

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

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire AbdelhafidBoussouf -Mila
Institut des Sciences et de Technologie
Département de Sciences et Technologie



N°Ref :

Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme
de MASTER
Spécialité : électromécanique

Utilisation d'un D-STATCOM pour la
compensation des énergies réactives et des tensions
dans le réseau de distribution d'énergie.

Réalisé par :

- GUERNOUNA NESRINE.**
- KHETTABI NOUR EL HOUDA.**

Soutenu devant le jury :

Mme F.MEDJANI
M^r H.GUENTRI
Mme S.DIB

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2019/2020

Remerciements

On remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Nos remerciements vont à notre promoteur « Mme.DIB », pour sa patience, sa rigueur, et sa disponibilité durant notre préparation de ce TRAVAIL.

Nous tenons à remercier tous nos enseignants et particulièrement les membres jury d'avoir accepté de juger notre travail.

Sans oublier nos collègues de promotion, en signe d'un profond respect.

Merci à vous tous

Dédicace :

Je dédie ce travail :

A mes chers parents :

« RAMDAN, OURIDA » pour leurs sacrifices, leur amour leur soutien, leur prières et leur encouragements tout au long de mes études.

A mes chers frères :

« NABIL NASSIR NASSIM NADJIB) »

Et sœurs « NADIA NAIMA »

Pour leur soutien moral.

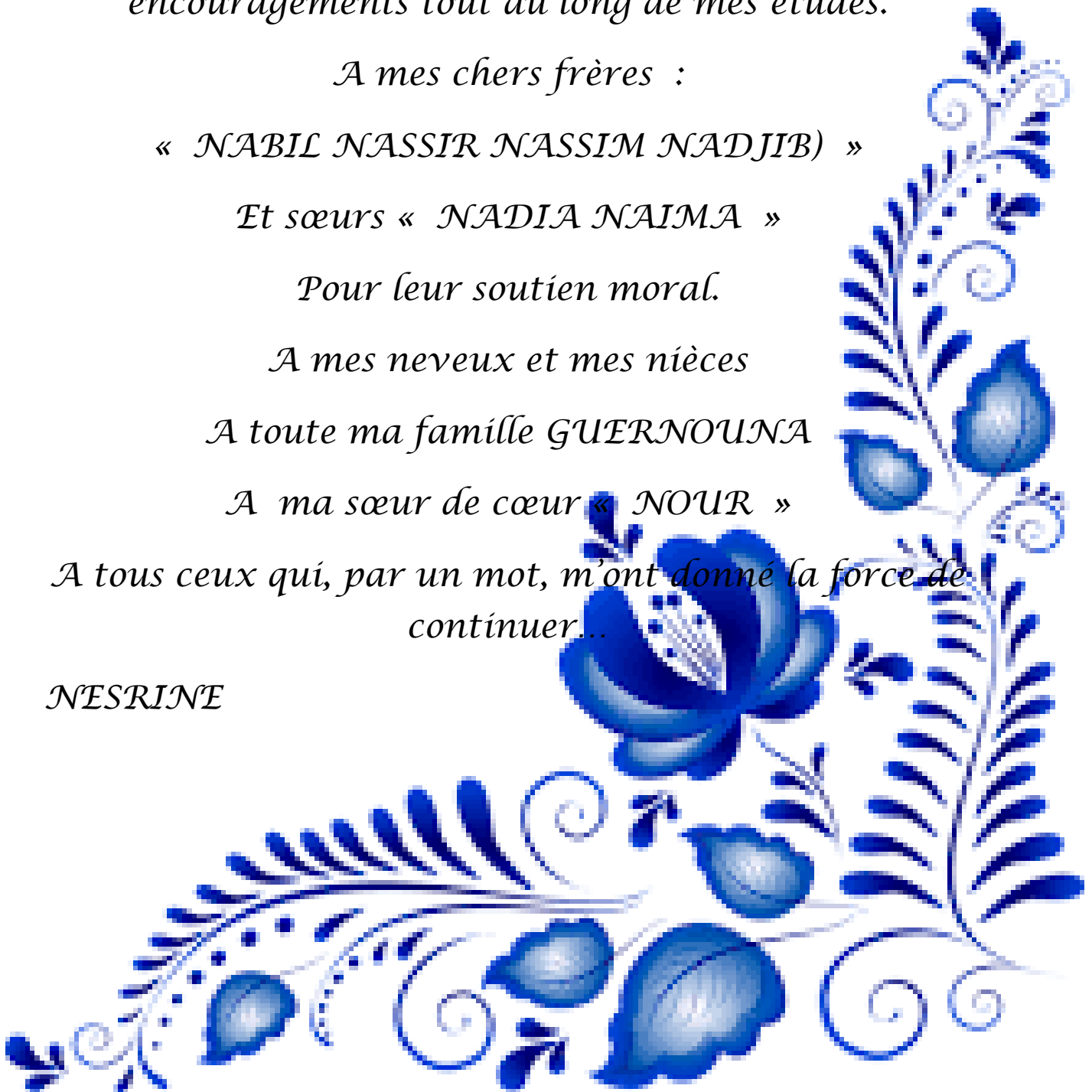
A mes neveux et mes nièces

A toute ma famille GUERNOUNA

A ma sœur de cœur « NOUR »

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer...

NESRINE



Dédicace :

Je dédie ce travail :

A mes chers parents : Mon père « ABD EL ALI »

Et ma mère « LATTAFI MASSAOUDA »

Pour leurs sacrifices, leur amour leur soutien, leur prières et leur encouragements tout au long de mes études.

A mes chers frères « SIF EDDINE, KAMAL »

Et sœurs « CHAHRA, SIHAM, HANINE »

Pour leur soutien moral.

A mes neveux et mes nièces

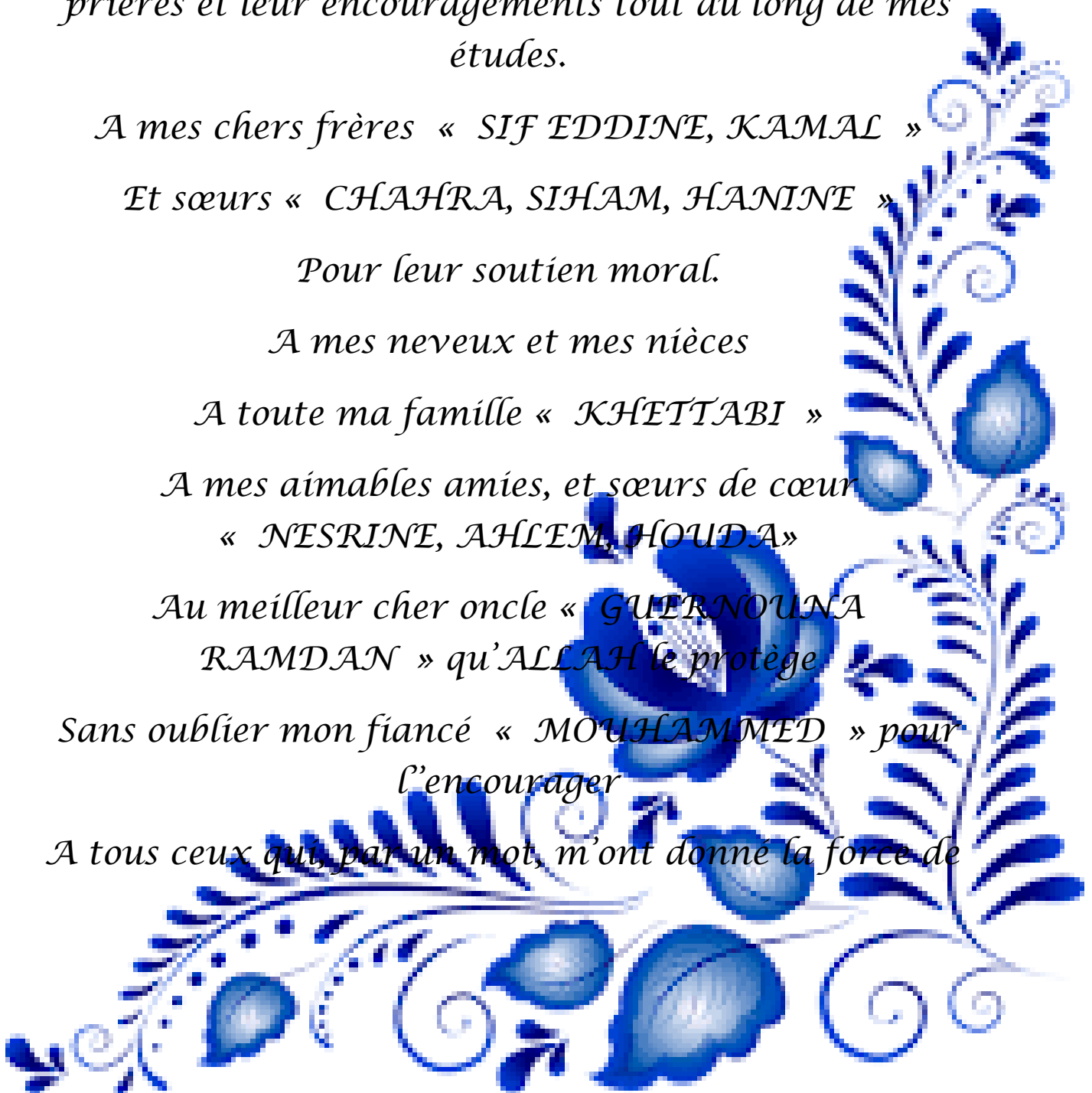
A toute ma famille « KHETTABI »

*A mes aimables amies, et sœurs de cœur
« NESRINE, AHLEM, HOUDA »*

*Au meilleur cher oncle « GUERNOUNA
RAMDAN » qu'ALLAH le protège*

*Sans oublier mon fiancé « MOUHAMMED » pour
l'encourager*

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de



Résumé

Les systèmes électriques actuels de distribution sont continuellement confrontés à des changements brutaux de la charge. Lorsque l'équilibre entre l'offre et la demande de puissance active et réactive est perdu, un problème se produit dans la compensation réactive et la qualité de l'énergie électrique au niveau du réseau de distribution. Ce problème a un impact négatif sur la source de l'énergie électrique qui, en retour, affecte les constructions industrielles, entraîne des pertes financières importantes, va provoquer un dysfonctionnement des équipements sensibles ainsi que sur les matériels basés sur une grande quantité de dispositifs électroniques tels que les contrôleurs logiques programmables et variateurs de vitesse. Le problème majeur qui est associé à un tel système stressé est l'instabilité de tension.

En raison de l'amélioration rapide de la technologie des dispositifs à semi-conducteurs de puissance affectant la haute vitesse et la haute puissance. Ces dispositifs deviennent utilisables pour la compensation de l'énergie réactive. D'où, une large gamme de contrôleurs très flexibles, à savoir le compensateur statique de distribution (D-STATCOM) qui a été émergé pour des applications au niveau du consommateur.

Notre travail traitera les types de perturbations, qui sont liés aux tensions, ainsi qu'il étudiera le compensateur actif (D-STATCOM) pour l'amélioration de la qualité d'énergie.

Abstract

Today's electrical distribution systems are continually facing drastic changes in load. When the balance between supply and demand of active and reactive power is lost, a problem arises in the reactive compensation and the quality of electric power at the level of the distribution network. This problem has a negative impact on the source of electrical energy which, in turn, affects industrial construction, causing significant financial losses, will cause malfunction of sensitive equipment as well as to materials based on large quantities of electronic devices. Such as programmable logic controllers and variable speed drives. The major problem that is associated with such a stressed system is the instability of tension.

Due to the rapid improvement in the technology of power semiconductor devices affecting high speed and high power. These devices become usable for reactive energy compensation. Hence, a wide range of very flexible controllers, namely Static Distribution Compensator (D-STATCOM) has emerged for consumer level applications.

This work will deal with the types of disturbances, which are related to voltages, as well as studying the active compensator (D-STATCOM).

ملخص

تواجه أنظمة التوزيع الكهربائي اليوم باستمرار تغييرات مفاجئة في الحمل. عندما يفقد التوازن بين العرض والطلب للطاقة النشطة والمتفاعلة، تنشأ مشكلة في التعويض التفاعلي ونوعية الطاقة الكهربائية على مستوى شبكة التوزيع. هذه المشكلة لها تأثير سلبي على مصدر الطاقة الكهربائية والتي بدورها تؤثر على البناء الصناعي وتتسبب في خسائر مالية كبيرة وتؤدي إلى خلل في المعدات الحساسة وكذلك المواد التي تعتمد على كميات كبيرة من الأجهزة الإلكترونية. مثل وحدات التحكم المنطقية القابلة للبرمجة ومحركات الأقراص المتغيرة السرعة. المشكلة الرئيسية المرتبطة بهذا النظام المجهد هي عدم استقرار التوتر. بسبب التحسن السريع في تكنولوجيا أجهزة أشباه موصلات الطاقة التي تؤثر على السرعة العالية والطاقة العالية. تصبح هذه الأجهزة قابلة للاستخدام لتعويض الطاقة التفاعلية. ومن ثم، ظهرت مجموعة واسعة من وحدات التحكم المرنة للغاية، مثل معوض التوزيع الثابت (D-STATCOM) للتطبيقات على مستوى المستهلك. سيتعامل هذا العمل مع أنواع الاضطرابات التي تتعلق بالجهد وكذلك دراسة المعوض النشط (D-STATCOM).

Nomenclature

F A P : Filtre actif parallèle.

F A S : Filtre actif série.

UPQC : Unified Power Quality Conditioner

MLI : Modulation en largeur d'impulsions

PI : Régulateur proportionnel intégral

THD : Total Harmonic distortion.

P : la puissance active

Q : la puissance réactive

S : la puissance apparente

Fp : Le facteur de puissance

GTO: Gate turn off thyristor.

IGBT: Insolated gate bipolar transistor

FACTS: Flexible alternatif curant transmission systems

SPS: Static Phase Shifter

IGCT: Insulated Gate Commutated Thyristors

D-STATCOM: distributeur Static Synchronous Compensator

SSSC: Static Synchronous Series Compensator

TCSR: Thyristor Switched Serie Reactor

TCSC: Thyristor-Controlled Series Capacitor.

DVR : Dynamic Voltage Restorer

UPFC: Unified Power Flow Controller

VSC: Voltage Source Converter

Vs : Tension du jeu de barre de génération (sending voltage).

Vr : Tension du jeu de barre de charge (receiving voltage).

Ps : Puissance active fournie par la source

Qs : Puissance réactive fournie par la source

Pr : Puissance active demandée par la charge

Qr : Puissance réactive demandée par la charge

Pl : Puissance active transportée par la ligne

Ql : Puissance réactive transportée par la ligne

Δ : Angle de charge entre Vs et Vr

R : Résistance de la ligne de transport

X : réactance de la ligne de transport

Θ : Déphasage du courant de al ligne

Vsh : Tension (shunt) injectée par le D-STATCOM

Ish : Courant (shunt) injecté par le D-STATCOM

Rsh : Résistance du transformateur de couplage shunt du D-STATCOM

Xsh : Réactance du transformateur de couplage shunt du D-STATCOM

Psh : Puissance active délivrée par le D-STATCOM
Qsh : Puissance réactive délivrée par le D-STATCOM
Vse : Tension (série) injecté par le SSSC
Ise : Courant (série) injecté par le D-STATCOM
Udc : Tension continu aux bornes du condensateur
Idc : Courant dans le circuit continu
d (indice) : la composante sur l'axe d du repère d-q
q (indice) : la composante sur l'axe q du repère d-q
pu (indice) : la grandeur en unité relative (grandeur réduite)

h : Rang de l'harmonique

is: courant de la source

if : Courant de filtre

ich : Courant de charge

iref Courant de référence

Rf : Résistance de filtre de sortie

Lf : Inductance de filtre de sortie

Iinj: Courant harmonique injecté

L : Inductance

C : Capacité

R : Résistance

V_c: tension continue du condensateur de stockage d'énergie.

U_p: amplitude de la porteuse

LISTE DES FIGURES

Chapitre I: les perturbations dans le réseau électrique.

Figure I.1: Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.....	4
Figure I.2: Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé.....	5
Figure I.3: Spectre des harmoniques.....	6

Chapitre II : les solutions de dépollution et la compensation des harmoniques.

Figure II.1: Différents types de filtres harmoniques passifs.....	13
Figure II.2 : Combinaison de filtres passifs pour redresseur à thyristors.....	14
Figure II.3: Filtre passif résonant.....	14
Figure II.4: Filtre passif amorti.....	15
Figure II.5: Filtre passif parallèle anti-résonant.....	15
Figure II.6: Filtre actif parallèle avec une charge non-linéaire.....	17
Figure II.7: FAP raccordé à l'entrée d'une charge non-linéaire.....	19
Figure II.8: Structure générale du filtre actif parallèle.....	20
Figure II.9: Onduleur de tension triphasé.....	20
Figure II.10: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur dans le plan biphasé (α, β)..	23
Figure II.11 : Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T.....	26
Figure II.12: Deux types de filtrage de p et q.....	30
Figure II.13: Diagramme de Bode du filtre passe-bas du deuxième ordre.....	30
Figure II.14: Algorithme p-q d'identification des courants harmoniques de référence.....	32
Figure II.15: Boucle de régulation de la tension continue.....	33
Figure II.16: contrôle par hystérésis.....	34
Figure II.17: Principe de commande des courants par MLI.....	35
Figure II.18 : Schéma de la régulation des cibles.....	36
Figure II.19: Schéma simplifié de régulation des courants du F.A.P.....	36
Figure II.20 : Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques.....	39
Figure II.21: Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation du courant harmonique et de la puissance réactive.....	40
Figure II.22: Rapport de puissances pour la compensation des courants harmoniques et déséquilibrés et de la puissance réactive.....	41

Figure II.23: Filtre actif série.....	43
Figure II.24: Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC).....	44
Figure II.25: Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.....	44
Figure II.26: Filtre actif série avec filtre passif parallèle.....	45
Figure II.27: Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	45
Figure II.28: Principaux dispositifs des FACTS.....	46
Figure II.29: structure de TCR.....	47
Figure II.30: structure de TSC.....	47
Figure II.31: Schéma équivalent d'un SVC.....	48
Figure II.32: schéma du SVC avec TCBR.....	48
Figure II.33: STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent.....	49
Figure II.34: Puissance transitée entre deux réseaux.....	51
Chapitre III : Etude et modélisation d'un D-STATCOM.	
Figure III.1: Structure de base d'un D-STATCOM couplé au réseau.....	54
Figure III.2: Commande d'un STATCOM.....	55
Figure III.3: Schéma du STATCOM couplé au réseau électrique.....	55
Figure III.4: Courbes simulées courant et tension en mode capacitif.....	57
Figure III.5: Courbes simulées courant et tension en mode inductif.....	57
Figure III.6 : Q_s en fonction de P_s pour différentes valeurs de V_{sh}	58
Figure III.7 : P_s , Q_s , P_{sh} et Q_{sh} en fonction de V_{sh}	59
Figure III.8: Schéma équivalent d'un D- STATCOM connecté au réseau.....	60
Figure III.9: Passage du repère (α , β) vers le repère (d , q).....	61
Figure III.10: Schéma équivalent du D-STATCOM avec Circuit DC.....	62
Figure III.11: Identification des Courants de Référence.....	64
Figure III.12: Transfert du I_{shd} en fonction de X_1	65
Figure III.13: Transfert I_{shq} en fonction de X_2	66
Figure III.14: Régulation et découplage de I_{shd}	66
Figure III.15: Schéma de Régulation du D-STATCOM (Watt-Var découplée).....	67
Figure III.16: Schéma bloc de la Régulation PI des courants du D-STATCOM.....	67
Figure III.17: Régulation de la tension continue U_{dc}	68
Chapitre IV : Résultat de simulation d'un D-STATCOM.	
Figure IV.1 : D-STATCOM avec une charge variable.....	69
Figure IV.2 : Système modélisé dans Simulink.....	70
Figure IV.3: Simulation de la tension de la charge en (p.u) sans D-STATCOM, cas chute de tension.....	71
Figure IV.4: Simulation de la tension de la charge en (p.u) avec D-STATCOM, cas chute de tension.....	71
Figure IV.5 : Valeur efficace de la tension de la charge en (p.u) avec et sans D-STATCOM.....	71
Figure IV.6: Puissances actives écoulées entre les parties de système durant la chute de tension.....	72

Figure IV.7: Puissances réactives écoulées entre les parties de système durant la chute de tension.....	72
Figure IV.8 : Valeur du facteur de puissance à côté de la charge avec et sans D- STATCOM.....	72
Figure IV.9: Simulation de la tension de la charge en (p.u) sans D-STATCOM, cas surtension.....	73
Figure IV.10: Simulation de la tension de la charge en (p.u) avec D-STATCOM, cas surtension.....	73
Figure IV.11: Valeur efficace de la tension de la charge en (p.u) avec et sans D-STATCOM.....	73
Figure IV.12: Puissances actives écoulées entre les parties de système durant la surtension.....	74
Figure IV.13: Puissances réactives écoulées entre les parties de système durant la surtension.....	74
Figure IV.14: Valeur du facteur de puissance à côté de la charge avec et sans D-STATCOM.....	74
Figure IV.15 : Le courant de source durant la compensation de chute de tension.....	74
Figure IV.16: écoulement des puissances durant la chute de tension.....	75
Figure IV.17: écoulement des puissances durant la surtension.....	76



LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : les perturbations dans le réseau électrique.

