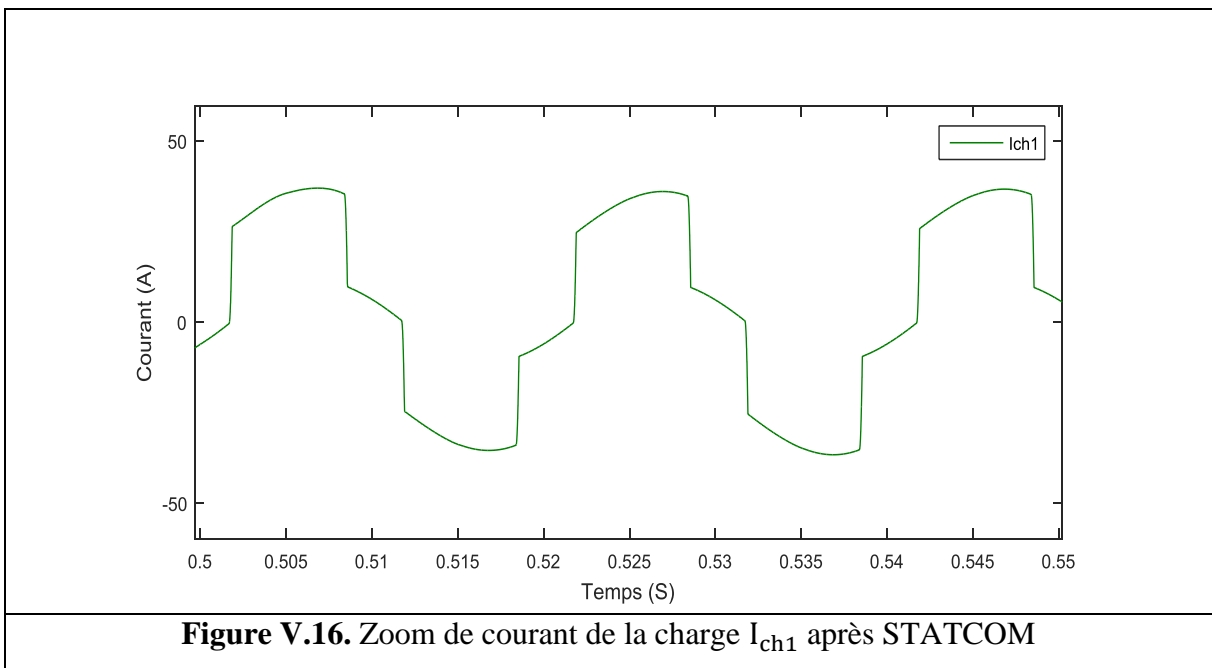
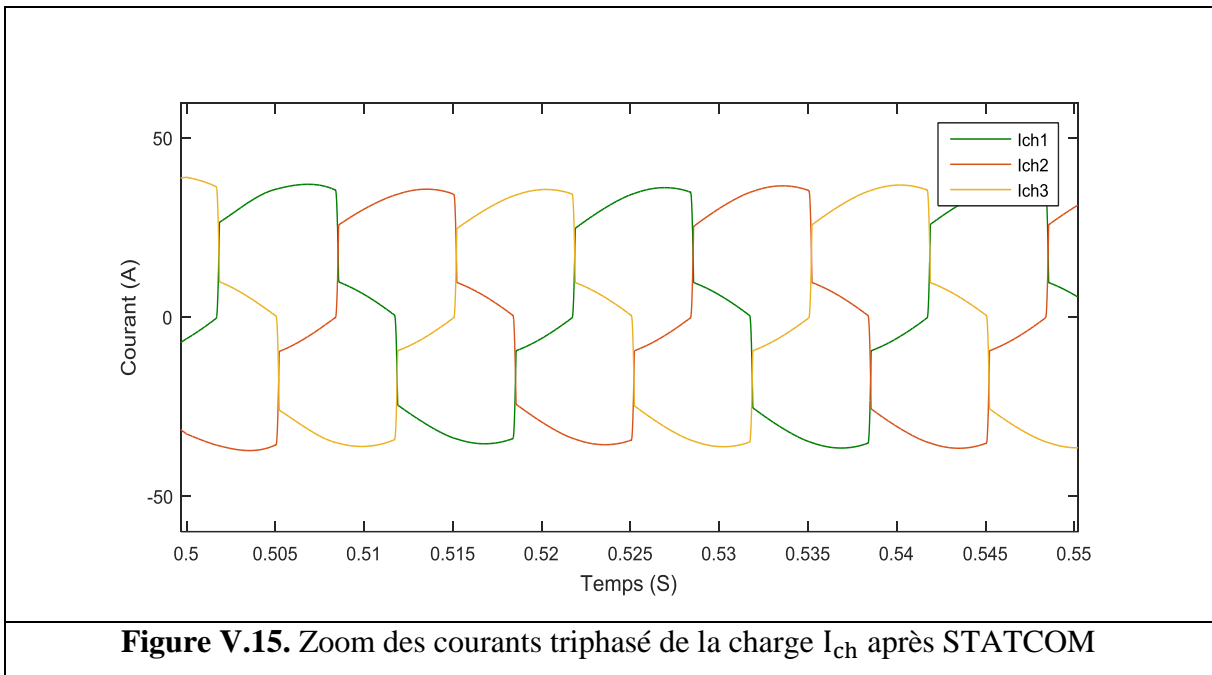
V.5.2. Résultats avec STATCOM

Dans cette partie, nous présenterons les résultats de la simulation pour le réseau étudié après utilisation de STATCOM.