Tableau I.1: La norme IEEE sdt 519-1992 pour les tensions de 120V à 69kV..... 11

Tableau I.2: Les limites de la distorsion harmonique de la tension (IEEE sdt 519-1992)..... 11

Chapitre II : les solutions de dépollution et la compensation des harmoniques.

Tableau II.1: Tensions générées par l'onduleur..... 22

Tableau II.2: Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre passif shunt..... 42

Tableau II.3: Différentes des niveaux ascendant de contribution entre les FACTS..... 50

Tableau II.4: Le rôle des différents dispositifs FACTS..... 50

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Les perturbations dans le réseau électrique	
I.1 Introduction	2
I.2 Qualité de l'énergie électrique.....	2
I.3 Origine des harmoniques	4
I.4 Effets et conséquences des harmoniques.....	6
I.4.1 Effets instantanés	6
I.4.2 Effets à terme	6
I.5 Caractérisation et normes des perturbations harmoniques.....	7
I.5.1 Caractérisation	7
I.5.1.1 Le taux de distorsion harmonique.....	7
I.5.1.2 Facteur de puissance	8
I.5.2 les normes.....	9
I.6 conclusion	11
Chapitre II : solutions de dépollution et compensation des harmoniques	
II.1 Introduction	12
II.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques.....	12
II.2.1 Solutions traditionnelles de dépollution	12
II.2.1.1 Filtrage passif	13
II.2.1.1.1 Filtre passif résonant.....	14
II.2.1.1.2 Filtre passif amorti	15
II.2.1.1.3 Phénomène de l'anti-résonance.....	15
II.2.2 Solutions de dépollutions modernes	16
II.2.2.1 Redresseur à MLI	16
II.2.2.2 Filtres actifs	16
II.2.2.2.1 Filtre actif parallèle (FAP)	17
II.2.2.2.2 Filtre actif série (FAS)	43
II.2.2.2.3 Filtres actifs parallèle-série combinés (UPQC)	44
II.2.2.2.4 Filtres hybrides actifs et passifs	44
II.2.2.3 Les FACTS	45
II.2.2.3.1 Définition des FACTS	45
II.2.2.3.2 Différentes catégories des FACTS.....	46
II.2.2.3.3 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques.....	49
II.2.2.3.4 Fonctionnement des FACTS	51
II.3. Conclusion.....	52
Chapitre III : Etude de modélisation d'un D-STATCOM	
III.1 Introduction.....	53
III.2 Principe de fonctionnement du D-STATCOM.....	54
III.3 Effet de la compensation shunt (D-STATCOM) sur le réseau électrique.....	57
III.4 Modélisation d'un D-STATCOM	59
III.4.1 Modèle Mathématique Simplifié	59

III.4 .2 Modèle mathématique en considérant le circuit DC	61
III.5 Contrôle du D- STATCOM	63
III.5.1 Détermination des Références.....	63
III.5.2 Méthode Watt-Var découplée	64
III.5.3 Régulateur PI avec compensation de pôles	66
III.5.4 Régulation de la tension continue U_{dc}	67
III.6 Conclusion	68

CHAPITRE IV : résultats de simulation d'un D-STATCOM

IV .1 Introduction	69
IV .2 Résultats du Simulation	70
IV .3 Discussions	75
IV .4 Conclusion	76
Conclusion générale.....	77

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Introduction générale :

Plus le réseau est grand, plus il devient complexe et difficile à contrôler. Ce système qui doit conduire de grandes quantités d'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats subit plusieurs problèmes tels que: le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux de tension entre différentes parties du réseau...etc. Par conséquent le potentiel de l'interconnexion du réseau ne sera pas exploitable.

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 exécutée à une fréquence élevée par rapport aux dispositifs à base d'interrupteurs statiques (semi- conducteurs).

Plusieurs techniques de compensation traditionnelles du réseau ont été utilisées, tels que la technique de compensation shunt, et la compensation série. Dans le but d'améliorer la capacité des lignes de distribution, les chercheurs ont développé des dispositifs capables de diminuer les perturbations présentées dans les réseaux électriques. Ces dispositifs utilisés par l'industrie sont les FACTS (Flexible Alternatif Curent Transmission Systems).

Le travail de ce mémoire concerne, en particulier, le contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de distribution d'énergie électrique au moyen d'un D-STATCOM (Distribution-Static Compensateur).

Pour atteindre ces objectifs de recherche, ce mémoire est organisé en quatre chapitres:

- Le premier chapitre sera consacré à la description des différentes perturbations en courant et en tension.
- Dans le second chapitre, nous présenterons les solutions traditionnelles et modernes de dépollution.
- L'étude et la modélisation du D-STATCOM fera l'objet du troisième chapitre.
- Le quatrième chapitre sera une présentation des résultats de simulation d'un D-STATCOM par MATLAB/Simulink. Et enfin, on termine notre travail par une conclusion.

Chapitre I : Les perturbations dans le réseau électrique

I.1 Introduction:

L'énergie électrique est produite sous forme de système de tensions triphasées, sinusoïdales et équilibrées, et dont la fréquence est de 50 ou 60 Hz. Cependant, la qualité de l'onde de ces tensions se retrouve dégradée dans les réseaux électriques à cause de différentes perturbations. La source des perturbations est, soit une anomalie du côté du réseau électrique, soit la nature de fonctionnement des charges non-linéaires. D'ailleurs, L'utilisation accrue, dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoque de plus en plus des problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques [1], tels que les distorsions harmoniques, les déséquilibres, le papillotement, les coupures brèves, les creux de tension, les surtensions temporaires, et les surtensions transitoires. En outre, ces perturbations peuvent générer des nuisances, pannes ou des dégâts par l'affectation d'un ou plusieurs paramètres de la tension du réseau électrique, suivants: la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde.

Le développement dans les applications en électronique a mené à la prolifération d'équipements modernes plus sensibles aux perturbations de la tension [2]. Par conséquent, Afin d'éviter le dysfonctionnement, voir la destruction de ces équipements et aussi des composants du réseau électrique, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations et de chercher les solutions adéquates pour les supprimer.

Nous commencerons ce chapitre par un exposé des principaux défauts affectant la tension et le courant du réseau électrique. Nous parlerons également de leurs origines, des conséquences matérielles et des normes internationales imposées aux utilisateurs.

I.2 Qualité de l'énergie électrique:

La qualité de l'énergie est une notion assez large qui recouvre à la fois la qualité de la fourniture électrique, la qualité de l'onde de tension et la qualité des courants. Cependant, l'expression " Qualité de l'énergie " s'entend généralement dans une acception plus large : elle recouvre aussi le concept de "continuité de la tension" (ou "fiabilité de l'alimentation"). L'équation correspondante à l'interprétation la plus correcte est donc :

Qualité de l'énergie électrique = Continuité de la tension + Qualité de la Tension

La notion globale de qualité de l'énergie peut être décomposée en deux axes: la continuité de la tension et de la qualité de la tension.

• **Continuité de la tension:** La continuité de l'alimentation en W et industriels, de la qualité de leurs matériels et des bonnes pratiques de maintenance et d'exploitation. La continuité dépend à la fois des choix techniques et des investissements réalisés pour assurer l'alimentation d'un point particulier ou d'une zone donnée. C'est donc le résultat d'un compromis « technico-économique », explicite ou implicite. La continuité de l'alimentation est l'un des éléments importants de la qualité de la fourniture perçue par les clients : un client doit pouvoir compter sur son alimentation avec la puissance et aux instants prévus par son contrat. La continuité de l'alimentation se mesure par le nombre de coupures d'alimentation d'un point donné —on parle simplement de « coupure » —par unité de temps. Dans les normes, deux types de coupures sont définies: les coupures dites longues, de Durée supérieure ou égale à 3min, et les coupures dites brèves, de durée inférieure à 3min. –Qualité de la tension: Sauf exception, les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50HZ ou de 60HZ. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont les suivants:

- La fréquence,
- L'amplitude des trois tensions,
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde
- La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

• **La qualité de la tension :** peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux sujétions liées à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations:

• **Fluctuations de la fréquence à 50 Hz :** elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles

Variations de l'amplitude de la tension: il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension se présentant souvent sous forme d'à-coups brusques.

• **Dissymétrie du système triphasé :** que l'on appelle déséquilibre ;

• **Modification de la forme d'onde :** cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des

harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

On peut, en plus, mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois l'amplitude et la forme d'onde : ce sont les variations transitoires d'amplitudes dont la durée est inférieure à 10 ms.

I.3 Origine des harmoniques :

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. La figure I.1 illustre un exemple de forme d'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50Hz, trois harmoniques de rang impair 5, 7 et 11.

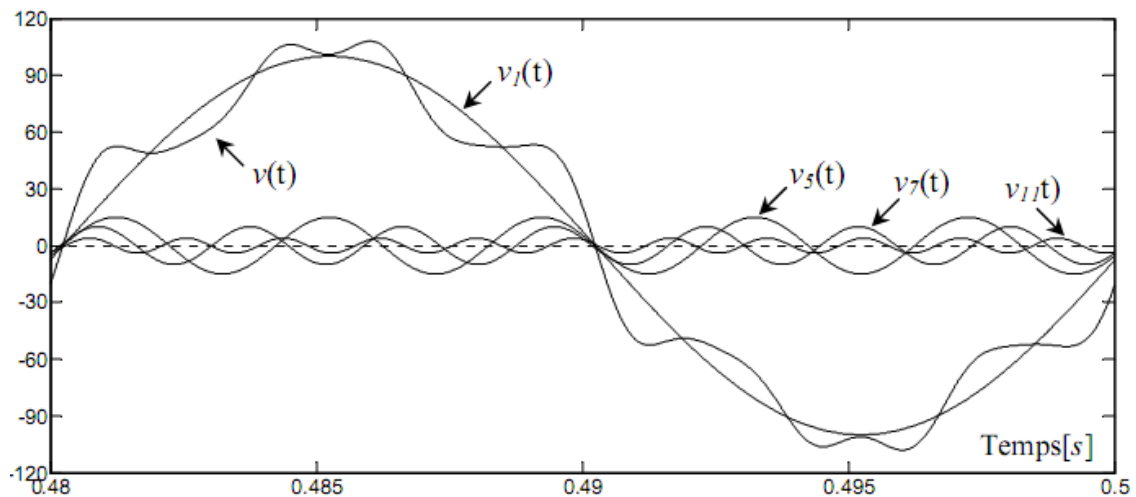


Figure I.1 : Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.

La cause principale de l'existence des harmoniques de tension, comme on le montrera ultérieurement, est l'injection dans le réseau des courants non sinusoïdaux par des charges non linéaires. Il s'agit alors de sources génératrices de courants harmoniques qui peuvent être classées en deux types:

a- Sources harmoniques identifiables :

Les équipements dotés de dispositifs à base d'électronique de puissance, notamment les redresseurs et les cycloconvertisseurs de puissances importantes, installés sur les réseaux haute et moyenne tension sont typiquement des sources harmoniques identifiables. Avec ce type de charge non linéaire, le distributeur d'énergie est capable d'identifier le point d'injection des

harmoniques et de quantifier la perturbation provoquée. Dans ce cas, c'est l'utilisateur qui doit se procurer les moyens nécessaires afin de réduire cette perturbation au dessous du seuil exigé par le distributeur de l'énergie sous peine d'être pénalisé.

b- Sources harmoniques non identifiables :

Ce type de générateur de courants harmoniques est principalement représenté par les appareils utilisés dans les domaines électrodomestiques ou tertiaires tels que les téléviseurs et les micro-ordinateurs. Vu leur très large diffusion, ces équipements comportant souvent un redresseur monophasé à diodes avec un condensateur de lissage, prélèvent des courants harmoniques non négligeables. Dans ce cas, il est de la responsabilité du distributeur de l'énergie électrique d'empêcher la propagation de la perturbation harmonique sur le réseau puisque individuellement chaque utilisateur génère un faible taux d'harmonique. A titre d'exemple, la figure I.2 ci-dessous montre l'allure du courant absorbé par un ordinateur. Il est de forme impulsionnelle, riche en harmoniques et possède un taux de distorsion inadmissible [3].

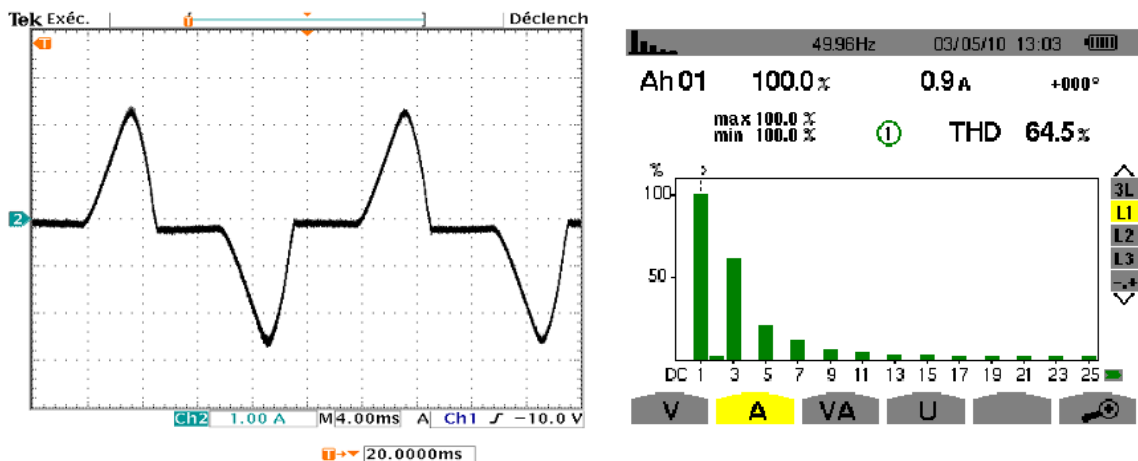


Figure I.2 : Forme d'onde du courant absorbé par un ordinateur et spectre associé.

✓ Inter et infra harmoniques :

- **Inter harmoniques :** Ce sont des composantes sinusoïdales avec des fréquences qui ne sont pas des fréquences multiples entières de celle de la fondamentale.
- **Infra harmoniques :** Ce sont des composantes qui sont à des fréquences inférieures à celle de la fondamentale.

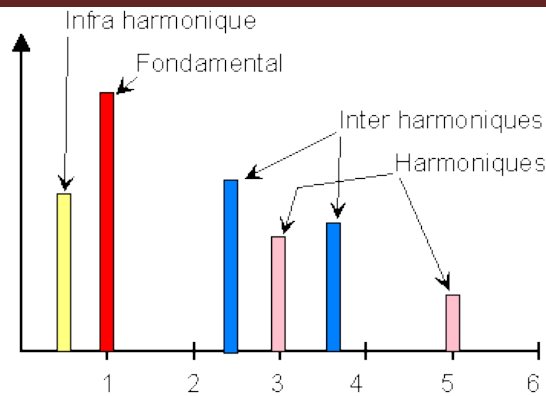


Figure I.3 : Spectre des harmoniques.

I.4 Effets et conséquences des harmoniques :

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiées, on distingue deux sortes d'effets possibles: Les effets instantanés et Les effets à terme:

I.4.1 Effets instantanés:

- **Phénomène de résonance entre l'impédance du réseau et les condensateurs de compensation :** Le plus spectaculaire de ce type d'effet est la destruction d'équipement.
- **Interférence avec les réseaux de télécommunication :** Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de télécommunication peut induire dans ces derniers des bruits importants.
- **Troubles fonctionnels liés à la déformation de l'onde de tension tels que :** couples pulsatoires sur les moteurs d'entraînement, vibrations, erreurs des systèmes de mesures, perte de la détection du passage au zéro de tension pour les dispositifs de régulation.
- **Vibrations et bruits :** Les courants harmoniques génèrent également des vibrations et des bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (transformateurs, inductances et machines tournantes).

I.4.2 Effets à terme :

Les effets à terme se traduisent par une fatigue mécanique prématurée (due aux vibrations) des matériaux et des lignes. Principalement, l'effet à terme, c'est l'échauffement.

- **Echauffement des câbles et des équipements :** Ces effets peuvent être à moyen terme (de quelques secondes à quelques heures) ou à long terme (de quelques heures à quelques années) et concernent les câbles qui peuvent être le siège du sur échauffement comme le neutre et les matériels bobinés (transformateurs ou moteurs).

➤ **Echauffement des condensateurs** : L'échauffement est causé par les pertes dans le diélectrique. Les condensateurs sont sensibles à la présence d'harmoniques. Ces échauffements peuvent conduire au claquage.

➤ **Echauffement dû aux pertes supplémentaires des machines et des transformateurs** : Echauffement causé par les pertes dans le stator des machines et principalement dans leurs circuits rotoriques, par effet Joule dans les enroulements, accentués par l'effet de peau et des pertes par hystérésis et courants de Foucault dans les circuits magnétiques.

I.5 Caractérisation et normes des perturbations harmoniques :

I.5.1 Caractérisation :

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension ou le courant. Ce critère est employé pour quantifier le contenu harmonique d'un signal distordu. Il mesure également le degré de déformation du signal apporté par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale. Il va de soit que la répartition spectrale complète généralement l'information sur le THD en indiquant le rang des harmoniques dominants. Pour chiffrer la consommation de puissance réactive le facteur de puissance (FP) est généralement utilisé [2].