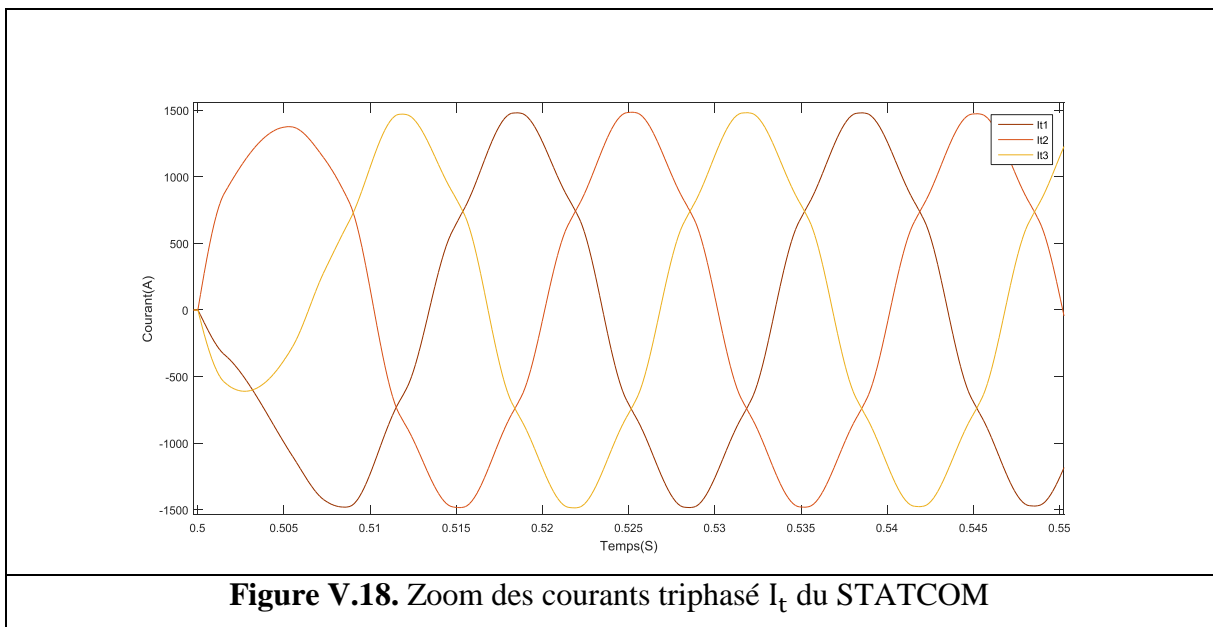
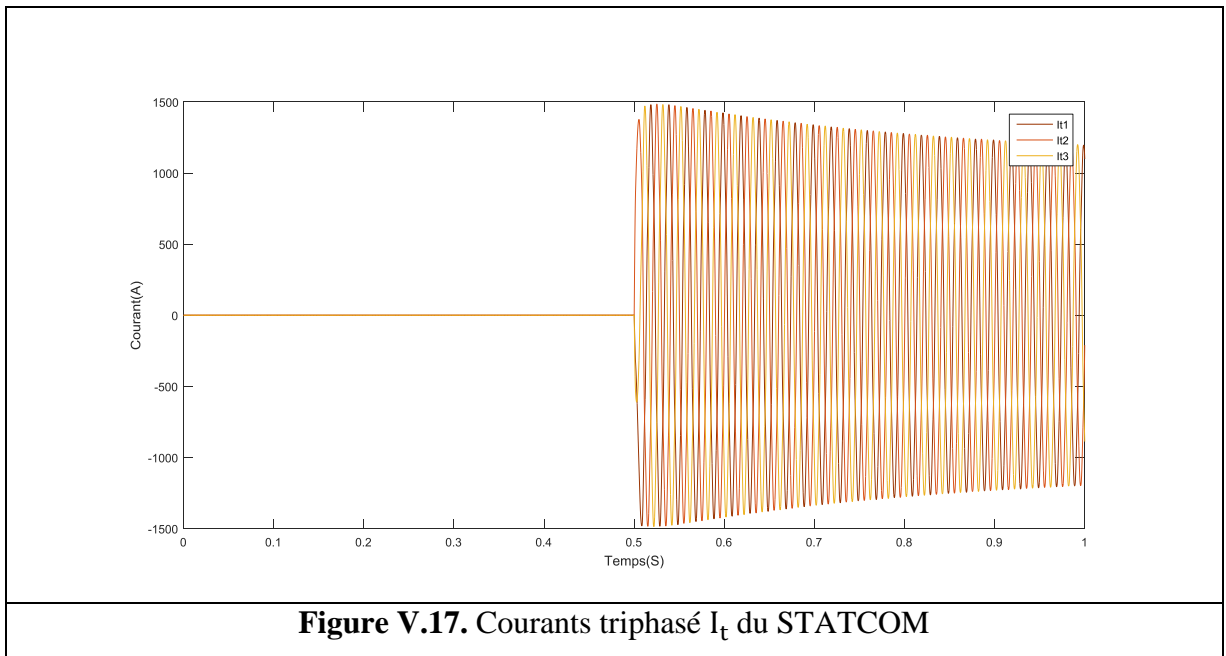


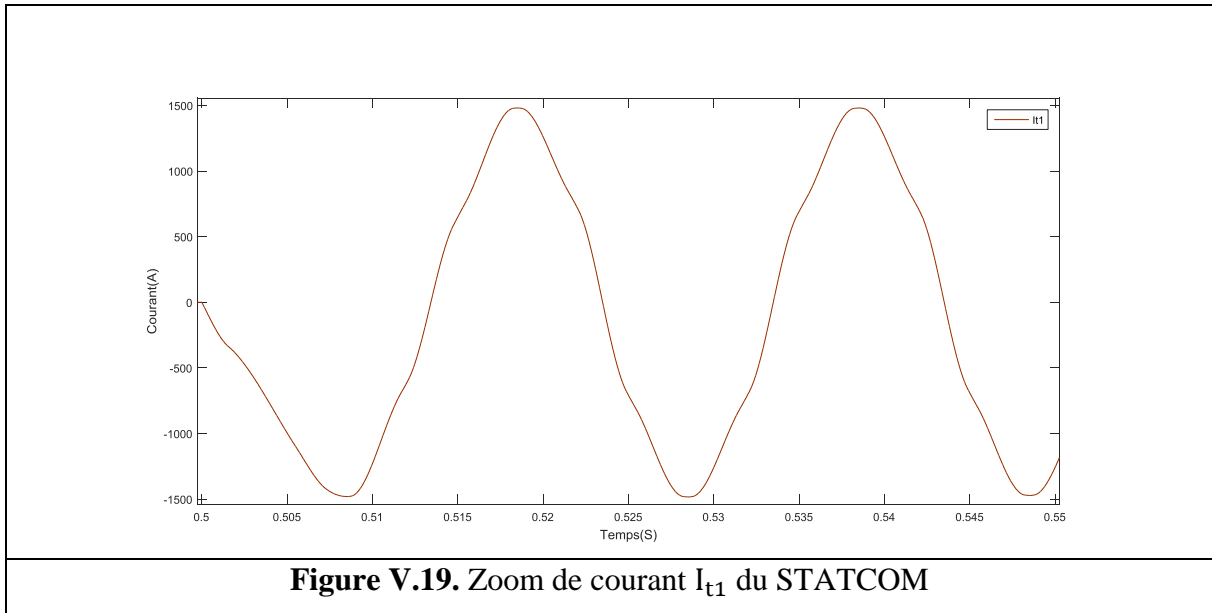
Les figures (V.14 et V.15 et V.16) montrent respectivement les courants de la charge non linéaire.