Le courant absorbé par une charge non linéaire (convertisseur statique) n'est pas sinusoïdal, mais sa valeur moyenne sur chaque phase est souvent nulle. Dans ce cas, la décomposition en série de Fourier du courant donne :

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_h (\sin h\omega_1 t + \alpha_h) \quad (I.1)$$

Avec : I_1, I_h : valeur efficace du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,

α_1, α_h : Déphasage du courant fondamental et du courant harmonique de rang h ,

ω_1 : Pulsation fondamentale du réseau.

I.5.1.1 Le taux de distorsion harmoniques:

La perturbation harmonique est généralement caractérisée par le taux de distorsion harmonique (THD) défini pour la tension et le courant. Cette notion permet de caractériser la déformation apportée par les harmoniques par rapport à une onde sinusoïdale [6].

➤ **Taux harmonique de rang h** :

$$G_h = \frac{C_h}{C_1} \quad (I.2)$$

Où C_h représente la valeur efficace de la composante harmonique de rang h , C_1 représente la valeur efficace de la composante fondamentale.

➤ **Taux global de distorsion harmonique** :

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \frac{C_h^2}{C_1^2}} \quad (\text{I. 3})$$

Deux taux globaux de distorsion harmonique sont distingués :

⇒ le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD_I

⇒ le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD_V

Le THD_I s'exprime pratiquement sous la forme [6] :

$$\text{THD}_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} I_h^2}}{I_1} * 100 \quad (\text{I. 4})$$

Et le THD_V s'exprime pratiquement sous la forme [6] :

$$\text{THD}_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} V_h^2}}{V_1} * 100 \quad (\text{I. 5})$$

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

$$\text{THD}_V = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{V_h}{V_1} \right]^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left[\frac{|Z_{hcc}| I_h}{V_1} \right]^2} \quad (\text{I. 6})$$

Ainsi, plus les impédances Z_{hcc} ($h > 1$) sont faibles, plus la distorsion en tension est faible. En général les harmoniques pris en compte dans un réseau électrique sont inférieurs à 2500 Hz. Les harmoniques de fréquence plus élevée sont fortement atténués par l'effet de peau et par la présence des inductances de lignes. De plus les appareils générant des harmoniques ont, en grande majorité, un spectre d'émission inférieur à 2500 Hz, c'est la raison pour laquelle le domaine d'étude des harmoniques s'étend de 100 à 2500 Hz, c'est-à-dire des rangs 2 à 50 [4].

I.5.1.2 Facteur de puissance :

Pour la transmission efficace de l'énergie d'une source à une charge, on doit maximiser la puissance moyenne, tout en réduisant au minimum le courant et la tension (et par conséquent réduisant au minimum les pertes). Le facteur de puissance (F_p) est un indice qui reflète l'efficacité de la transmission

Chapitre I Les perturbations dans le réseau électrique

de l'énergie d'une source à une charge. Il est égal au quotient de la puissance active P par la puissance apparente S [14]:

$$\text{Facteur de puissance} = \frac{\text{(puissance active)}}{\text{(tension efficace) (courant efficace)}}$$
$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eff} I_{eff}} \quad (I.7)$$

En présence des courants harmoniques avec une tension sinusoïdale ; on distingue :

➤ **Facteur de déphasage (facteur de Puissance de Déplacement):** C'est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente de l'onde fondamentale.

$$Fp_{dép} = \frac{P_1}{V_{1eff} I_{1eff}} \quad (I.8)$$

➤ **Facteur de Puissance de Distorsion :** C'est le rapport entre le courant fondamental et le courant total

$$Fp_{dis} = I_1/I_T = \frac{1}{\sqrt{1+(THD_I)^2}} \quad (I.9)$$

➤ **Facteur de puissance (total):** est le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S.

$$Fp_{tot} = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eff} I_{eff}} \quad (I.10)$$

Le Facteur de puissance (total) peut aussi être exprimé :

$$Fp_{tot} = Fp_{dis} \times Fp_{dép} \quad (I.11)$$

Afin d'éviter les désagréments causés par la présence de courants et de tensions harmoniques dans le réseau, des normes sont imposées aux utilisateurs.

1.5.2 Les normes:

Afin de limiter l'influence d'une charge polluante sur les différentes charges connectées au réseau, et en même temps pour limiter l'influence des charges sur le réseau de façon à éviter la modification de ses caractéristiques, des normes sur la qualité de l'énergie ont été développées.

La norme principale, IEEE

519: 1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems, détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique. Elle impose également les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et

Chapitre I Les perturbations dans le réseau électrique

de distorsion harmonique totale sur le réseau. Cette norme limite la distorsion harmonique (THD) du courant des réseaux <69kV à 5% [5].

- **IEEE sdt 519-1992 :**

Cette norme reconnue sous le nom “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems” est utilisée principalement aux Etats-Unis, détermine les procédures pour contrôler les harmoniques présentes sur le réseau électrique ainsi que les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et la distorsion harmonique totale sur le réseau. Elle identifie les sources principales des harmoniques dans le réseau électrique. Les sources harmoniques décrites dans cette norme incluent les convertisseurs de puissance, les fours à arc, les compensateurs statiques des Vars, les onduleurs, les cycloconvertisseurs, les alimentations à découpage et la commande MLI. Elle décrit également la réaction du système à la présence des harmoniques [6].

Cette norme décrit également les méthodes d'analyse et les conditions de mesure pour évaluer les niveaux de la déformation harmonique dans le réseau électrique. Il récapitule les méthodes de calcul des courants harmoniques, les réponses fréquentielles du réseau, et la modélisation des divers composants du réseau électrique pour l'analyse de la propagation harmonique. Les limites admissibles des harmoniques du courant sont regroupées en trois groupes distincts selon la tension de raccordement comme suit :

- systèmes de distribution, avec des tensions de 120V à 69kV
- Systèmes de sub transmission, avec des tensions de 69kV à 161kV
- Systèmes de transmission, avec des tensions du raccordement de plus de 161kV.

Le premier groupe est celui de notre intérêt, il décrit plusieurs catégories dépendantes du rapport entre la puissance du court-circuit de la source de puissance au point de raccordement (PCC) et la puissance nominale de la charge (S_{CC}/S_N ou I_{CC}/I_N).

Les limites des harmoniques de rang pair sont égales à 25% de celles des harmoniques impaires.

Le TDD (total demand distortion $TDD = THD_1$ si on prend $I_N = I_1$) est défini comme le rapport entre les courants harmoniques et le courant nominal de la charge (le fondamental seulement I_1).

Les limites des tensions harmoniques sont données par le Tableau I.1.

Tableau I.1: La norme IEEE sdt 519-1992 pour les tensions de 120V à 69kV.

Limites des courants harmoniques (I_h) en % du courant nominal (I_N)											
Rang harmonique individuel											
I_{cc}/I_N	< 11		$11 \leq h < 17$		$17 \leq h < 23$		$23 \leq h < 35$		$35 \leq h$		TDD
	Impair	Pair	Impair	Pair	Impair	Pair	Impair	Pair	Impair	Pair	
< 20	4.0	1.0	2.0	0.5	1.5	0.375	0.6	0.15	0.3	0.075	5.0
$20 < 50$	7.0	1.75	3.5	0.875	2.5	0.625	1.0	0.25	0.5	0.125	8.0
$50 < 100$	10.0	2.5	4.5	1.125	4.0	1.0	1.5	0.375	0.7	0.175	12.0
$100 < 1000$	12.0	3.0	5.5	1.375	5.0	1.25	2.0	0.5	1.0	0.25	15.0
> 1000	15.0	3.75	7.0	1.75	6.0	1.5	2.5	0.625	1.4	0.35	20.0

Tableau I.2: Les limites de la distorsion harmonique de la tension (IEEE sdt 519-1992).

Tension au point de raccordement (PCC)	Distorsion Harmonique Individuelle (%)	THD _V (%)
$V_N \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V_N \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V_N > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

I.6 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons exposé le problème des harmoniques et des perturbations affectant la tension du réseau et dégradant ainsi la qualité de l'énergie électrique. Après avoir recensé les origines et les conséquences néfastes des harmoniques sur les différents éléments constitutifs du réseau et sur les récepteurs raccordés à un réseau pollué, Nous discuterons ensuite des solutions traditionnelles et modernes utilisées pour pallier aux problèmes liés aux perturbations des réseaux électriques.

Chapitre II : solutions de dépollution et compensation des harmoniques

II.1 Introduction :

Plusieurs solutions, basées sur le filtrage d'harmoniques, ont été envisagées pour limiter la propagation des harmoniques dans le réseau électrique. La solution la plus classique et largement utilisée dans l'industrie consiste à utiliser des filtres passifs. Plus tard, afin de surmonter les limitations des filtres passifs, les filtres actifs ont été conçus et commercialisés.

Ces dernières années, la combinaison de filtres passifs et actifs, appelée filtres actifs hybrides, est devenue de plus en plus répandue grâce à ses avantages par rapport aux filtres passifs ou actifs. Cependant, pour l'instant, ces filtres hybrides ont eu une pénétration très limitée sur le marché.

Dans ce qui suit nous étudierons les différentes techniques possibles de dépollution harmonique, traditionnelles et modernes pour réduire les harmoniques et d'améliorer la qualité de l'énergie.

II.2 Solutions de dépollution des réseaux électriques :

Des solutions de dépollution des réseaux électriques peuvent être mises en œuvre afin de corriger un dysfonctionnement dans une installation, d'agir de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes, de mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie et de réduire la facture énergétique. On peut regrouper les solutions visant à réduire les perturbations électriques en deux groupes : les solutions traditionnelles et les solutions modernes.

II.2.1 Solutions traditionnelles de dépollution :

Ce sont des techniques qui doivent être connues par tous les électriciens. Elles apportent une solution facile et rapide pour certains cas de perturbations bien localisées et utilisent des composants passifs (inductances, condensateurs, transformateurs) et/ou des branchements qui modifient le schéma de l'installation. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

- l'augmentation de la puissance de court-circuit du réseau et l'utilisation de convertisseurs peu polluants qui ont pour effet de diminuer la distorsion harmonique.
- l'utilisation de dispositifs de filtrage pour réduire la propagation des harmoniques produits par des charges non linéaires [69].

Vue leur importance pratique, nous nous limiterons dans ce qui suit à détailler uniquement les filtres passifs.

II.2.1.1 Filtrage passif :

En général, les filtres d'harmoniques sont connectés en parallèle avec les charges injectant des courants harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électrique, etc.). L'association d'éléments capacitifs et inductifs en parallèle avec la charge polluante permet d'obtenir une résonance série accordée sur les rangs harmoniques à éliminer. Différents types possibles de filtres passif destinés à compenser les courants harmoniques sont représentés sur la figure II.1.

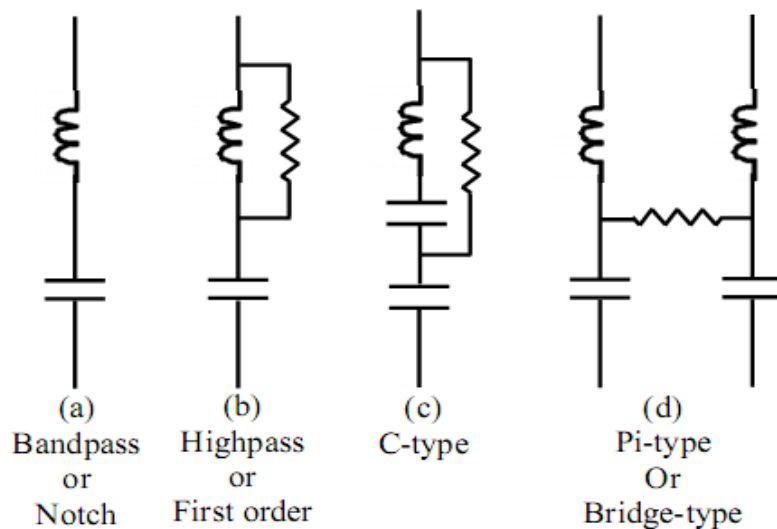


Figure II.1 : Différents types de filtres harmoniques passifs.

Le filtre harmonique passe-bande illustré sur la figure II.1 (a) est le plus simple et est largement appliqué. Son avantage est l'impédance presque nulle à la fréquence d'accord, conduisant à un filtre presque parfait à cette fréquence. Un inconvénient est la possibilité d'occasionner une résonance avec l'impédance du réseau.

La figure II.1 (b) montre le filtre harmonique passe-haut qui peut être un compromis entre filtrer une fréquence bien ciblée et atténuer les harmoniques des fréquences supérieures.

Le filtre harmonique de type C, illustré sur la figure II.1 (c), a des caractéristiques similaires au filtre harmonique passe-haut, avec l'avantage que la résistance ne consomme pas de puissance à la fréquence fondamentale du réseau.

La figure II.1 (d) illustre le filtre harmonique de type Pi qui est essentiellement composé de deux filtres passe-bande avec une résistance connectée au point médian. L'intérêt principal de ce filtre est sa bonne caractéristique de filtrage aux deux fréquences de résonance [3].

Le choix le plus commun pour le redresseur à thyristors de haute puissance consiste à utiliser une combinaison de plusieurs filtres réglés sur une seule fréquence (sur les harmoniques 5, 7, 11 et 13) et

Un filtre passe-haut du deuxième ordre réglé autour de la fréquence de l'harmonique 17 comme illustré sur la figure II.2.

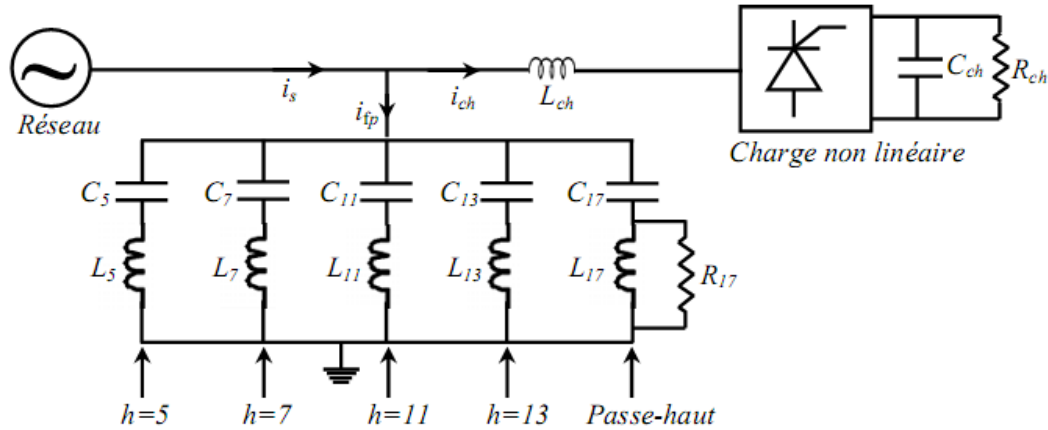


Figure II.2 : Combinaison de filtres passifs pour redresseur à thyristors.

La fonction de transfert de cette combinaison de filtres est donnée ci-après :

$$G(s) = \frac{\frac{1}{L_5}s}{s^2 + \frac{1}{C_5L_5}} + \frac{\frac{1}{L_7}s}{s^2 + \frac{1}{C_7L_7}} + \frac{\frac{1}{L_{11}}s}{s^2 + \frac{1}{C_{11}L_{11}}} + \frac{\frac{1}{L_{13}}s}{s^2 + \frac{1}{C_{13}L_{13}}} + \frac{\frac{1}{R_{17}}s^2 + \frac{1}{L_{17}}s}{s^2 + \frac{1}{R_{17}C_{17}}s + \frac{1}{L_{17}}}$$

Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut.

II.2.1.1.1 Filtre passif résonant ;

C'est un filtre sélectif constitué d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série, comme décrit sur la figure II.3, son impédance équivalente est :

$$Z_{eq} = \frac{1-LC\omega^2+jRC\omega}{jC\omega} \tag{II.1}$$

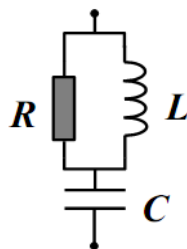


Figure II.3 : Filtre passif résonant.

II.2.1.1.2 Filtre passif amorti :

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure II.4. Son impédance équivalente est :

$$Z_{eq}(\omega) = \frac{1-LC\omega^2+j\frac{L}{R}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2+jC\omega} \tag{II.2}$$

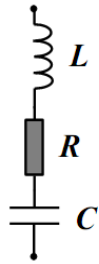


Figure II.4 : Filtre passif amorti.

II.2.1.1.3 Phénomène de l'anti-résonance :

Le phénomène de l'anti-résonance (figure II.5) se rencontre dans les réseaux électriques quelque soit leur niveau de tension. L'impédance vue par le réseau et le filtre passif résonnant est :

$$Z_{eq} = jL_s\omega \frac{1-LC\omega^2+jRC\omega}{1-(L+L_s)C\omega^2+jRC\omega} \tag{II.3}$$

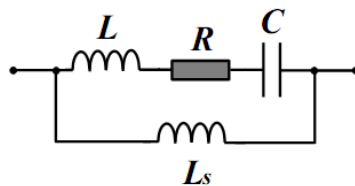


Figure II.5 : Filtre passif parallèle anti-résonant.

Dans ce cas, les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre. De plus, l'impédance du réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance seront alors amplifiées. Finalement, cette solution est dédiée à un type de charge et une configuration réseau et perd de son efficacité lorsque les caractéristiques de ceux-ci évoluent.

Malgré l'efficacité, le pouvoir de corriger le facteur de puissance, la simplicité et le coût, cette configuration de filtres passifs pose tout de même certains problèmes :

- le dimensionnement dépend du spectre harmonique de la charge et de l'impédance de la source, cette dernière est d'ailleurs susceptible d'engendrer des résonances ;

- le filtre passif peut absorber les courants harmoniques d'autres charges non linéaires présentent sur le même réseau et entrainer une surcharge ;
- toute modification du réseau (restructurations, nouveaux clients, ...), par changement de la fréquence d'accord, peut rendre le filtre passif inadapté et perturbateur (phénomène de résonance) ;
- les filtres passifs sont encombrants et présentent des risques de dérive de la fréquence au fur et à mesure que les composants vieillissent.

Cette solution est donc d'une efficacité moyenne, elle offre très peu de flexibilité et quasiment aucune évolutivité. Pour toutes ces limitations une attention particulière a été portée aux solutions basées sur l'électronique de puissance.

II.2.2 Solutions de dépollutions modernes :

Les solutions de dépollution traditionnelles décrites précédemment ne répondent pas très bien à l'évolution des réseaux électriques et les charges à protéger, c'est pourquoi d'autres solutions dites modernes ont été proposées.

II.2.2.1 Redresseur à MLI :

C'est un redresseur commandé par une MLI optimisée, qui consiste à déterminer les angles de commutation selon certains critères d'optimisation. Suivant les caractéristiques harmoniques exigées, on peut, par exemple, soit minimiser les harmoniques d'une bande, soit éliminer certains d'entre eux, soit faire que le facteur de puissance égale à 1. Il ya plusieurs techniques d'optimisations parmi elles, on distingue l'utilisation de l'algorithme génétique qui donne de très bons résultats [17] [18].