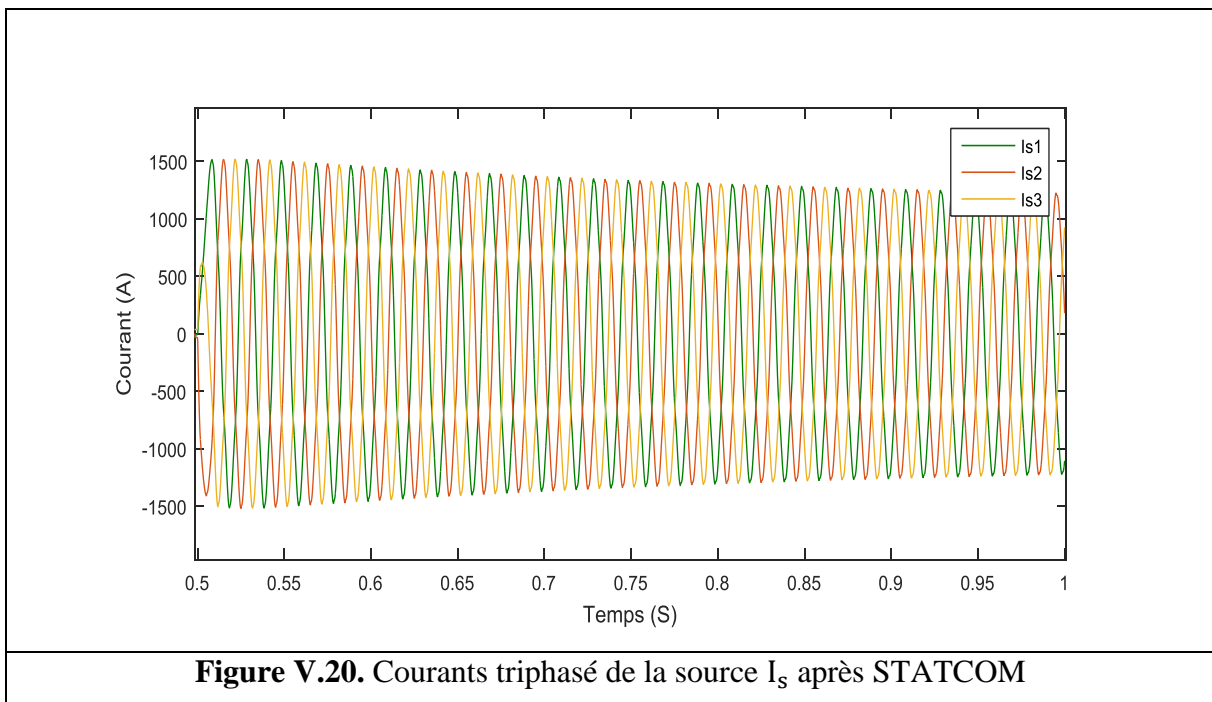


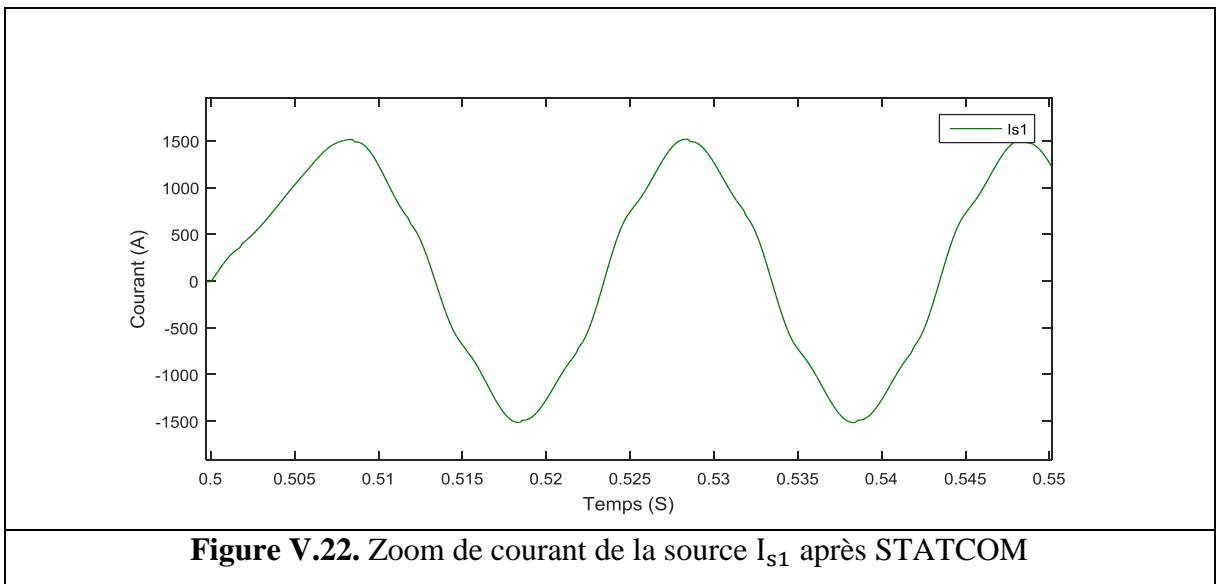
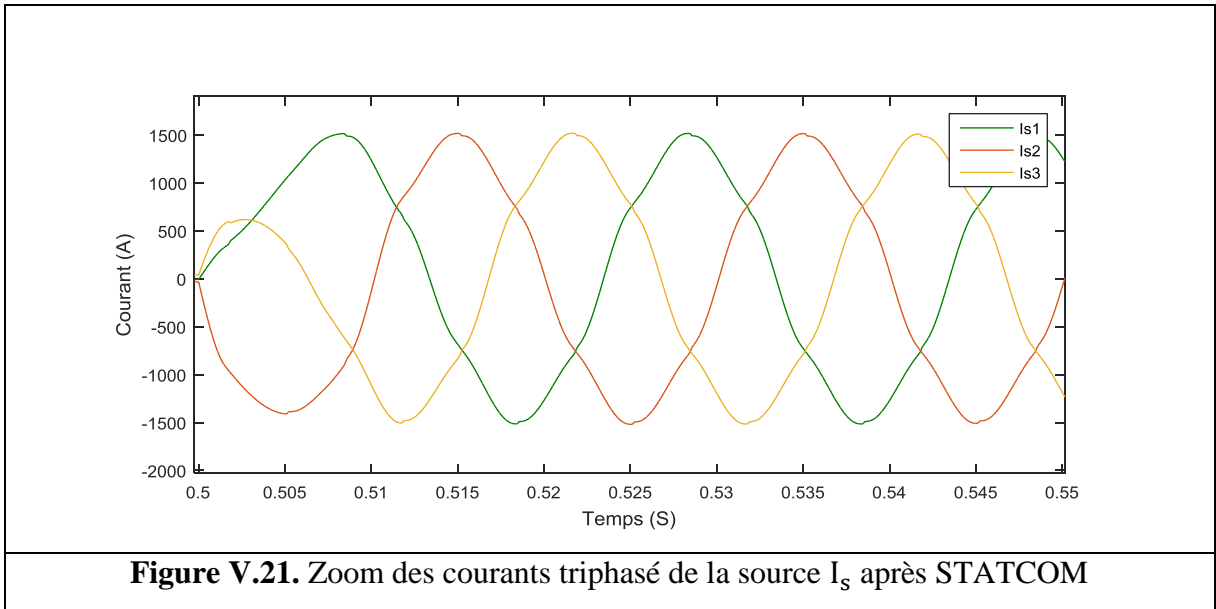
Les figures (V.17 et V.18 et V.19) montrent respectivement les courants du STATCOM.





Les figures (V.20 et V.21 et V.22) montrent respectivement les courants de la source.