II.2.2.2 Filtres actifs :

Les filtres actifs constituent une alternative intéressante aux solutions classiques. Ils peuvent être utilisés comme complément aux solutions traditionnelles de dépollution. Le rôle d'un filtre actif est de compenser en temps réel les perturbations, en tout ou en partie, présentes dans les réseaux électriques. Les principales structures, proposées dans la littérature, sont les filtres actifs parallèle, série, combiné parallèle-série et les structures hybrides actif-passif.

II.2.2.2.1 Filtre actif parallèle (FAP) :

Le filtre actif parallèle (shunt) représente la solution alternative du filtre passif shunt. Les recherches sur les moyens de mitigation des harmoniques par l'utilisation des filtres actifs parallèles se sont multipliées dans la littérature depuis que L. Gyugyi a initié

Les premières structures, [19]. Durant les vingt dernières années et jusqu'à présent, de nouvelles approches du point de vue structure, contrôle et analyse des filtres actifs parallèles sont publiées [20], [21]. Il existe un grand nombre de topologies de filtres actifs parallèles, [22], [23]. Ces filtres peuvent être monophasés ou triphasés. Ces derniers peuvent à leur tour être à trois fils ou à quatre fils lorsque le courant du fil neutre cause un problème, [24]. Il existe cependant deux structures de base selon l'élément de stockage d'énergie de l'onduleur du FAP. Ces deux structures de base sont :

- Filtre actif parallèle à structure tension : lorsque le côté continu de l'onduleur possède un condensateur.
- Filtre actif parallèle à structure courant : Dans ce cas le côté continu de l'onduleur comportera une inductance, cette structure est moins utilisée à cause de son faible rendement.

La figure 2.1 montre la configuration d'un filtre actif shunt susceptible de remplacer un filtre passif shunt. Le filtre est un pont à six interrupteurs avec six diodes antiparallèles. L'onduleur avec l'inductance de sortie se comporte comme une source de courant afin de compenser le courant harmonique dans la source.

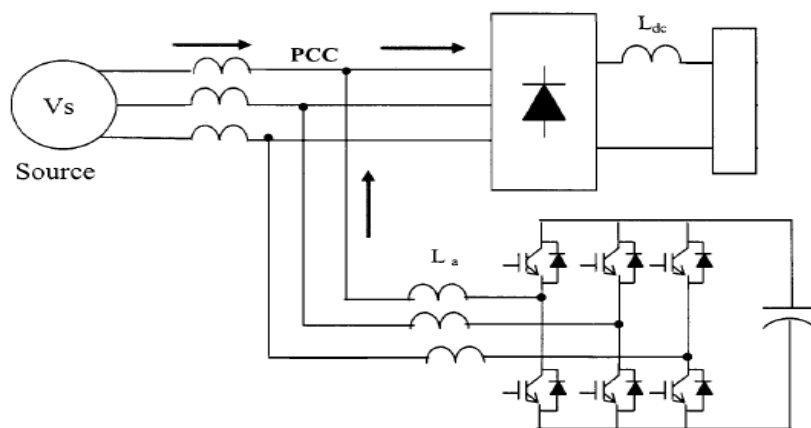


Figure II.6 : Filtre actif parallèle avec une charge non-linéaire.

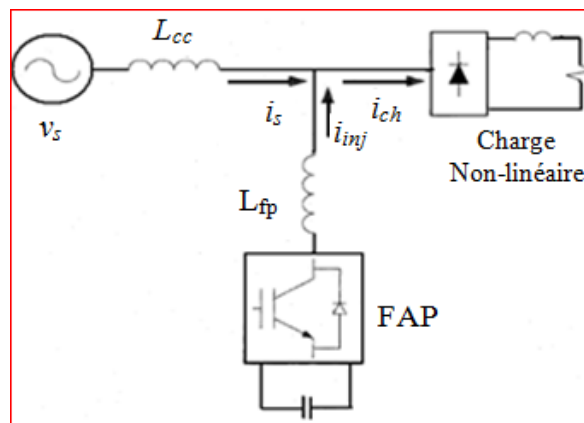
1/ Principe de fonctionnement du FAP :

Le FAP est connecté en parallèle sur le réseau de distribution (Fig. 2.1). Il est le plus souvent commandé comme générateur de courant [13] [25] [26]. Il constitue un excellent dépollueur, car il est souple, auto-adaptatif, performant, ne présentant aucun risque

d'interaction avec l'impédance réseau et ne nécessite pratiquement pas d'études préalables à la mise en service. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci, de telle sorte que le courant fourni par le réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple correspondante. En effet, l'objectif primordial du filtre actif parallèle (FAP) consiste à empêcher les courants perturbateurs (harmoniques, réactifs et déséquilibrés), produits par des charges polluantes, de circuler à travers l'impédance du réseau, tout en éliminant la possibilité de produire des résonances. Il faut noter aussi que ce filtre actif ne s'oppose pas nécessairement aux filtres passifs aux quels il peut s'associer avec intérêt.

2/ Modèle équivalent du filtre actif parallèle :

La charge non-linéaire considérée dans notre étude est un pont de diodes triphasé qui alimente une charge inductive. Cette charge est modélisée par une charge linéaire équivalente en parallèle avec une source de courant. La Figure II.7 montre le système simplifié que nous allons étudier et le circuit équivalent. On suppose que la source de tension est sans distorsion. Les harmoniques, produits par le pont à diode triphasé, ont les rangs $6k \pm 1$ ($k = 1, 2, 3, ..$ etc.). Les rangs pris en compte dans ce cas, sont : $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, 41, 43, 47$ et 49.



(a)

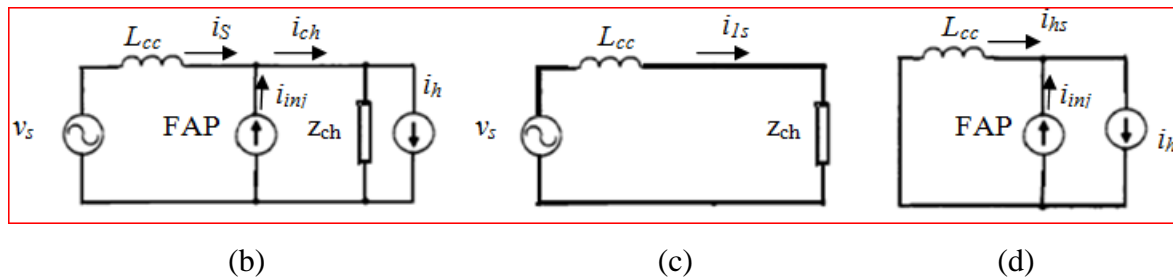


Figure II.7 : FAP raccordé à l'entrée d'une charge non-linéaire.

- (a) Représentation unifilaire du système.
- (b) Circuit équivalent, (c) Circuit équivalent pour le fondamental,
- (d) Circuit équivalent pour les harmoniques.

3/ Structure générale du filtre actif parallèle :

La Figure II.8 donne la structure générale du filtre actif parallèle, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : la partie puissance et la partie contrôle-commande.

La partie puissance est constituée :

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

La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :

- de la méthode d'identification des courants perturbés,
- de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- de la commande de l'onduleur de tension,
- de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,

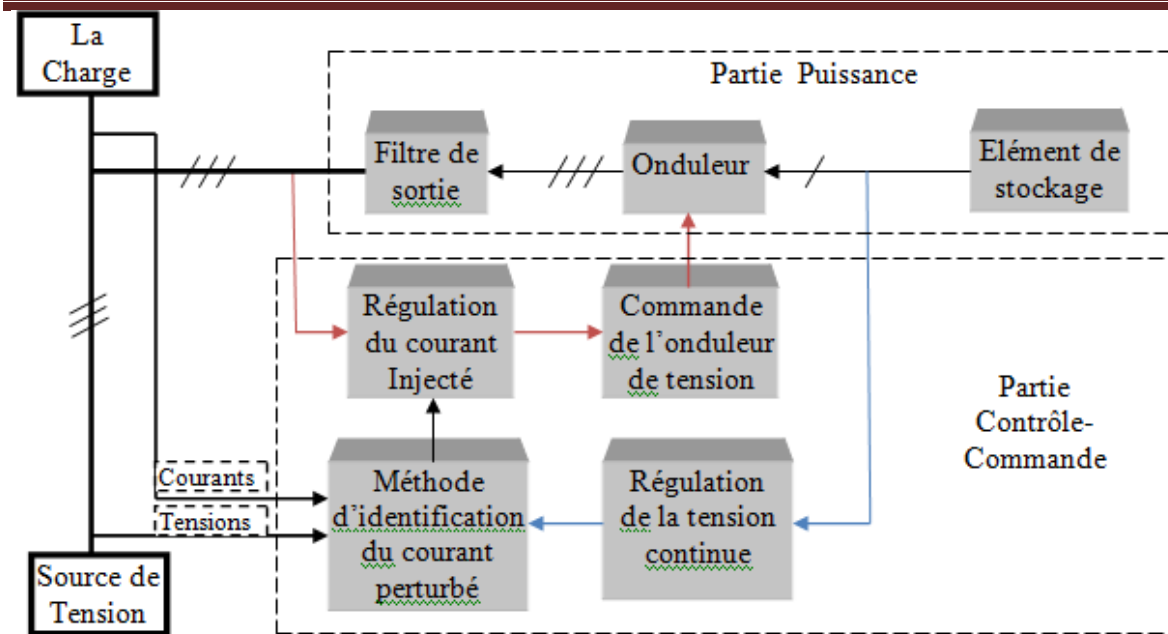


Figure II.8: Structure générale du filtre actif parallèle.

4/ Etude de la partie puissance :

4-1/ Onduleur de tension :

➤ **Structure générale :**

La Figure II.9 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_c . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_{fp}, R_{fp}) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

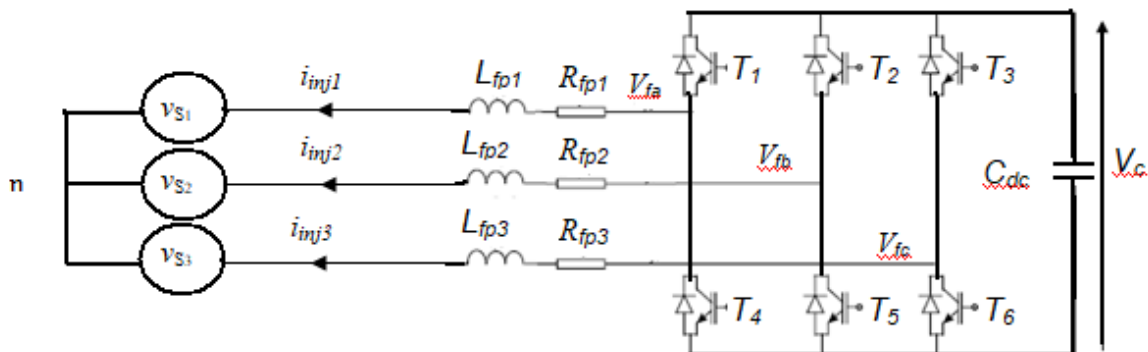


Figure II.9 : Onduleur de tension triphasé

Cette structure du filtre actif parallèle ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur de stockage. Par contre, ils peuvent être tous les deux ouverts (pendant un temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En réalité, le mode, où les semi-conducteurs d'un même bras sont tous les deux fermés, n'existe que durant les commutations. Afin d'éviter un court-circuit à cause du délai de blocage des interrupteurs, il faut insérer sur un même bras, un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande de blocage d'un interrupteur et la commande d'amorçage de l'autre [27]. Avec l'hypothèse des commutations instantanées, ce mode de fonctionnement ne sera pas pris en compte et par conséquent, aucun risque de court-circuiter le condensateur n'est à craindre.

► Tension fournie par l'Onduleur :

L'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de tension du filtre actif parallèle dépendent de l'état des signaux de commande (S_1, S_2, S_3), comme défini ci-dessous :

$$S_1 = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} 1 & T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} 1 & T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases}$$

Les tensions entre phases imposées par l'onduleur sont :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} - V_{fb} \\ V_{fb} - V_{fc} \\ V_{fc} - V_{fa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1 - S_2 \\ S_2 - S_3 \\ S_3 - S_1 \end{bmatrix} V_C \quad (\text{II. 4})$$

On suppose que les tensions de phase sont équilibrées ($V_{fa} + V_{fb} + V_{fc} = 0$), alors l'équation II.4 devient :

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2S_1 & -S_2 & -S_3 \\ -S_1 & 2S_2 & -S_3 \\ -S_1 & -S_2 & 2S_3 \end{bmatrix} \frac{V_C}{3} \quad (\text{II. 5})$$

soit \vec{V}_f Le vecteur correspondant aux tensions de phase de l'onduleur, $\vec{V}_f = \begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix}$

Pour simplifier les calculs et représenter ce vecteur de tension pour les différents états de S_1 , S_2 et S_3 nous transformons ce vecteur à trois dimensions en un vecteur à deux dimensions en appliquant la transformation triphasée/diphasée (qui est très connue) suivante :

$$\vec{V}_f = \begin{bmatrix} V_{f\alpha} \\ V_{f\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 6})$$

En utilisant l'équation 2.2 et 2.3, le module et l'argument du vecteur \vec{V}_f sont :

$$\text{Mod}(\vec{V}_f) = \frac{V_c}{\sqrt{3}} \sqrt{(S_1 - S_2)^2 + (S_2 - S_3)^2 + (S_3 - S_1)^2} \quad (\text{II. 7})$$

$$\text{Arg}(\vec{V}_f) = \text{arctg} \left(\frac{\sqrt{3}(S_2 - S_3)}{(S_1 - S_2) + (S_1 - S_3)} \right) \quad (\text{II. 8})$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif (V_{fa} , V_{fb} et V_{fc} ou $V_{f\alpha}$ et $V_{f\beta}$) comme le montre le tableau II.1.

Tableau II.1 : Tensions générées par l'onduleur

N° du Cas	Interrupteurs Fermés	S_1	S_2	S_3	V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}	$V_{f\alpha}$	$V_{f\beta}$	$\text{Mod}(\vec{V}_f)$	$\text{Arg}(\vec{V}_f)$
0	$T_4 T_5 T_6$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	$T_1 T_5 T_6$	1	0	0	$2V_c/3$	$-V_c/3$	$-V_c/3$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0
2	$T_2 T_4 T_6$	0	1	0	$-V_c/3$	$2V_c/3$	$-V_c/3$	$\frac{-}{V_c/\sqrt{6}}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	$2\pi/3$
3	$T_1 T_2 T_6$	1	1	0	$V_c/3$	$V_c/3$	$\frac{-}{2V_c/3}$	$V_c/\sqrt{6}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	$\pi/3$

4	$T_3T_4T_5$	0	0	1	$-V_c/3$	$-V_c/3$	$2V_c/3$	$V_c/\sqrt{6}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	$4\pi/3$
5	$T_1T_3T_5$	1	0	1	$V_c/3$	$2V_c/3$	$V_c/3$	$V_c/\sqrt{6}$	$V_c/\sqrt{2}$	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	$5\pi/3$
6	$T_2T_3T_4$	0	1	1	$-2V_c/3$	$V_c/3$	$V_c/3$	$-\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	0	$\sqrt{\frac{2}{3}}V_c$	π
7	$T_1T_2T_3$	1	1	1	0	0	0	0	0	0	

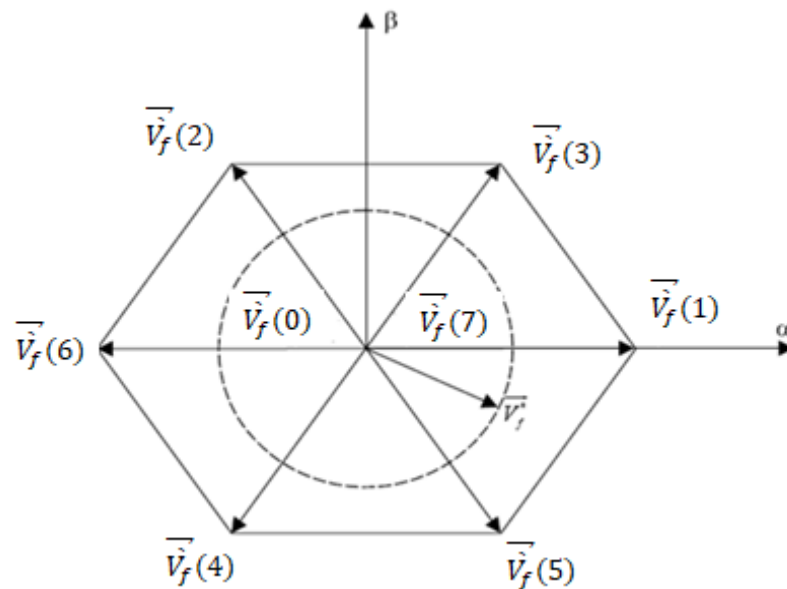


Figure II.10 : Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur dans le plan biphasé (α, β).

Où \vec{V}_f représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone montré dans La Figure II.10 [28] [29].

4-2/ Elément de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un élément de stockage capacitif représenté par un condensateur C_{dc} qui joue le rôle d'une source de tension continue V_c ,

comme le montre La Figure II.9. Le choix des paramètres du système de stockage (V_c et C_{dc}) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension V_c élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue V_c , causées par les courants engendrés par le filtre actif et limitées par le choix de C_{dc} , peuvent dégrader la qualité de compensation du filtre actif parallèle. Ces fluctuations sont d'autant plus importantes que l'amplitude du courant du filtre est grande et que sa fréquence est faible. Pour cette raison, nous pouvons estimer que seuls les premiers harmoniques sont pris en compte dans le choix des

paramètres du système de stockage. Pour démontrer ceci, deux méthodes peuvent être utilisées :

➤ La première méthode se base sur le calcul de l'énergie fournie par le filtre actif pendant une demi-période de la pulsation de puissance liée aux deux premiers harmoniques (5 et 7 pour un pont redresseur de Graetz) [29]. En choisissant un taux d'ondulation acceptable (ϵ), généralement de l'ordre de 5% de V_c , nous pouvons calculer la capacité C_{dc} à partir de la relation suivante :

$$C_{dc} = \frac{V_s \sqrt{I_5^2 + I_7^2 - 2I_5 I_7 \cos(5\alpha - 7\alpha)}}{2\omega \epsilon V_c^2} \quad (\text{II. 9})$$

Avec V_s la tension simple du réseau, I_h le courant harmonique du rang h et α l'angle d'allumage des thyristors du pont Graetz.

Puisque l'augmentation de la valeur de la tension continue améliore le fonctionnement du filtre actif et sachant que le choix de cette tension se répercute en grande partie sur le choix des interrupteurs, la tension continue V_c doit être choisie comme la plus grande tension respectant les contraintes des interrupteurs [4].

➤ La deuxième méthode, plus simple, se base sur la mesure du courant harmonique I_h du rang le plus faible. La capacité C_{dc} se calcule de la façon suivante [30]:

$$C_{dc} = \frac{I_h}{\epsilon V_c \omega_h} \quad (\text{II. 10})$$

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

4-3/ Filtre de sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique, ce filtre doit permettre au filtre actif parallèle de se comporter en source de courant vis à vis la source d'alimentation triphasée. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

➤ assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} i_{ch_h} = \frac{d}{dt} i_{inj} \quad (II. 11)$$

Avec i_{ch_h} le courant harmonique de la charge et i_{inj} le courant du filtre actif,

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

Deux types du filtre de sortie peuvent être employés : un filtre de sortie du premier ordre ou un filtre de sortie du troisième ordre.

➤ **Filtre du Premier ordre :**

Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature [27], [28], [29]. Il est composé d'une inductance L_{fp} de résistance interne R_{fp} , comme le montre La Figure II.9. Un filtre de ce type ne permet pas de satisfaire simultanément les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie. En effet, seule une valeur relativement faible de L_{fp} peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (2.8). Malheureusement, une valeur faible de L_{fp} permet à la majorité des composantes dues aux commutations de se retrouver côté réseau et par conséquent d'affecter les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_{fp} va empêcher ces composantes de se propager sur le réseau électrique mais affectera la dynamique du filtre actif et dégradera alors la qualité de compensation.

Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du filtre actif parallèle. Ce compromis est très difficile à fixer sans l'emploi d'un filtre passif auxiliaire installé à la sortie de l'onduleur ou en amont du côté réseau [31] [32]. Cependant, ce filtre auxiliaire peut causer des effets secondaires non désirés comme la résonance avec d'autres éléments passifs installés sur le réseau électrique. Il occasionne également une consommation de puissance active par sa résistance d'amortissement. De plus, la qualité de filtrage de ces filtres auxiliaires se dégrade avec le temps à cause du vieillissement de leurs éléments passifs.

Dans le cas d'une modulation triangulaire, l'inductance doit aussi empêcher la pente des courants injectés par le filtre actif de dépasser la pente du signal triangulaire. La valeur de l'inductance [12], dans ce cas peut être estimée par :

$$L_{fp} = \frac{V_{dc} + \sqrt{3}\hat{V}}{4f_s \Delta i} \quad (II. 12)$$

Où \hat{V} , f_s , et Δi sont respectivement la valeur crête de la tension simple, la fréquence du signal triangulaire et l'ondulation maximale admise du courant durant une période de commutation.

L'avantage majeur du filtre du premier ordre est sa simplicité d'implantation et son faible coût, ce qui a fait son utilisation très fréquente dans les FAP réels. Donc nous avons choisi ce filtre pour notre modèle étudié.

➤ **Filtre du troisième ordre :**

Afin d'échapper aux problèmes évoqués dans le cas du filtre de sortie du premier ordre [33], [34], un filtre de sortie du troisième ordre est proposé. Ce filtre de sortie, souvent appelé filtre en T, se compose de deux inductances (L_{f1} , L_{f2}) de résistances internes respectives (R_{f1} , R_{f2}) et d'une capacité C_f . Une petite résistance d'amortissement R_{fa} a été ajoutée en série avec la capacité C_f comme le montre La Figure II.11. Ce type de filtre et grâce au degré de liberté supplémentaire, fourni par la capacité C_f , peut assurer les deux critères du dimensionnement du filtre de sortie que nous avons évoqués précédemment.

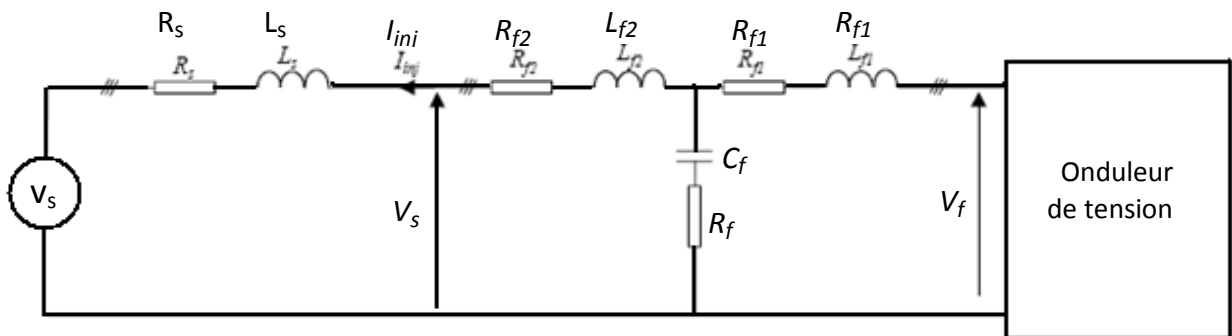


Figure II.11 : Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T.

5 / Etude de la partie contrôle-commande :

La stratégie de commande se base sur la méthode de détection des courants perturbateurs. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées [35], [36]:

- Identification des harmoniques à partir de la détection des courants de la charge : Cette méthode détecte les courants de la charge i_{ch} , qui circulent en aval du point de raccordement, et donc extrait les courants harmoniques i_{ch-h} de i_{ch} .
- Identification des harmoniques à partir de la détection des courants de la source : Cette méthode détecte les courants de la source i_s , qui circulent en amont du point de raccordement, et donc extrait les courants harmoniques i_{hs} de i_s .

- Identification des harmoniques à partir de la détection des tensions de la source : Cette méthode détecte les tensions de la source au point de raccordement v_s , et donc extrait les tensions harmoniques v_h de v_s .

Les courants de compensation (i_{inj}) dans le domaine temporel sont représentés par [37] :

- Identification depuis les courants de charge : $i_{inj} = i_{ch-h}$
- Identification depuis les courants de source : $i_{inj} = K_S i_{hS}$
- Identification depuis des tensions de source : $i_{inj} = K_V v_h$

La première méthode est la plus appropriée au filtre actif parallèle installé par le consommateur pour compenser les courants perturbateurs causés par ses charges polluantes [35]. C'est pourquoi cette méthode de détection sera employée dans ce travail.

5-1/ Méthodes d'identification des courants perturbés :

5-1-1/ Généralités sur les méthodes d'identification :

Le courant absorbé par une charge polluante est constitué d'une composante fondamentale et des harmoniques. L'objectif du filtre actif est de générer des courants harmoniques de même amplitude mais de phase opposée à ceux-ci. Par conséquent, le courant du côté réseau sera sinusoïdal. Pour cela, on a donc besoin d'identifier les courants harmoniques de la charge. Plusieurs méthodes d'identification des courants harmoniques peuvent être utilisées, dans le domaine fréquentiel et dans le domaine temporel :

❖ Les méthodes utilisées dans le domaine fréquentiel : sont basées sur l'analyse de Fourier du signal de la tension ou du courant pollué pour extraire les signaux de compensation [38], [39], [40]. En utilisant la transformation de Fourier, les composantes harmoniques de compensation sont séparées des signaux pollués et combinés pour générer les commandes de compensation. Seulement, l'application de la transformée de Fourier nécessite des calculs longs et laborieux.

❖ Les méthodes utilisées dans le domaine temporel : sont basées sur la dérivation instantanée des signaux de compensation à partir des formes d'onde de la tension et courant pollués. Il y a plusieurs stratégies de commande utilisées dans le domaine temporel, les plus connues sont :

- ⇒ la théorie des puissances instantanées p-q (instantaneous p-q theory) [23], [41], [42], [65]
- ⇒ la méthode du système de référence synchrone d-q (synchronous d-q reference framemethod) [43], [44], [45],
- ⇒ la méthode de détection synchrone (synchronous detection method) [46], [47], [64], [65]
- ⇒ la méthode basée sur la notion du flux (flux-based controller) [48],
- ⇒ la méthode directe basée sur l'équilibre des puissances [49],

⇒ la méthode basée sur le principe de la corrélation croisée [50].

Celle utilisant les notions de puissances réelles et imaginaires instantanées (instantaneous p-q theory) réalise de meilleurs compromis entre les performances statiques et dynamiques, elle est utilisée actuellement dans la plupart des filtres actifs en service dans le monde. Son objectif est de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les harmoniques en composantes alternatives. Cette méthode offre l'avantage de choisir la perturbation à compenser avec précision, rapidité et facilité d'implantation. Pour toutes ces raisons nous avons retenu cette méthode d'identification pour le reste de notre étude. En effet, cette méthode peut compenser les courants harmoniques, les courants déséquilibrés et la puissance réactive conjointement ou individuellement.

5-1-2/ Méthode des puissances instantanées p-q :

a. Généralités sur les puissances instantanées :

Cette méthode exploite la transformation $\alpha\text{-}\beta$ pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère $\alpha\text{-}\beta$ associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_S) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_{ch}). La transformation de Clarke notée transformation $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$ permet d'écrire les relations suivantes dans un système triphasé équilibré :

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \tag{II. 13}$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ch1} \\ I_{ch2} \\ I_{ch3} \end{bmatrix} \tag{II. 14}$$

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} P(t) = V_{S1}I_{ch1} + V_{S2}I_{ch2} + V_{S3}I_{ch3} = p(t) + p_0(t) \\ p(t) = V_{\alpha}I_{\alpha} + V_{\beta}I_{\beta} \\ p_0(t) = V_0I_0 \end{array} \right. \quad (II.15)$$

Avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ la puissance homopolaire instantanée. L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\begin{aligned} q(t) &= -\frac{1}{\sqrt{3}}[(V_{S1} - V_{S2})I_{ch3} + (V_{S2} - V_{S3})I_{ch1} + (V_{S3} - V_{S1})I_{ch2}] \\ &= V_{\alpha}I_{\beta} - V_{\beta}I_{\alpha} \end{aligned} \quad (II.16)$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. En effet, contrairement à la puissance réactive, qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques du courant et de la tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le volt-ampère imaginaire (VAI). A partir des relations (II.15) et (II.16), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{\alpha} & V_{\beta} \\ -V_{\beta} & V_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (II.17)$$

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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{array} \right. \quad (II.18)$$

Avec :

- \bar{p} une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension,
- \bar{q} une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension,
- \tilde{p} et \tilde{q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

Le réseau étudié est composé de trois fils ce qui empêche les composantes homopolaires d'y circuler.

b. Séparation des puissances perturbatrices :

Les grandeurs \tilde{p} et \tilde{q} , correspondent aux puissances perturbatrices aux pulsations multiples de six fois celle du réseau [4]. Afin de ne garder que la partie relative aux harmoniques, la composante continue des puissances doit être filtrée. Pour cela, on a le choix entre un filtre passe-haut ou un filtre passe-bas.

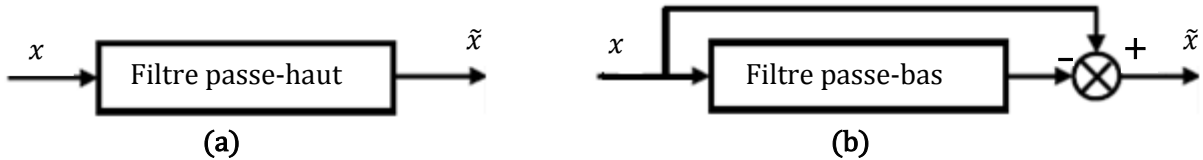


Figure II.12: Deux types de filtrage de p et q.

Ces deux filtres réalisent une élimination de la composante continue, mais leurs caractéristiques pour le résidu harmonique sont différentes. Le filtre (b) est plus performant que celui de (a) [51], [52], [53]. Le filtre (b) est donc choisi. L'ordre de ce filtre passe-bas définit la dynamique et l'efficacité de la méthode d'identification. Des filtres de puissance du quatrième ou cinquième ordre ont été proposés [54]. Dans notre étude, nous avons choisi un filtre passe-bas du deuxième ordre qui peut être pratiquement réalisé. En effet, un ordre plus élevé entraînerait des temps de calcul plus longs. La relation suivante donne l'expression générale d'un filtre passe-bas du deuxième ordre :

$$\frac{\omega_0^2}{S^2 + 2\xi\omega_0 S + \omega_0^2} \tag{II. 19}$$

La fréquence de coupure, $f_0 = \omega_0 / 2\pi$, est choisie pour que le filtre de puissance puisse bloquer toute composante perturbatrice des puissances instantanées (\tilde{x}). Elle doit aussi permettre le passage des composantes continues représentant les puissances active et réactive à la fréquence fondamentale (\bar{x}). Pour notre étude, nous avons choisi $f_0 = 25$ Hz et $\xi = 0.7$. Le diagramme de bode pour ce filtre est donné par la fig. II.13.

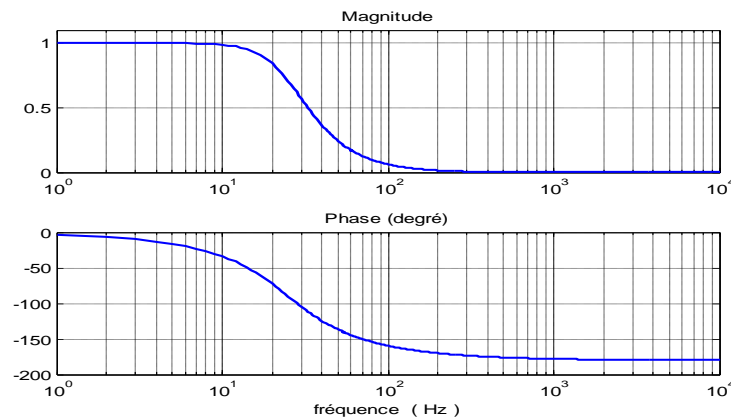


Figure II.13: Diagramme de bode du filtre passe- bas du deuxième ordre.

c. Calcul des courants perturbateurs :

En inversant la relation (II.17), nous pouvons recalculer les courants dans le repère α - β comme le montre l'équation (II.20) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

En considérant les équations (II.18) et (II.20), nous pouvons séparer le courant dans le repère α - β en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques. Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (II.21)$$

Avec $\Delta = V_\alpha^2 + V_\beta^2$, supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère (α - β) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence (I_{ref}), sont calculés à partir de la transformation α - β

inverse. Les équations (II.22) et (II.23) montrent les calculs pour l'obtention de ces références.

$$\begin{bmatrix} I_{réf\alpha} \\ I_{réf\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & -V_\beta \\ V_\beta & V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (II.22)$$

$$\begin{bmatrix} I_{réf1} \\ I_{réf2} \\ I_{réf3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{réf\alpha} \\ I_{réf\beta} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

d. Algorithme d'identification :

Finalement, l'algorithme d'identification que nous avons défini peut être représenté par le synopsis de. La Figure II.14

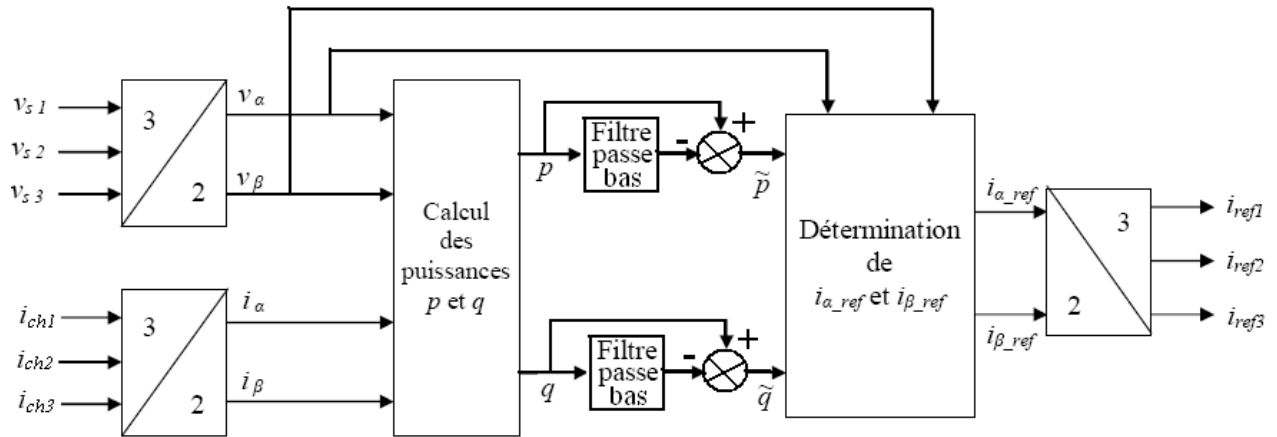


Figure II.14: Algorithme p-q d'identification des courants harmoniques de référence.

5-2/ Régulation de la tension continue :

La tension moyenne aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. Les causes de sa variation sont essentiellement les pertes dans les interrupteurs (en conduction et en commutation), dans les inductances de découplage L_{fp} et l'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires [55], [56], [57]. Il en découle alors une variation de la tension continue aux bornes du condensateur alimentant le filtre actif, d'où une régulation est nécessaire afin de stabiliser la tension aux bornes du condensateur. La relation entre la puissance active absorbée par le condensateur et la tension aux bornes de celui-ci est donnée par :

$$P_c = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} V_c^2 \right) \tag{II.24}$$

Notons que la relation (II.24) est non linéaire. Pour des faibles variations de la tension V_c autour de sa référence V_{c-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes :

$$P_c = C_{dc} V_{c-ref} \frac{d}{dt} (V_c) \tag{II.25}$$

En appliquant la transformée de Laplace :

$$V_c(s) = \left(\frac{1}{V_{c-ref} C_{dc} S} \right) P_c(s) \tag{II.26}$$

A partir de la relation (II.26), et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_p), la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de La Figure II.15. Le choix du paramètre K pourra pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif [58].

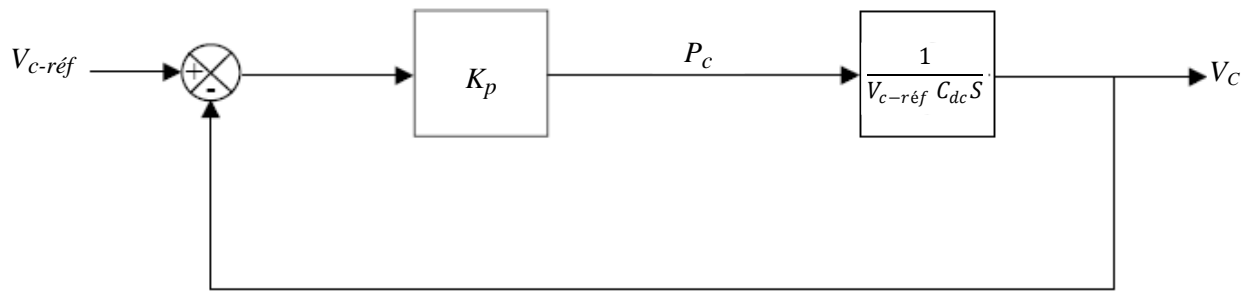


Figure II.15: Boucle de régulation de la tension continue.

5-3/ Commande de l'onduleur :

L'objectif de la commande de l'onduleur est de déterminer les instants d'ouverture et de fermeture des interrupteurs qui le composent de façon à obtenir une tension de sortie, côté alternatif, qui suit le plus fidèlement possible la consigne ou tension de référence (pas forcément sinusoïdale) en minimisant ses harmoniques non désirées (harmoniques de commutation) et ce, en optimisant l'amplitude pour une tension du bus continue donnée[59][60]. Le choix du type de commande dépend essentiellement de deux paramètres: d'une part des caractéristiques souhaitées de la tension de sortie (distorsion admissible, spectre basse fréquence souhaité, etc.) et d'autre part de la fréquence de découpage des semi-conducteurs utilisables à la puissance de l'application. Toutefois, deux méthodes de commande peuvent être utilisées :

- la commande par hystérésis,
- la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

a. Commande par hystérésis :

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existante entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur [50]. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre La Figure II.16, est le principal atout de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de bande d'hystérésis, on ne peut maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences de commutations. Afin de résoudre ce problème de la maîtrise des fréquences de commutation et de sa répercussion sur les interrupteurs, une autre stratégie de commande peut être proposée à savoir la commande par hystérésis à bande adaptative [66]. Mais dans cette stratégie de commande, le fonctionnement avec une fréquence de commutation quasi fixe nous

empêche de conserver l'avantage d'une rapidité illimitée obtenue par la commande par hystérésis.