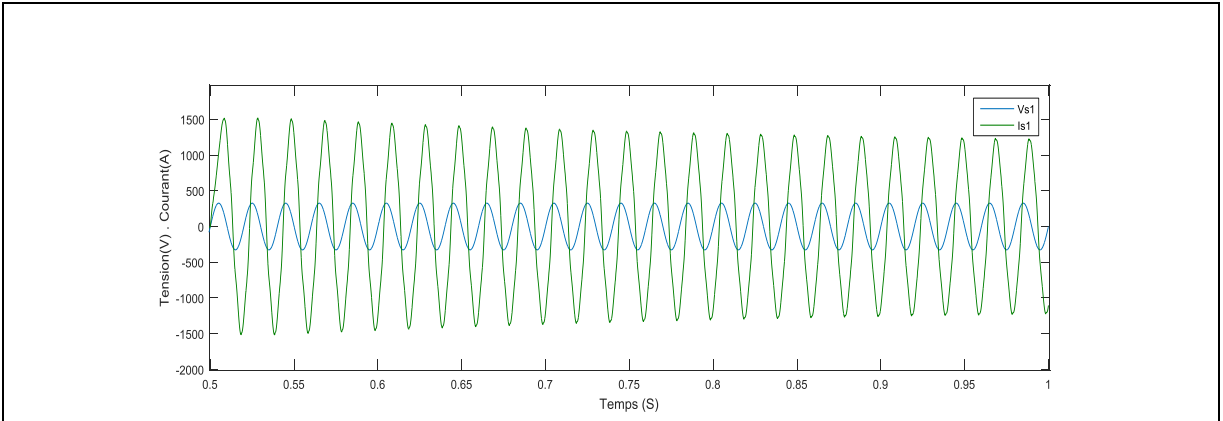


Figure V.23. Tension et courant de la source après STATCOM

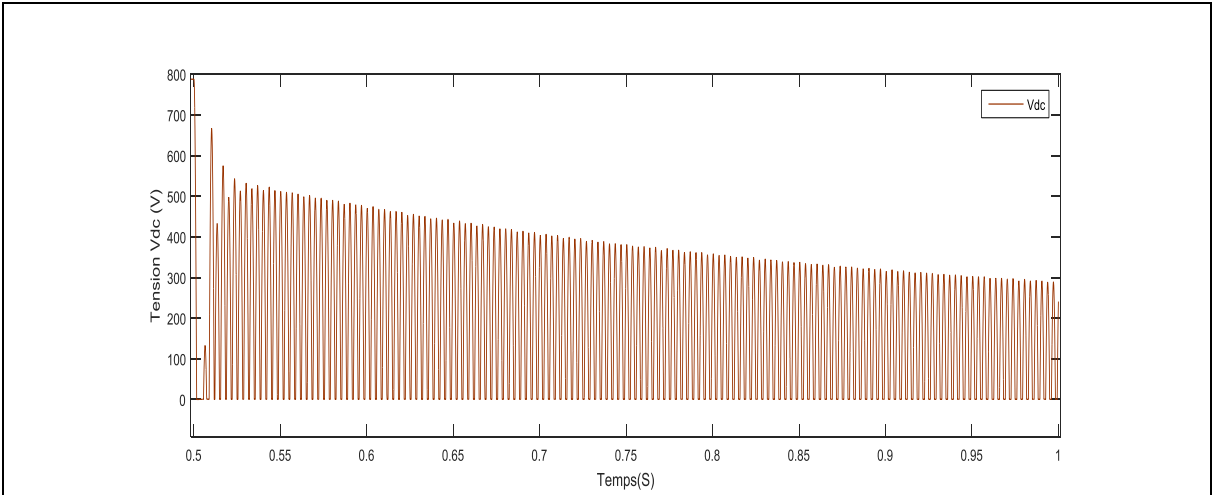


Figure V.24. Source de tension continue V_{dc}

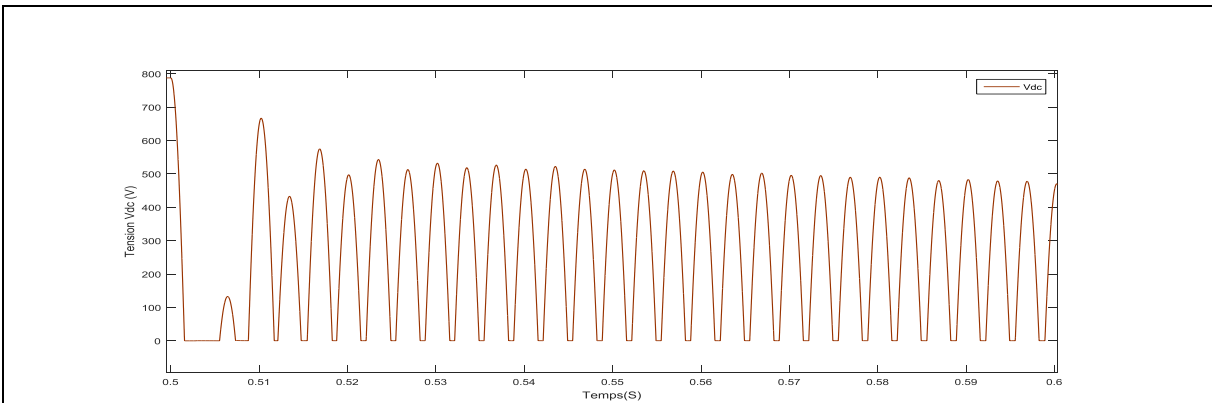
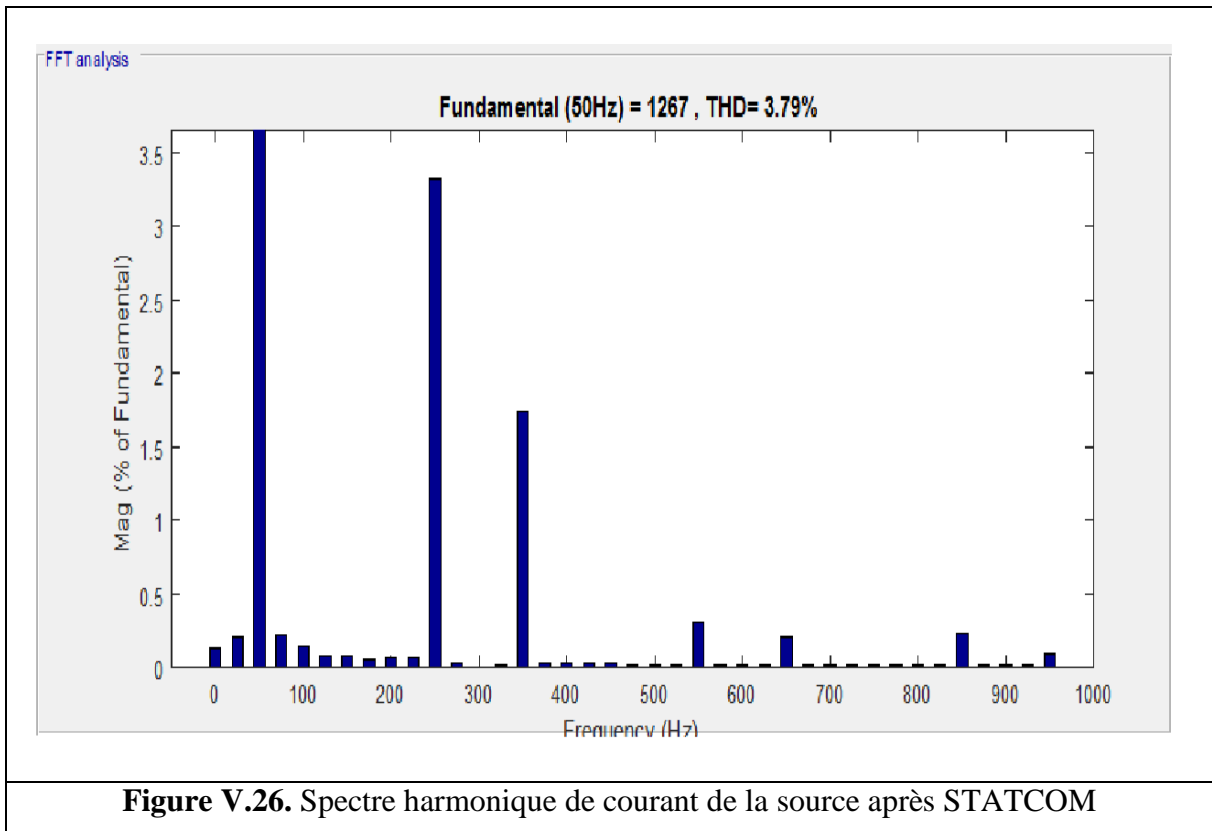