Finalement, la rapidité du contrôle par hystérésis donne des performances dynamiques et statiques meilleures. C'est la raison pour laquelle nous avons choisi ce type de commande pour la simulation du filtre actif parallèle.

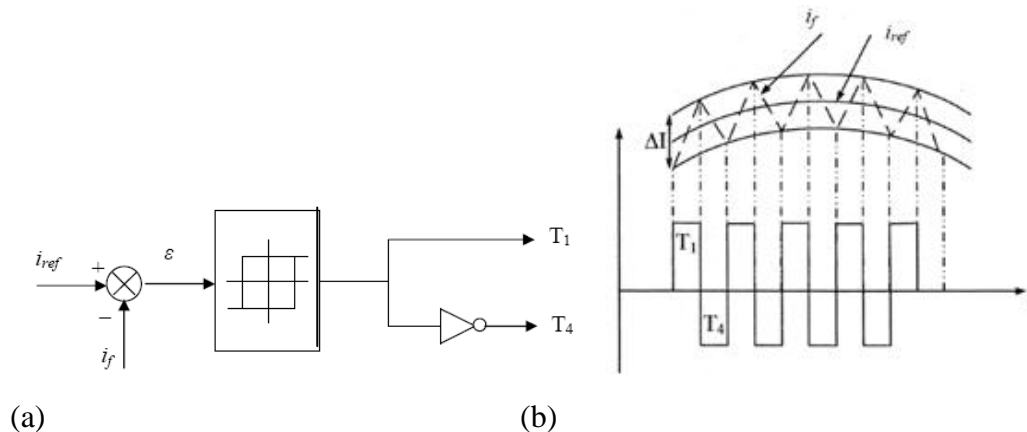


Figure II.16 : contrôle par hystérésis.

(a) : Principe de contrôle, (b) : Commande des interrupteurs

b. Commande par modulation de largeur d'impulsion :

Afin de contourner les problèmes précédents, nous introduirons une deuxième famille de commande de l'onduleur : la commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI). La technique de commande par MLI résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le schéma de principe est donné par La Figure II.17.

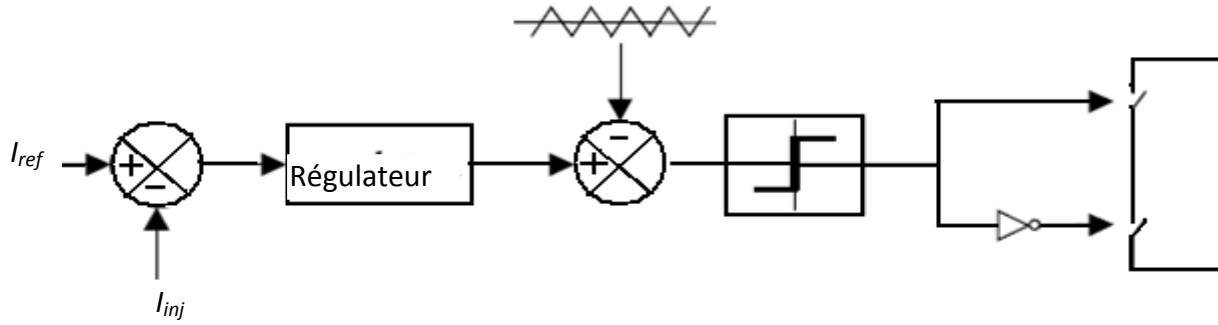


Figure II.17 : Principe de commande des courants par MLI.

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

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

Il y a d'autres techniques de commande, comme la commande à modulation vectorielle. Cette dernière diffère des techniques présentées précédemment par le fait qu'elle ne s'appuie pas sur des modulations appliquées à chacun des interrupteurs.

5-4/ Régulation du courant du filtre actif parallèle :

De la Figure II.4, en négligeant les effets des résistances du filtre de sortie sur le courant injecté par le filtre I_{inj} , nous pouvons écrire la relation suivante :

$$L_{fp} \frac{d}{dt} i_{inj} = V_s - V_f \tag{II. 27}$$

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

$$\Delta I_f = i_{réf} - i_{inj} \tag{II. 28}$$

Des équations (II.27) et (II.28), nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_{fp} \frac{d}{dt} \Delta I_f = \left(V_s + L_{fp} \frac{d}{dt} i_{réf} \right) - V_f \tag{II. 29}$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (II.29) peut être défini comme tension de référence (V_{f-ref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s + L_{fp} \frac{d}{dt} i_{réf} \tag{II. 30}$$

L'écart entre V_{f-ref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (II.30), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_{fp} , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre La Figure II.18.

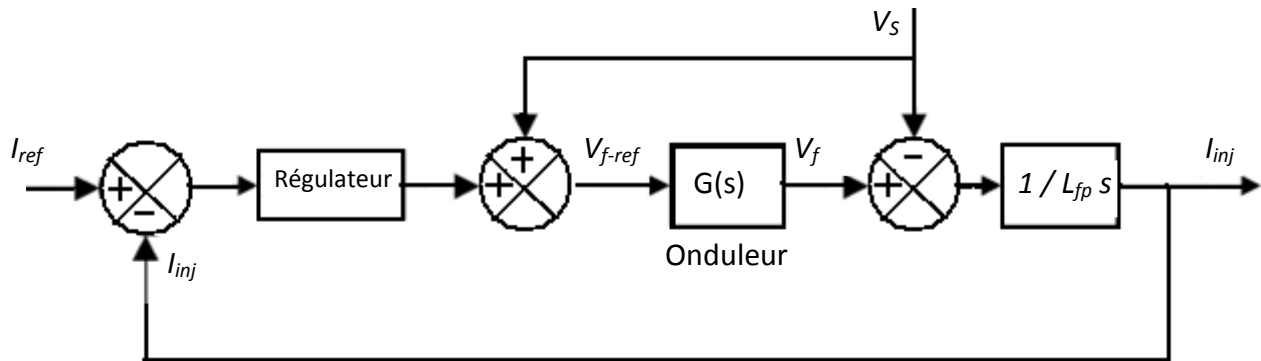


Figure II.18: Schéma de la régulation des courants du F.A.P.

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur (à commande MLI) qui peut être modélisé par la relation suivante [36] :

$$G(s) = \frac{V_c}{2U_p} \quad (II.31)$$

Avec :

V_c : tension continue du condensateur de stockage d'énergie.

U_p : amplitude de la porteuse.

Si $V_c = 2U_p$, $G(s) = 1$ donc, la tension de sortie de l'onduleur V_f est égale à V_{f-ref} . Dans ce cas les schémas de la régulation simplifiée sont représentés par La Figure II.19:

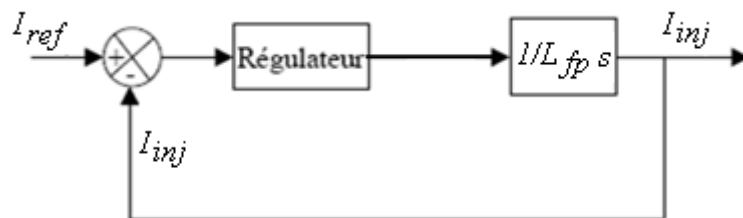


Figure II.19 : Schéma simplifié de régulation des courants du F.A.P.

Le régulateur peut être un régulateur PI, flou, RST ou autre selon les objectifs généraux de la régulation ainsi qu'aux contraintes liées au rejet des perturbations [61].

6/ Etude de la puissance apparente du FAP :

Dans cette partie, nous aborderons l'étude de la puissance apparente du filtre actif parallèle, de manière à évaluer, du point de vue économique, les possibilités de compensation pour tout type de perturbations de courant crée par une charge non linéaire qui dans notre cas est représenté par un pont redresseur triphasé à thyristors avec un angle d'allumage α et une charge inductive.

Avant de débiter cette étude, nous devons connaître les valeurs de tension et de courant que doit supporter chaque interrupteur de l'onduleur. Généralement, ces interrupteurs sont choisis pour supporter individuellement la tension continue V_c et la valeur crête du courant du filtre actif I_{inj} tout en tenant compte des composantes dues aux découpages.

Dans cette partie, nous étudierons la puissance apparente du FAP (S_{FAP}) dans trois cas de compensation : compensation des courants harmoniques, compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive, et compensation des courants harmoniques, du déséquilibre en courant et de la puissance réactive [4].

6-1/ Compensation des courants harmoniques :

La puissance apparente d'une charge non linéaire (S_{ch}) est donnée par la relation suivante :

$$S_{ch} = 3V_s I_{ch} \quad (II. 33)$$

Avec V_s la tension du réseau au point de raccordement et I_{ch} le courant de la charge non linéaire.

La puissance apparente du filtre actif (S_{FAP}) compensant le courant harmonique I_h , injecté par un pont redresseur triphasé à thyristors, est donnée par l'équation suivante [62]:

$$S_{FAP} = 3V_s I_h \quad (II. 34)$$

Ce courant harmonique I_h qui doit être créé par le filtre actif peut s'écrire de la façon suivante :

$$I_h = \sqrt{I_{ch}^2 - I_1^2} \quad (II. 35)$$

En effectuant la transformation α - β , nous obtenons le courant fondamental et le courant de la charge qui peuvent être écrits en fonction du courant direct de la charge non linéaire, I_d , de la façon suivante [4]:

$$\begin{cases} I_{ch} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \\ I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{d-\alpha} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

En reportant les relations (II.35) et (II.36) dans celles de (II.33) et (2.34), on obtient le rapport des puissances (τ_h) donné par l'expression suivante :

$$\tau_h = \frac{S_{FAP}}{S_{ch}} = \frac{0.24 I_{d-\alpha}}{\sqrt{\frac{2}{3}} I_d} \quad (\text{II.37})$$

En prenant $I_d = I_{d-\alpha}$, pour un angle d'allumage de $\alpha = 0$ des thyristors, on peut établir la relation suivante [4]:

$$\begin{cases} I_{d-\alpha} = \frac{U_d \cos \alpha}{R_d} \\ U_d = \frac{3\sqrt{6}V_s}{\pi} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

Avec U_d la tension de la charge non linéaire côté continu.

Des expressions (II.37) et (II.38), on obtient l'expression finale de τ_h donnée par la relation suivante :

$$\tau_h = \left(\frac{0.24}{\sqrt{2/3}} \right) \cos \alpha \approx 0.3 \cos \alpha \quad (\text{II.39})$$

La Figure II.20 suivante montre la variation du rapport des puissances, (τ_h), du filtre actif parallèle par rapport à celle de la charge non linéaire, en fonction de l'angle d'allumage des thyristors (α).

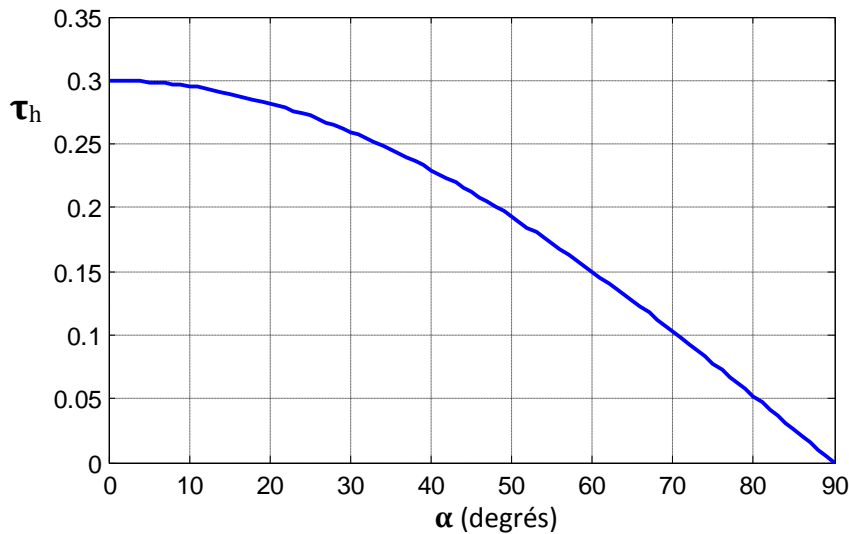


Figure II.20: Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation des courants harmoniques.

A partir de cette figure, on remarque que pour $\alpha=0$, la puissance maximale du filtre actif est de $S_{FAP} \approx 30\% S_{ch}$. Cette puissance diminue avec l'augmentation de l'angle d'allumage (α) grâce à la diminution du courant harmonique.

6-2/ Compensation des courants harmoniques et de la puissance réactive :

Dans cette seconde étude, nous nous intéresserons au calcul du rapport des puissances apparentes dans le cas d'une compensation du courant harmonique et de la puissance réactive consommés par la même charge non linéaire. Dans ce cas, le rapport des puissances apparentes (τ_{hr}) du filtre actif parallèle par rapport à celle de la charge non linéaire est donné par la relation suivante :

$$\tau_{hr} = \frac{S_{FAP}}{S_{ch}} = \frac{\sqrt{(3 V_s I_h)^2 + (3 V_s I_1 \sin \alpha)^2}}{3 V_s I_{ch}} \tag{II. 40}$$

En reportant les relations (II.35) et (II.36) dans celles de (II.38) et (II.40), on obtient l'expression du rapport des puissances (τ_{hr}) suivante :

$$\tau_{hr} = \left(\sqrt{1 - \frac{9}{\pi^2} (\cos \alpha)^2} \right) \cos \alpha \tag{II. 41}$$

La Figure II.21 donne la représentation graphique du rapport des puissances (τ_{hr}) en fonction de l'angle d'allumage des thyristors de la charge non linéaire.

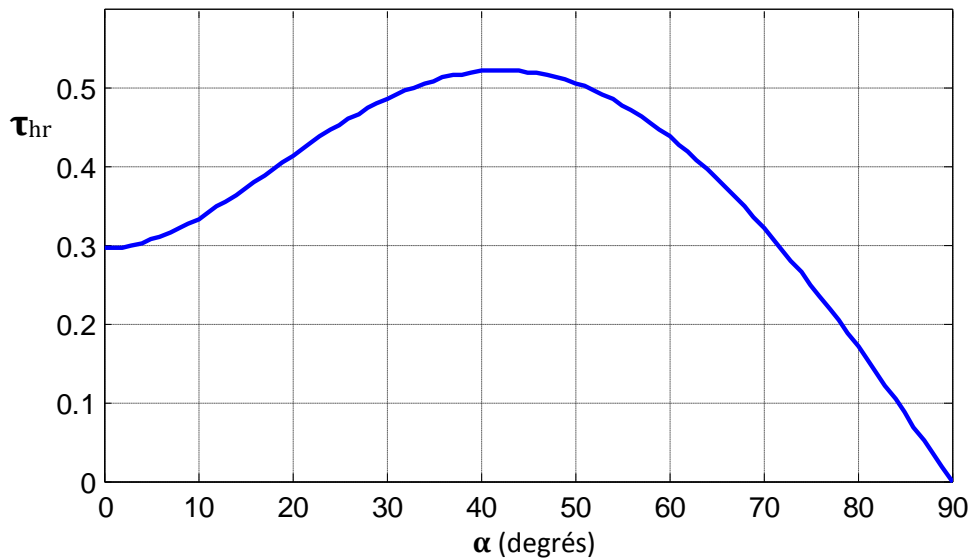


Figure II.21 : Rapport des puissances du filtre actif parallèle et de la charge non linéaire pour la compensation du courant harmonique et de la puissance réactive

A partir de La Figure II.21, on montre que pour un angle d'amorçage $\alpha=0$, on trouve le même rapport de puissance que celui obtenu dans le cas de compensation précédent ($S_{FAP} \approx 30\% S_{ch}$). Par contre, dans ce cas de compensation, le filtre actif atteint ici un rapport maximum de puissance de $S_{FAP} \approx 52\% S_{ch}$ pour un angle de $\alpha \approx 42^\circ$.

Les résultats graphiques de la Fig. 2.16, montrent également que le filtre actif parallèle, et du point de vue économique, peut être appliqué pour compenser à la fois le courant harmonique et l'excès de la puissance réactive.

Il est possible aussi d'envisager un filtre actif parallèle installé pour compenser uniquement le courant harmonique tout en prévoyant, dans la limite de la puissance restante, de compenser une partie de la puissance réactive dans le cas d'une sous-charge.

6-3/ Compensation des courants harmoniques, déséquilibrés et de la Puissance réactive :

Dans cette troisième étude, nous nous intéresserons au calcul du rapport des puissances apparentes dans le cas d'une compensation des courants harmoniques et déséquilibrés et de la puissance réactive. Les courants harmoniques et la puissance réactive sont consommés par le pont triphasé à thyristors tandis que le courant déséquilibré est causé par une charge linéaire déséquilibrée connectée en parallèle avec la charge non linéaire. Le réseau étudié étant de trois fils, le déséquilibre de courant est représenté uniquement par la composante inverse du courant I_i de la charge linéaire.

Le nouveau rapport des puissances (τ_{hri}) calculé dans ce cas peut s'écrire de la façon suivante :

$$\tau_{hri} = \frac{S_{FAP}}{S_{ch}} = \frac{\sqrt{(3 V_s I_h)^2 + (3 V_s I_1 \sin \alpha)^2 + (3 V_s I_i)^2}}{3 V_s I_{ch}} \quad (II.42)$$

En reportant les relations (II.35) et (II.36) dans celle de (II.42), on obtient l'expression du rapport des puissances apparentes (τ_{hri}) suivante :

$$\tau_{hri} = \sqrt{(\cos \alpha)^2 \left[1 - \frac{9}{\pi^2} (1 - (\sin \alpha)^2) \right] + \frac{9}{\pi^2} \left(\frac{I_i}{I_1} \right)^2} \quad (II.43)$$

La Figure II.22 donne la représentation graphique du rapport des puissances (τ_{hri}) en fonction de l'angle d'allumage des thyristors de la charge non linéaire. Ce rapport de puissance est donné pour plusieurs valeurs du taux inverse de courant ($X=I_i/I_1$), I_1 étant toujours le courant fondamental de la charge non linéaire.

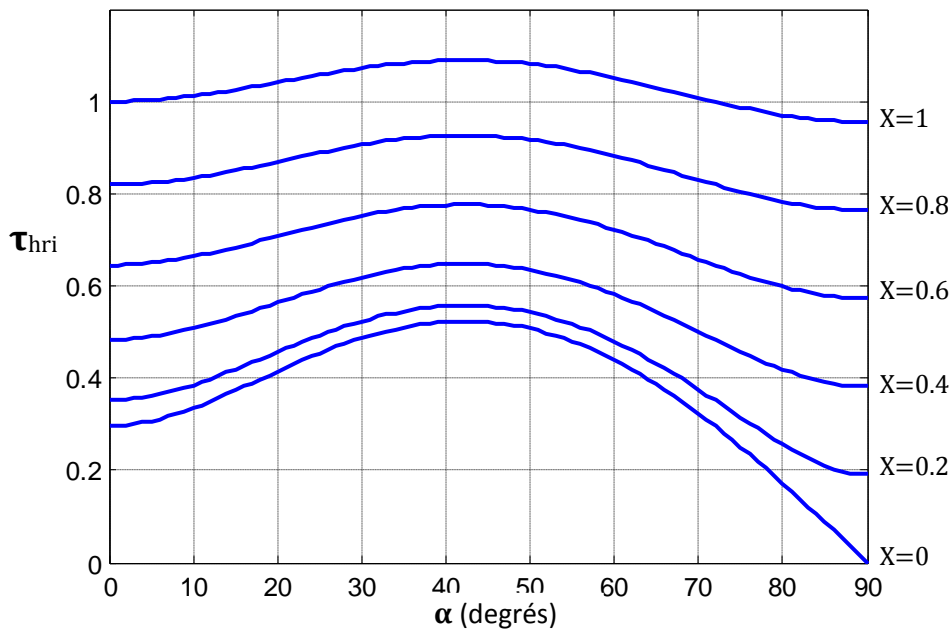


Figure II.22: Rapport de puissances pour la compensation des courants harmoniques et déséquilibrés et de la puissance réactive.

A partir de Figure II.22, on remarque que pour $X=0$, on retrouve la même courbe que dans le cas de compensation précédent. Les résultats graphiques de Figure II.22 montrent également que la puissance du filtre actif parallèle augmente de façon quasi linéaire avec l'augmentation du taux inverse du courant.

Du point de vue économique, le filtre actif parallèle peut ainsi être installé pour compenser un faible taux du courant inverse ($X < 0,1$). Il peut aussi être appliqué pour compenser uniquement le courant harmonique tout en ayant la possibilité de compenser, dans la limite de la puissance restante, une partie du déséquilibre dans un cas de sous-charge.

7 / Points d'insertion du filtre actif parallèle :

On peut connecter le filtre actif parallèle à différents points du réseau de distribution électrique:

- près des charges générant un niveau élevé d'harmoniques, afin d'assurer une correction locale des courants harmoniques ;
- de façon centralisée, au niveau du PCC, pour une compensation globale des courants harmoniques.

Dans l'idéal, la correction des harmoniques doit être effectuée à leur point d'origine. Un certain nombre de critères financiers et techniques sont pris en compte pour assurer le choix optimal. Principaux avantages d'une compensation locale :

- évite la circulation des courants harmoniques dans l'installation électrique ;
- diminue l'effet des pertes par effet de Joule dans les câbles, et réduit la charge apparente sur le transformateur principal ;
- réduit la section des câbles nécessaires dans les nouvelles installations ;
- permet à l'installation d'être conforme aux normes en vigueur concernant les Harmoniques.

8/ Comparaison entre le FAP et le filtre passif shunt :

Tableau II.2: Comparaison entre le filtre actif parallèle et le filtre passif shunt

	Filtre Passif shunt	Filtre Actif Parallèle (FAP)
action sur les courants harmoniques	nécessite un filtre pour chaque fréquence (encombrant)	agit simultanément sur plusieurs fréquences
influence d'une variation de fréquence	efficacité réduite	aucune conséquence
influence d'une modification de l'impédance du réseau au PCC	risque de résonance	aucune conséquence
influence d'une	risque de surcharge et de	aucun risque de surcharge,

augmentation de courant	détérioration	mais efficacité diminuée
ajout de matériel (augmentation de charge)	nécessite des modifications sur le filtre, dans certains cas	aucun problème si I du FAP $>$ I harmoniques de la charge
action sur les harmoniques suivant leur ordre	très difficile	possible, grâce au paramétrage
modification de la fréquence fondamentale	modification impossible	possible, grâce à la reconfiguration
Encombrement	Important	Faible
Poids	Important	Faible

9/ Coût du filtre actif parallèle :

Grâce à l'utilisation de technologies de pointe (DSP, CMS, microcontrôleur), et l'utilisation de sous-ensembles convertisseurs de variateurs de vitesse produits en grande quantités, le coût a été réduit de manière très significative. L'objectif de prix marché varie de 200 à 300 \$ par ampère d'harmonique compensé, en fonction du calibre de l'appareil.

Cette nouvelle génération de filtre actif parallèle s'affirme donc comme une solution très compétitive face aux filtres passifs [63].

II.2.2.2.2 Filtre actif série (FAS) :

Le filtre actif série se comporte comme une source de tension qui s'oppose aux tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi la tension aux bornes de la charge à protéger est purement sinusoïdale.

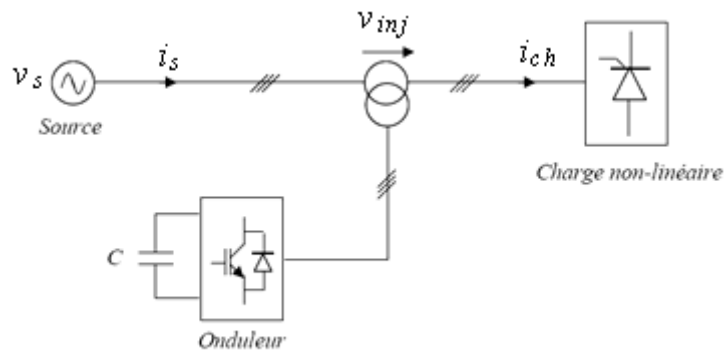


Figure II.23: Filtre actif série.

II.2.2.2.3 Filtres actifs parallèle-série combinés (UPQC) :

La combinaison parallèle-série actifs, appelée aussi ‘*Unified Power Quality Conditioner (UPQC)*’, résulte de l’association des deux filtres actifs parallèle et série. Profitant des avantages des deux filtres, l’UPQC assure un courant et une tension sinusoidaux du réseau électrique à partir d’un courant et d’une tension perturbés de celui-ci. L’objet du filtre actif série est l’isolation harmonique entre la charge et la source d’une part, la régulation de la tension réseau (compensation de flicker ou de déséquilibre) d’autre part. Le filtre actif parallèle compense les courants harmoniques et la puissance réactive de la charge en même temps qu’il contrôle la tension continue du condensateur commun des deux filtres actifs.

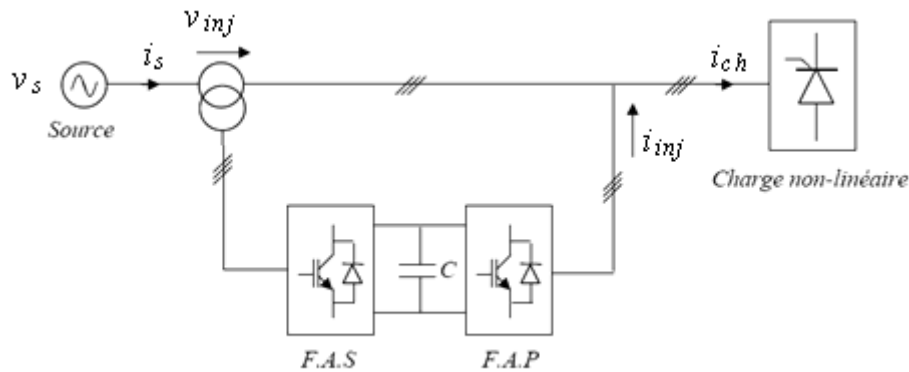


Figure II.24: Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC).

II.2.2.2.4 Filtres hybrides actifs et passifs :

Pour réduire le dimensionnement du filtre actif et son coût, on lui associe un filtre passif. Le filtre passif a pour rôle d’éliminer les fréquences spécifiques permettant la réduction du dimensionnement du filtre actif qui compensera le reste des perturbations. Les configurations les plus étudiées dans la littérature sont :

➤ **Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :**

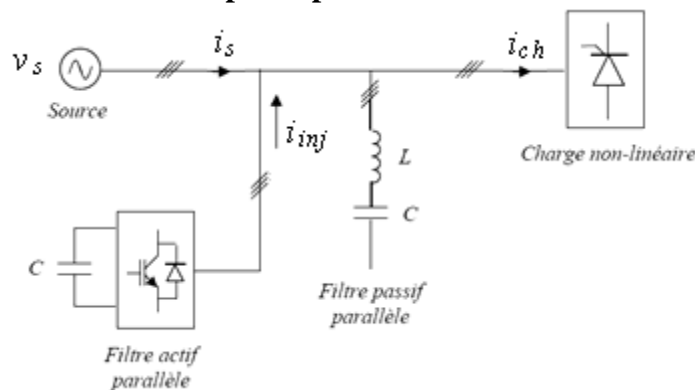


Figure II.25: Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

➤ Filtre actif série avec un filtre passif parallèle :

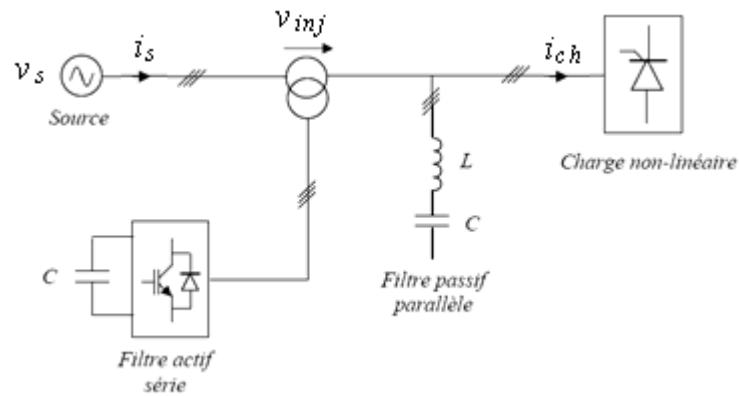


Figure II.26 : Filtre actif série avec filtre passif parallèle.

➤ Filtre actif série connecté en série avec un filtre passif parallèle :

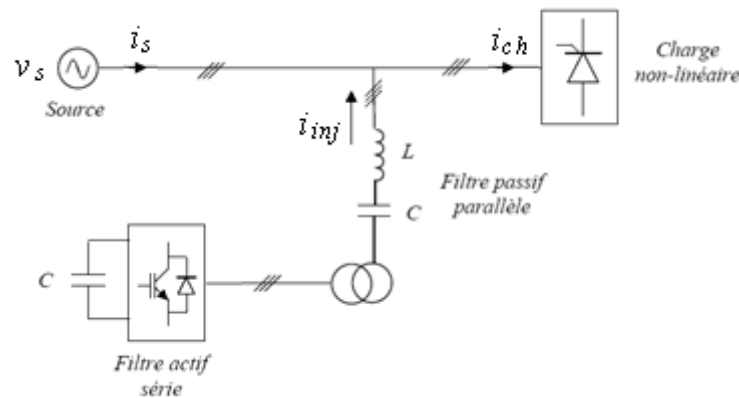


Figure II.27: Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

II.2.2.3 Les FACTS :

II.2.2.3.1 Définition des FACTS :

Les FACTS sont des dispositifs statiques, utilisés pour la transmission et la conversion de l'énergie électrique alternative ou continue. Ils sont composés de transformateurs, d'éléments passifs (capacités, inductances), de composants de puissance (de type thyristor ou transistor) et d'un contrôle spécifique à leur application. Leur fonctionnement repose sur le principe de la compensation parallèle, la compensation série ou la combinaison des deux afin de réaliser les fonctions suivantes [7].

- Augmenter la stabilité réseau en cas de défaut ou pendant les phases transitoires,
- Contrôler dynamiquement la tension réseau et réduire les perturbations,
- Augmenter et contrôler le transfert d'énergie d'une source à une autre,

Amortir les oscillations entre les générateurs et les résonances sub synchrones qui apparaissent entre la turbine et la génératrice électrique.

II.2.2.3.2 Différentes catégories des FACTS :

La figure (II.28) [7], représente les grandes catégories des dispositifs FACTS de contrôle des réseaux électriques. La colonne sur la gauche contient les systèmes conventionnels constitués de composant de base R L C et transformateurs fixes (compensation fixe) ou variable commandés par des interrupteurs mécaniques. Les dispositifs FACTS contiennent également les mêmes composants mais rapidement commander avec des interrupteurs statiques et convertisseurs de l'électronique de puissance [8].

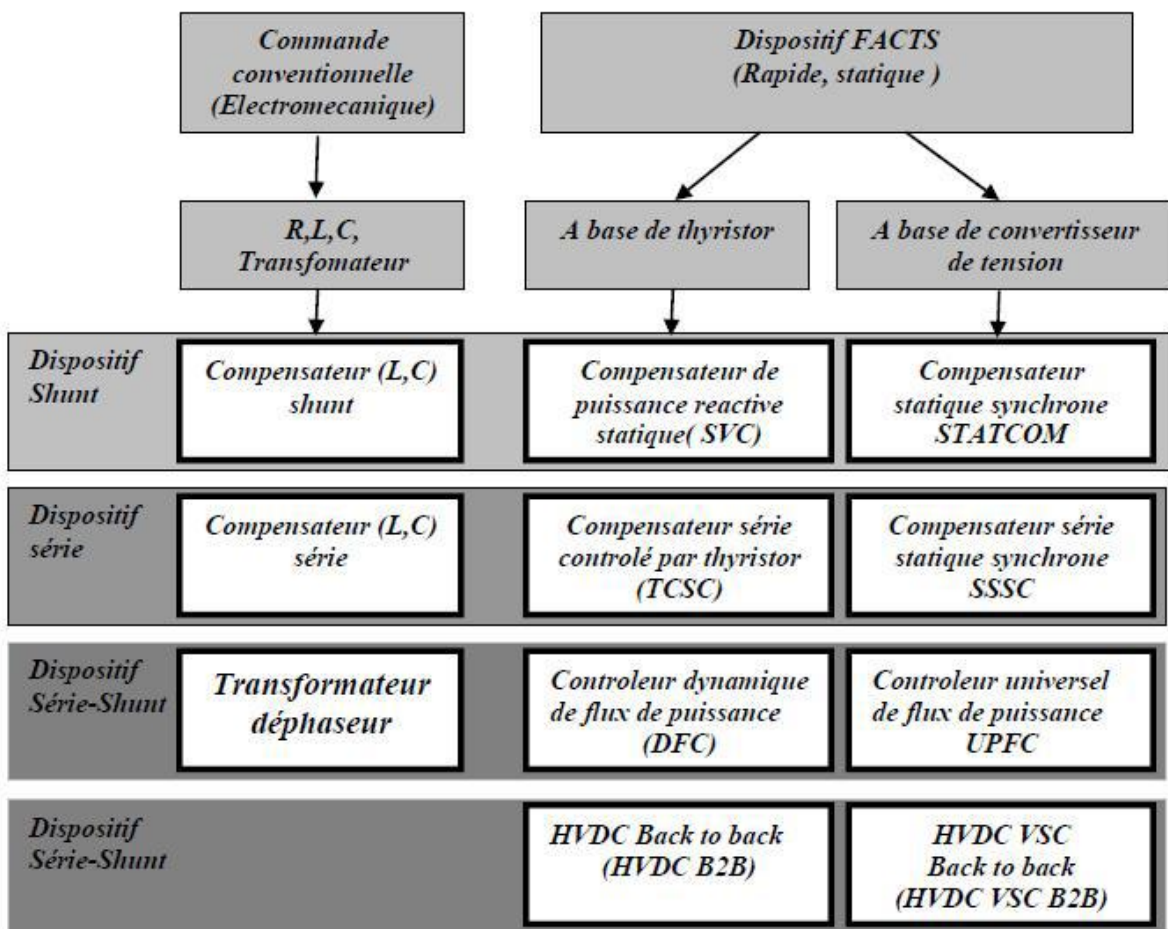


Figure II.28 : Principaux dispositifs des FACTS.

La colonne gauche présente les contrôleurs FACTS à base des thyristors ou bien 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 droite, sont des FACTS les plus avancées avec des convertisseurs de source de tension VSC (voltage source converter) à base des interrupteurs statiques sophistiqués IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors) ou bien les IGCT

(Insulated Gate Commutated Thyristors) tel que le STATCOM, SSSC et l'UPFC. Ces VSC fournissent ou injectent une tension totalement contrôlable en amplitude et en phase en série ou en parallèle dans le réseau. Chaque élément de ces colonnes peut être structuré selon sa connexion au réseau [8]

1/ Les dispositifs parallèles (shunt) :

En effet, tous les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme (ou injecte) un courant variable. Cette injection de courant modifie Les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne [11]. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

a) Compensateurs parallèles à basse thyristor : Il s'agit de :

➤ **TCR (Thyristor Controlled Reactor)**

Le TCR ou RCT : (Réactances Commandées par Thyristors), est une inductance branchée en série avec une valve à thyristors bidirectionnelles. La valeur de l'inductance est continuellement changée par l'amorçage des thyristors [11] [9].

➤ **TSC (Thyristor Switched Capacitor)**

Dans le TSC ou CCT : (Condensateurs Commandés par Thyristor), les thyristors fonctionnent en pleine conduction [11][9][15].

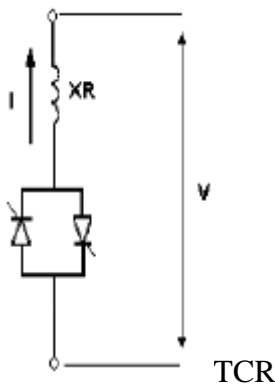


Figure II.29:structure de TCR.

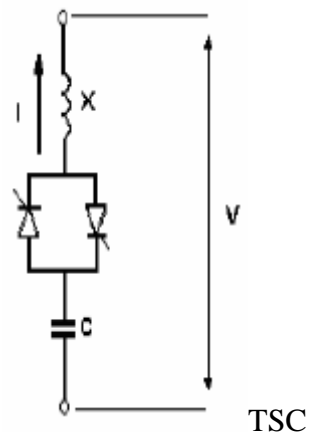


Figure II.30:structure de TSC.

➤ **SVC (Static Var Compensator) :**

L'association des dispositifs TCR, TSC, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique de puissance réactive) (CSPR). Pour augmenter ou diminuer la tension d'une ligne de transport, on peut brancher un condensateur ou une inductance shunt qui génère ou absorbe de la puissance

réactive. Cette manœuvre peut se faire automatiquement en utilisant un compensateur statique [9][11].

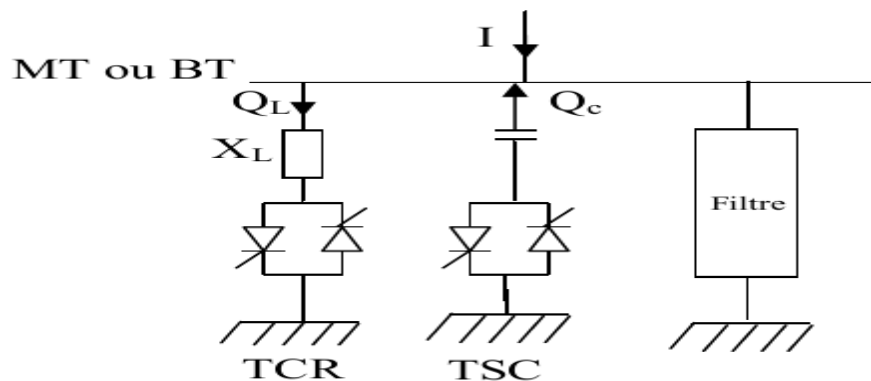


Figure II.31: Schéma équivalent d'un SVC.