Figure V.25. Zoom de source de tension continue V_{dc}



V.5.2.1. Interprétation des résultats

On remarque qu'une fois le STATCOM devient opérationnel, le courant de sources est quasi sinusoïdal.

Le fait que le courant de source a récupéré son allure sinusoïdale, ce qui nous permet de dire que notre STATCOM assure pleinement sa mission. Ce qui est bien illustré à travers la comparaison des THD du courant de source avant et après application du STATCOM.

La figure V.17 représente les courants du STATCOM injectés dans le réseau pour éliminer les harmoniques.

La figure V.23 représente l'allure du courant et de la tension de la source. On remarque que le courant est pratiquement en phase avec la tension.

La figure V.26 représente le THD de courant de la source après STATCOM THD = 3.79 %

Les deux Figures représentent l'évolution du courant de source de phase avec son spectre «FTT» et ce avant et après filtrage des harmoniques :

Tableau V.2. La valeur de THD sans STATCOM et avec STATCOM

	Sans STATCOM	Avec STATCOM
THD	21.87 %	3.79 %

V.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons effectué des simulations dans Matlab pour un réseau électrique de charge non linéaire pour voir que cette charge affectait le courant du réseau et conduisait à sa distorsion. Pour résoudre le problème, nous avons ajouté (STATCOM) dans le réseau.

En détail, nous avons mené deux expériences de simulation, sans STATCOM et en utilisant STATCOM, et les résultats ont filtré les pollutions harmoniques du réseau après l'utilisation de STATCOM, et la valeur THD (taux de distorsion harmonique) était inférieure à 5% après avoir été élevée par rapport à la simulation sans STATCOM.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'objectif de ce travail était d'étudier une méthode l'identification des courants harmonique afin d'adopter une stratégie de dépollution (STATCOM) dans un réseau électrique, à paramètres bien déterminés, raccordé à une source d'énergie. Nous avons pris en étude comme problématique les perturbations ou distorsions harmoniques générées par une charge non linéaires connectée au réseau électrique.

- Le premier chapitre a été consacré à la problématique des différentes perturbations générées par les charges non linéaires connectées aux réseaux électriques tels que les Creux de tension et coupures brèves, déséquilibre de tension, variations de tension, et les distorsions harmoniques.. etc
- Le deuxième chapitre est une étude des types d'effets provoqués par les harmoniques, avec des solutions traditionnelles et modernes.
- Le troisième chapitre les différents types des dispositifs FACTS et leurs principes de fonctionnement.
- Le quatrième chapitre fait l'objet d'une étude plus détaillée du compensateur STATCOM, de son modèle et principe de fonctionnement, et des méthodes d'identification des courants harmoniques.
- Le cinquième et dernier chapitre est consacré aux résultats de simulation qui ont été menés dans l'environnement MATLAB/Simulink pour supprimer les courants harmoniques causés par les charges non linéaires par STATCOM. Où la bonne performance de STATCOM apparaissait comme un éliminateur de ces harmoniques, et les résultats étaient les suivants :
 - TDH avant filtrage : 21.87 %. (avant STATCOM).
 - TDH après filtrage : 3.79 %. (après STATCOM).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE

-
- [1] **ALAIN ROBERT (ELIA)**, ‘Qualité de l’électricité dans le marche libéralisé’, Séminaire organisé par le professeur Jean-Louis LILIEN, université de LIEGE, 8 décembre 2004.
- [2] **VANYA Ignatova**, THESE pour « obtenir le grade de DOCTEUR DE L’UJF Ingénieur Université Technique de Sofia » 2006.
- [3] **Mr. HADDAD SALIM**, THESE DOCTORAT « GESTION DE LA QUALITE D’ENERGIE ELECTRIQUE DANS UN RESEAU DE TRANSMISSION» université Badji Mokhtar ANNABA 2010 .
- [4] HEYDT, Electric Power Quality: A Tutorial Introduction, IEEE Computer Applications in Power, vol.11, no.1, January 1998, pp.15-19.
- [5] **VANYA Ignatova**. Méthodes d’analyse de la qualité de l’énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique.. Energie électrique. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2006. Français.
- [6] **Samir MEZIANI** ; « Etude expérimentale de la pollution harmonique dans un Réseau Electrique: Cas des lampes fluo-compactes et ordinateurs », Mémoire de Fin d’Etudes De MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2015
- [7] **HADFI Hassene**, «Etude et Commande d’un Filtre Actif Parallèle à quatre bras», mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [8] **CHALAH Samira** : «Analyse stochastique de la résultante de l’injection de courants harmoniques dans un réseau électrique», mémoire de magister, UMMTO , 2012.
- [9] **R.P.Bouichard, G.Olivier** ; « Electrotechnique : deuxième édition » ; AGMV Marquis Quebec, Canada, 2001.
- [10] Schneider Electric – Christophe PREVE, Robert JEANNOT, Guide de conception des réseaux électriques, février 1997, édition n° 6883-427/A.
- [11] **ZELLOUMA Mohammed** <<Étude et réalisation d'un filtre actif parallèle de puissance commandé par DSPACE1104>> mémoire de Master ,UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA 2019.
- [12] **H.Douar** ; « Evaluation du Cout des Pertes Générées par les Perturbations Harmoniques dans les Réseaux Electriques » ; Mémoire de Magister, Université de M’Hamed Bougara, Boumerdes, 2006.
- [13] **T.Gouraud** ; « Identification et Rejet de Perturbations Harmoniques dans des Réseaux de Distribution Electrique » ; Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale S.P.I de Nante, France, 1997.

[14] **Djaffar OULD ABDESLAM** ; « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension » Thèse de Doctorat , Université de Haute-Alsace, Années 2005 .

[15] **Ch.Prevé** ; « Les Réseaux Electriques Industriels 2 » ; Edition Hermes Science Publication, Juin 2001.

[16] **T.Deflandre, P.Mauras** ; « Les Harmoniques sur les Réseaux Electriques » ; Collection de la Direction des Etudes et Recherche d'Electricité de France, Eyrolles, ISS N°399, 1998.

[17] **KENOUCHE Arezki , KORICHI Ilyas**, «Etude d'un filtre actif parallèle», diplôme Master en Electrotechnique, Université Abderrahmane MIRA- Bejaia, 2019/2020.

[18] **Abdallah Omar ,Ouenda Latifa** << Étude des harmoniques et techniques De Commandes du filtre actif >> mémoire de Master, Université Ahmed Draïa Adrar 2018

[19] **Slimanou** ‘‘Mesure des harmoniques à l’aide d’une carte d’acquisition’’ .Rapport de stage Institut National Polytechnique de Grenoble Ecole National Supérieure D’Ingenieurs Electricien de Grenoble - Septembre 1996.

[20] **André Ducluseaux** ‘‘Tensions et courants harmoniques dans les réseaux’’ ESME France.

[21] Qualité de l’alimentation électrique la maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriel et Tertiaire. 2ieme Partie : Solutions mises en œuvre et études des cas Les cahiers de L’ingénierie EDF industrie. Janvier 1997.

[22] **H.Bessai** ; « Etude Déterministe de la Propagation des Harmoniques dans les Réseaux d’Energie Electrique » ; Mémoire de Magister, Université de Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou, 2000.

[23] **L. Zellouma**, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé. » Mémoire de Magister, Université d'Annaba 2006.

[24] **M.A.E.ALALI**,« Contribution à l’Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur-Strasbourg I, 2002.

[25] **Sahli**, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau. » Mémoire de magistère, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.

[26] **SOUFIANE BEN ALI Dr. SADDAM BOUHANAK** << étude et simulation d’un filtre actif parallèle quatre fils >> mémoire de Fin d’Étude, Université Echahid Hama Lakhder d’El-Oued 2015.

[27] **NEKKAR DJAMEL** <<contribution à l'étude des stratégies de commande des filtres actifs triphasés>>, thèse de magistrale, université Mohamed Cherif, souk- ahras, 2014.

[28] **HAMOUDI FARID** << commande robuste d'un filtre actif shunt a quatre fils>>, thèse de magistrale, université hadj lekher, batna, 2008.

[29] **KEBIRI SAMIA** << modélisation et simulation d'un filtre actif multi niveaux >> thèse magistrale, université mouloud Mammeri, tizi_ ouzou, 2009.

[30] **TADJER SID-Ahmed** <<Etude d'un système de compensation d'harmoniques en utilisant un générateur photovoltaïque <<GPV>>, thèse de magistrale, université de M'Hamed bougara-boumerdes, 2008.

[31] **Yue MA, Zhu Ling**,«An analysis and simulation of shunt hybrid active power filter» Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems 2007, Oct. 8-11, Seoul Korea, pp. 90-93, 2007.

[32] **TRABELSI Ala din ,SALEM Mouldi** <<Effets des harmoniques générées par les systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution électrique>> Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2018.

[33] **Abdusalem Mohamed Muftah**, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales», Thèse de Doctorat en génie électrique, Université Henri Poincaré, (France) 2008.

[34] **Akagi. H**, « Active Harmonic Filters» , Proceedings IEEE, Vol. 93, N° 12, pp. 2128- 2141, Décembre 2005.

[35] **BENABDELKADER Abdallah** , «FILTRAGE ACTIF SERIE Etude et implémentation », Thèse de Doctorat, université mohamed boudiaf oran, 2019.

[36] **MEKRI Fatiha**, « Commande robuste des conditionneurs actifs de puissance », Thèse de Doctorat en génie électrique, Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes, (France) 2007.

[37] **Amaia Lopez de Heredia Bermeo**, « Commande avancées des systèmes dédiés à l'amélioration de la qualité de l'énergie : de la basse tension à la moyenne tension », Thèse de Doctorat en génie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble, (France) 2006

[38] **TADJER Sid Ahmed**, "Etude d'un système de compensation des harmoniques en utilisant un générateur voltaïque GPV", Thèse de Magister en génie électrique, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, (Algérie) 2008

[39] **GHADBANE Ismail** <<Etude Et Réalisation D'un Filtre Actif Parallèle En Utilisant Différentes Stratégies De Contrôle >>, thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2016

-
- [40] **BOUKADOUM Aziz** << Contribution à l'étude des stratégies d'identification Harmoniques et de commande basées sur les techniques avancées pour les compensateurs actifs des réseaux électriques >> thèse de doctorat, université badji mokhtar annaba ,2015
- [41] **GUENDOUD Djedjiga** , BELACEL Billal << filtrage actif de puissance >> thèse de Master Académique , Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou ,2016
- [42] **GHADBANE Ismail** << Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs >> université Mohamed Kheider – Biskra ,2011
- [43] **Abdelaàli ALIBI**,“ Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systemes)”, Mémoire de Magister Soutenu au département d'électrotechnique Université de Batna, 2009.
- [44] **M.Karim SEBAA** ,“Commande intelligente pour l'amélioration de la stabilité dynamique des réseaux d'énergie électrique ”, thèse de doctorat en Electrotechnique Université des Sciences & des Technologies Houari Boumediene , USTHB, 2008.
- [45] **AMARI Abderrahmane** , « Étude de l'impact d'un dispositif STATCOM sur la performance d'une liaison HVDC alimentant un faible réseau alternatif», Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel-Abbes, 2019.
- [46] **BARAR** ; LADJICI "Introduction aux Systèmes Flexibles de Transmission en Courant Alternatif « FACTS »" projet de fin d'études école nationale polytechnique 2002.
- [47] **Rabah BENABID** «Optimisation Multi objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques» Mémoire de Magister, Université Amar Telidji, 2007.
- [48] Enrique Acha, Claudio R. Fuerte-Esquivel, Hugo Ambriz-Pérez, César Angeles-Camacho," FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley & Sons Ltd, 2004.
- [49] **ABAIDIA FATMA ZOHRA**, « Contribution du STATCOM dans l'amélioration du comportement du réseau électrique » Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, juin 2018.
- [50] **BOUGOUFFA Lazhar**, " Effets des Systèmes de Compensation FACTS sur la Protection à Maximum de Courant dans les Réseaux Électriques", Thèse de doctorat, UNIV de Batna AVRIL 2016.
- [51] **Tarik Zabaïou**, "Coordination des régulateurs conventionnels des machines synchrones et des compensateurs statiques (SVCS)", Thèse de doctorat, UNIV MONTRÉAL, DÉCEMBRE 2010

[52] **Nabil MANCER**, (Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique (FACTS)) mémoire de magistère ; université de biskra 2013.

[53] **E.S. Gholipour**, « Apport de l'UPFC à L'amélioration De La Stabilité Transitoire Des Réseaux Electriques », Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2004.

[54] **M. HAMADOU Zakaria** , «Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique» Mémoire de Magister, Université de Sétif 1, Juin 2012.

[55] Passelergue Jean-Christophe, "Interactions des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques", Thèse de doctorat, Inst NPG, 1998.

[56] E.Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E. Miller, "Power electronic control in electrical systems", Newnes 2002.

[57] **M.CRAPP**, stabilité et sauvegarde des réseaux électrique, LAVOISIER, Ed. France : Bernes science publication, 2003.

[58] **Rabah Benabid**, «Optimisation Multiobjectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques», mémoire de magister, option : Analyse, Conduite et Commande des réseaux électriques, université Amar Telidji, Laghouat, soutenu le 04/09/2007.

[59] **Amir H. Norouzi**, « Flexible AC Transmission Systems : Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC »,Thèse de magister de l'université de New Brunswick,2003

[60] XIA Jiang, "Operating Modes and Their Regulations of Voltage-sourced Converters Based FACTS Controllers", thèse de Doctorat de L'institut Polytechnique Troy New York, mars 2007.

[61] I. Papiê, "Mathematical analysis of FACTS devices based on a voltage source converter, Part1: mathematical models", electric power systems research, Elsevier science 56 (2000) 139-148.

[62] **VORAPHONPIPUT Nitus et CHATRATANA Somchai**, "STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation", transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.

[63] **Pranesh Rao, M.L.Crow**, "STATCOM control for power system voltage control application", IEEE Transaction on power system, vol 15,no 4, October 2000.

[64] **Kalyan K. Sen**, "SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Application", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998

[65] **Benras Med Amine, Laroui souleymane** << Utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif >> universite kasdi merbah ouargla ,2015

[66] **IBAZIZEN Riad , FERSAOUI Mourad** << Interactions d'un dispositif FACTS dans un réseau électrique(STATCOM) >> université Abderrahmane MIRA-Bejaia ,2015

[67] **ALLAOUI Tayeb**, "réglage robuste de L'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissance dans un réseau électrique", mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf Oran – 04/2002

[68] **BOUNAB Houria** << amelioration du transit de puissance d'un reseau electrique par l'utilisation des systemes facts (statcom) >> universite larbi ben m'hidi de oum el bouaghi ,2016

[69] **kirouani fayçal ,jalaoui yacine** << Etude et Commande d'un STATCOM >> université de Bejaia ,2013

[70] **Eskandar Gholipour Shahraki**, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy 2003.

[71] **HAMIOUD Essaid**, «Contrôle du transit de puissance dans le réseau de transport d'énergie à l'aide d'un compensateur statique (STATCOM) », Mémoire de Master ,Université de Jijel, 2018.

[72] **Laib Hichem** "Contribution à l'étude du contrôle du flux de puissance par l'UPFC " mémoire de magister, université de Batna 2009.

[73] **DJERMANE Ali** "Contrôle optimal de la tension dans un réseau électrique en utilisant les systèmes de transmission flexibles en courant alternatif (FACTS)" mémoire de Magister, Université D'oum El Bouaghi2009-2010

[74] **SEKHANE Hocine** << l'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension à travers l'incorporation des dispositifs FACTS >> mémoire de Magister, Université de Constantine 1,2013

[75] **mathieu morati** : "contribution a l'étude et au contrôle des convertisseurs multi niveaux application à la compensation des fours à arc" , thèse de Doctorat de lorraine; juin 2014.

[76] **OMEIRI AMAR** «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant », Thèse de doctorat, Université badji mokhtar annaba, 2007.

[77] **BOUCIF Abdelmalek** << Filtrage actif d'un réseau Électrique >> Mémoire de Fin d'Etudes, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.