➤ **TCBR** (Thyristor Control Breaking Resistor)

Ce type de compensateur se monte en parallèle, il est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau. La figure (II.32) représente un TCBR en parallèle avec un SVC équipé d'un banc de condensateurs et d'un filtre d'harmonique [10]

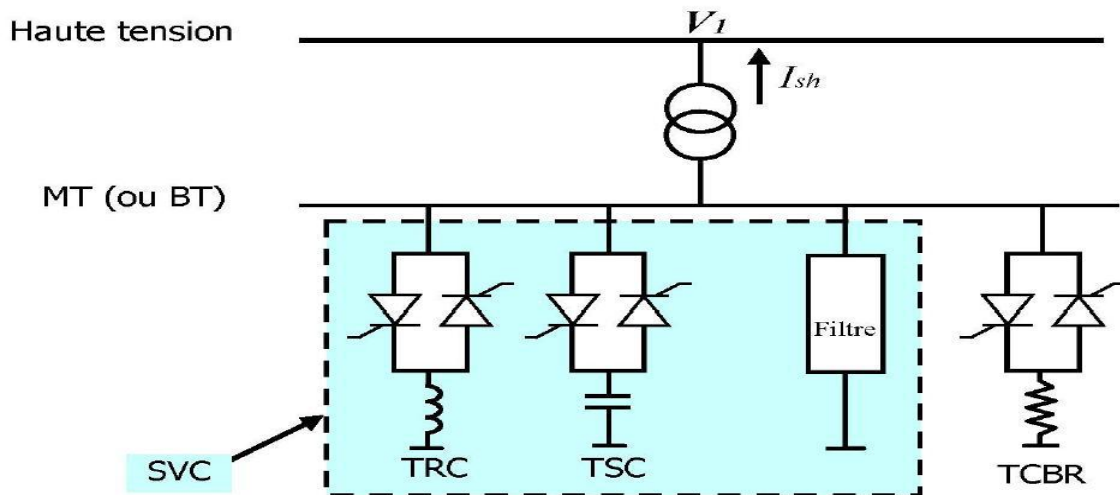


Figure II.32: schéma du SVC avec TCBR

b) Compensateurs parallèles à basse GTO (convertisseur de tension) :

Il s'agit de :

➤ **D-STATCOM** (STATIC COMPensator)

Ce type de compensateur shunt (compensateur statique synchrone) a connu jusqu'à présent différentes appellations :

- **ASVC** (Advanced Static Var Compensator) ;
- **SVG** (Static Var Generator);

- SVC light;
- SVC plus. [10]

C'est en 1990 que le premier D-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 (II.33-a)). Ce dispositif est l'analogie d'un compensateur synchrone; car il n'a pas d'inertie mécanique présente alors des meilleures caractéristiques telles que sa dynamique rapide, son faible coût d'installation et de sa maintenance devant les compensateurs synchrones.



Figure II.33 : D-STATCOM, (a) structure de base, (b) schéma équivalent

Le D-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 au jeu de barres (nœud de connexion) est très faible, d'après sa caractéristique en constate que le courant maximal du D-STATCOM est indépendant de la tension du nœud.

Pour un D-STATCOM idéal, n'ayant pas des pertes actives, l'équation (II.44) décrit le transfert de puissance réactive dans le réseau électrique. [67][68].

Si $|V_k| > |V_{sh}|$, Q_{sh} devienne positive et le D-STATCOM absorbe la puissance réactive.

Si $|V_k| < |V_{sh}|$, Q_{sh} devienne négative et le D-STATCOM fournie la puissance réactive.

$$Q_{sh} = \frac{|V_k|^2}{X_{sh}} - \frac{|V_k||V_{sh}|}{X_{sh}} \cos(\theta_k - \theta_{sh}) = \frac{|V_k|^2 - |V_k||V_{sh}| \cos(\theta_k - \theta_{sh})}{X_{sh}} \quad (II.44)$$

Dans le troisième chapitre ce filtre sera traité en détail.

II.2.2.3.3 Application des dispositifs FACTS dans les réseaux électriques :

Ces FACTS ont été intégrés depuis des années dans des réseaux où ils ont prouvé leur efficacité. Les tableaux (II.1) (II.2) résumant le rôle de chacun de ces dispositifs, ainsi que leur capacité de contribution pour différentes applications dans les réseaux électriques [16].

Tableau II.3 : 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 II.4 : 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

II.2.2.3.4 Fonctionnement des FACTS :

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive (courant réactif) 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 maximal transmissible.

Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques (c'est faux, car ils des sources d'harmoniques à cause des composants EP) et la stabilisation de la tension. L'ordre de grandeur de la puissance d'un FACTS va de quelque MVA à quelques centaines de MVA. Ils S'appliquent dans deux secteurs principaux :

- Réseau de transport.
- Réseaux Industriels.

1/ Réseau de transport

Pour améliorer le contrôle, augmenter la capacité des puissances transmissent et assister à la récupération du réseau suite à un défaut.

2/Réseaux Industriels

Pour améliorer la qualité de la puissance fournie en un point précis du réseau AC en présence de fluctuations de charge, compensation du flicker pour les fours à arc. Gamme de puissance inférieure à celle d'un réseau de transmission

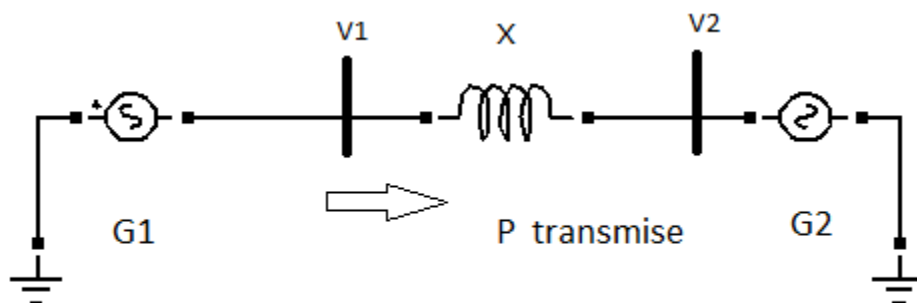


Figure II.34 : Puissance transitée entre deux réseaux.

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes solutions, traditionnelles et modernes, de réduction des harmoniques. Nous avons montré que la solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrements et de résonance. De plus, les filtres passifs ne peuvent pas s'adapter à l'évolution du réseau et aux charges polluantes. En revanche, la solution des filtres actifs parallèles et séries avec leurs combinaisons se présente comme la meilleure jusqu'à ce jour pour tous types de perturbations susceptibles d'apparaître dans le réseau électrique. En effet, profitant des progrès réalisés dans le domaine de l'électronique de puissance et de l'informatique industrielle, ces solutions peu encombrantes font preuve d'une grande flexibilité face à l'évolution du réseau électrique et des charges polluantes en rééquilibrage des tensions du réseau.

Ainsi, le choix de la topologie du filtre actif parallèle se présente comme la solution la plus standard pour le filtrage des courants harmoniques.

Chapitre III : Etude et modélisation du D-STATCOM

III.1 Introduction :

Actuellement, Les systèmes électriques de distribution d'énergie sont continuellement confrontés à des changements brutaux de la charge [81,79]. Lorsque l'équilibre entre l'offre et la demande de puissance réactive est perdu, le problème de la qualité de l'énergie se produit au niveau de la distribution. Cela a un impact négatif sur ce produit électrique qui, en retour, affecte les consommateurs industriels, résulte des grandes pertes financières et provoque un dysfonctionnement des équipements qui ont des performances très sensibles [80].

Le but principal du compensateur statique de la distribution (D-STATCOM) est de protéger le consommateur contre les chutes de la tension d'alimentation, surtensions ainsi qu'il assure un facteur de puissance égale l'unité au niveau du point de distribution pour des charges différentes.

Le D-STATCOM est une source de tension commandable inverseur connecté en shunt au réseau de distribution via un transformateur de couplage. Il peut échanger de la puissance réactive avec le système de distribution en faisant varier l'angle d'amplitude et de phase d'une source de tension interne par rapport à la tension aux bornes de ligne, ce qui entraîne la circulation du courant contrôlé à travers le transformateur de couplage. Il peut fournir une compensation de réponse rapide et souple de contrôle de tension au PCC pour l'amélioration du pouvoir de la qualité en systèmes de distribution. La fréquence de commutation élevée de commutateurs d'alimentation du modem, de concert avec plusieurs niveaux inverseur topologies rend fiable d'utiliser PWM commutation dans les applications de forte puissance. Il a été démontré que la réponse d'un D-STATCOM peut changer de son inductif complet à son côté capacitif complet dans un cycle. Cette rapidité sans précédent de réponse signifie qu'un tel dispositif est parfaitement adapté à l'application d'une charge variant rapidement [82].

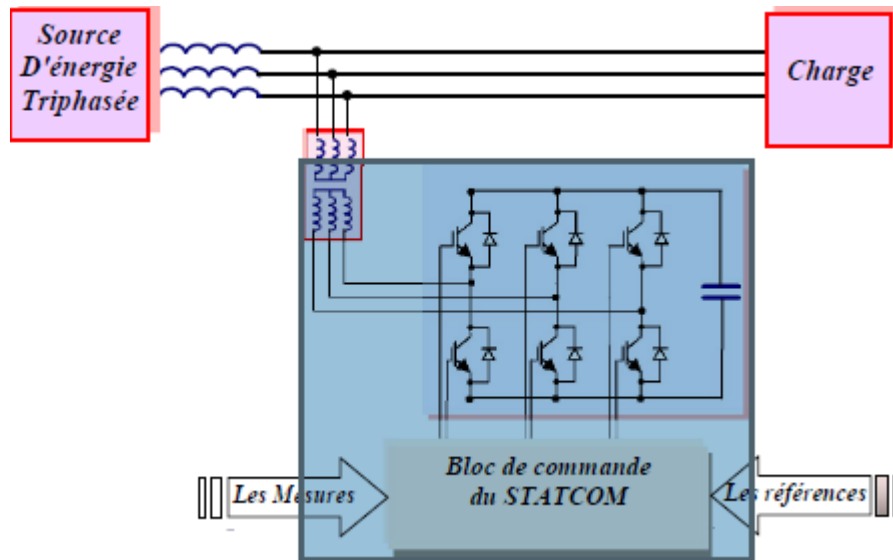


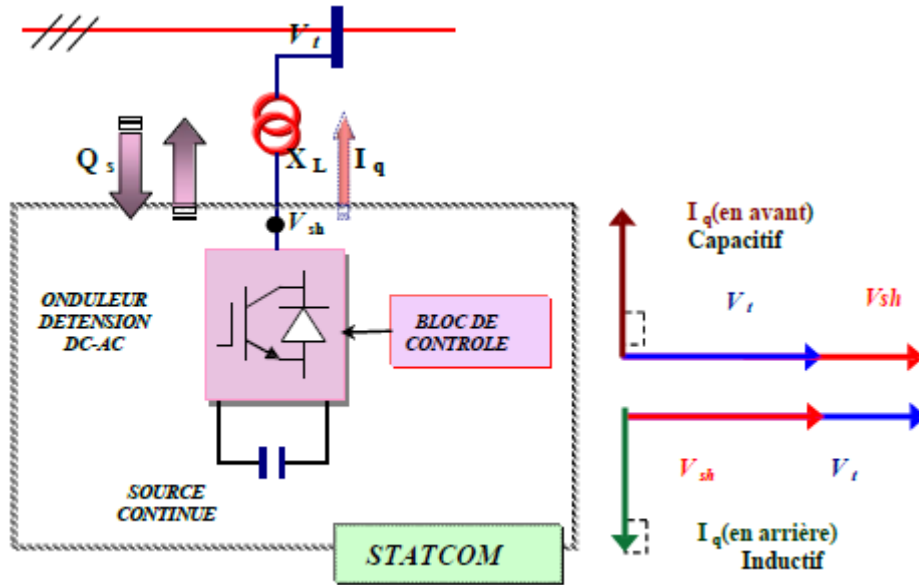
Figure III.1: Structure de base d'un D-STATCOM couplé au réseau.

III.2 Principe de fonctionnement du D-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 D-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 D- STATCOM peut être contrôlée afin d'ajuster la quantité de l'énergie réactive à échanger avec le réseau.

En général la tension du D-STATCOM V_{sh} est injectée en phase avec la tension V_t de la ligne, dans ce cas il n'y a pas d'échange de l'énergie active avec le réseau mais seulement la puissance réactive qui sera injectée (ou absorbée) par le D-STATCOM comme le résume la figure (III.2). [70]



$V_{sh} > V_t$ compensation capacitive

$V_{sh} < V_t$ compensation inductive

Figure III.2: Commande d'un D-STATCOM.

Considérons le D-STATCOM de la figure (III.1), le schéma équivalent de ce dispositif avec le système énergétique (source, ligne et charge) est donné par la figure (III.3).

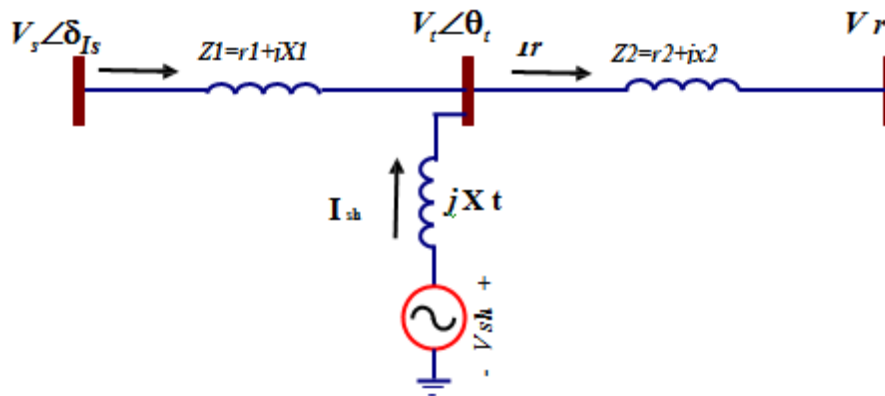


Figure III.3 : Schéma du D-STATCOM couplé au réseau électrique.

Le courant injecté par le D- STATCOM est donné par :

$$\bar{I}_{sh} = \frac{\bar{V}_{sh} - \bar{V}_t}{jX_t} \tag{III.1}$$

La puissance injectée au jeu de barre " t " est donnée par l'équation (III.2).

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

D'où on aboutit aux puissances active et réactive injectées par le D-STATCOM au jeu de barre " t " exprimées par les formules (III.3.a) (III.3.b).

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t \quad (\text{III.3.a})$$

$$Q_{sh} = V_t (V_{sh} \cdot \cos(\theta_t - \theta_{sh}) - V_t) / X_t \quad (\text{III.3.b})$$

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

$$P_{sh} = -V_t V_{sh} \cdot \sin(\theta_t - \theta_{sh}) / X_t = 0 \quad (\text{III.4})$$

$$\theta_t - \theta_{sh} = 0 \quad \Rightarrow \quad \theta_t = \theta_{sh} \quad (\text{III.5})$$

D'où la condition:

D'après cette condition la tension injectée par le D-STATCOM V_{sh} doit être en phase avec la tension du jeu de barre de raccordement. [70][71]

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

Comme les tensions V_{sh} et V_t sont en phase, le courant I_{sh} du D-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 (III.6)

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

$$|I_{sh}| = I_{sh} = \frac{V_{sh} - V_t}{X_t} \quad (\text{III.6})$$

$$Q_{sh} = V_{sh} I_{sh} = \frac{V_{sh}^2}{X_t} \left(1 - \frac{V_t}{V_{sh}}\right) \quad (\text{III.7})$$

A partir de l'équation (III.1), il paraît clair que si le module de la tension du D-STATCOM V_{sh} égale le module de la tension V_t du réseau aucun transfert de l'énergie n'est effectué.

Si $V_{sh} > V_t$, donc $Q_{sh} > 0$, le D-STATCOM fonctionne en mode capacitif et fournit une puissance réactive au réseau comme montre la figure (III.4), et si $V_{sh} < V_t$ alors $Q_{sh} < 0$, le

STATCOM dans ce cas absorbe la puissance réactive à partir du réseau et fonctionne en mode inductive, voir figure (III.5). [67]

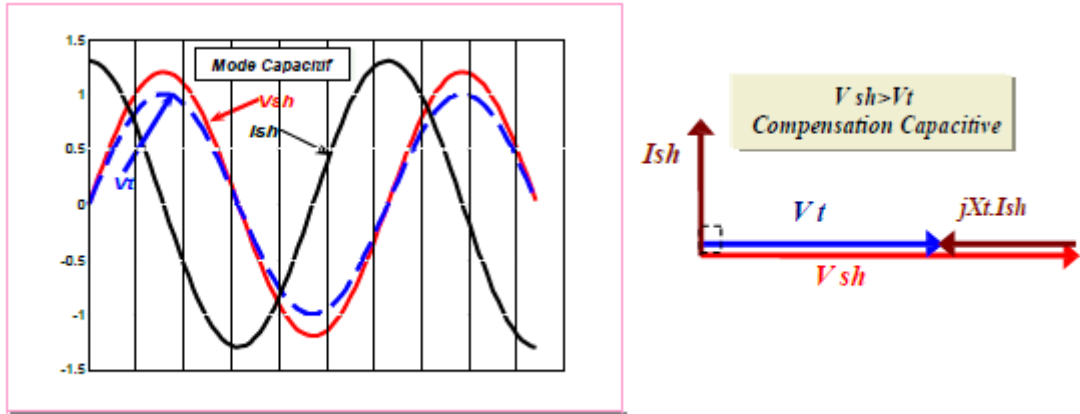


Figure III.4 : Courbes simulées courant et tension en mode capacitif.

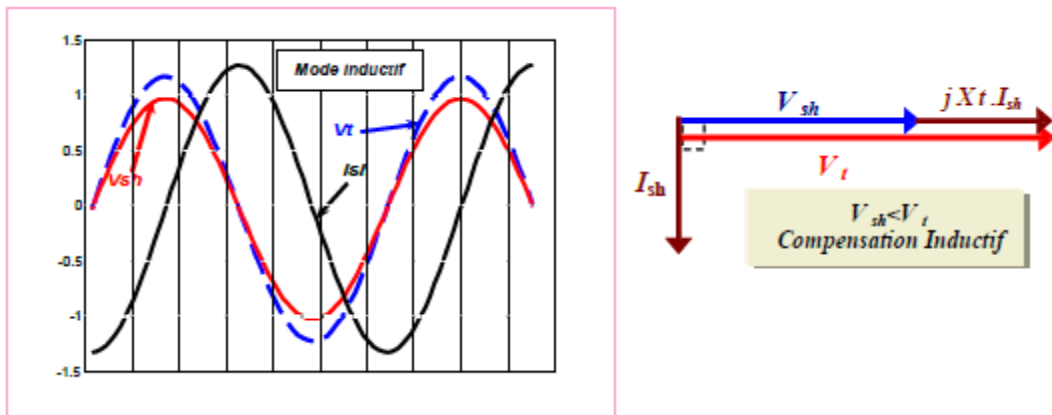


Figure III.5 : Courbes simulées courant et tension en mode inductif.

NB: La puissance nominale du D-STATCOM dépend de la puissance réactive demandée pour la compensation au point de connexion. Le calcul de la répartition de charge (écoulement de puissance) détermine la tension du jeu de barre à réguler et la quantité de la puissance réactive nécessaire pour atteindre cet objectif.

III.3 Effet de la compensation shunt (D-STATCOM) sur le réseau électrique:

Pour étudier les relations entre le réseau électrique et le D-STATCOM on va adopter pour cela le modèle mathématique de la figure (III.3) qui représente le schéma unifilaire d'un D-STATCOM couplé au nœud d'un réseau électrique. Les équations des courants I_s , I_{sh} et I_r sont données par les équations (III.8), (III.9) et (III.10) respectivement.

$$\bar{I}_s = \frac{(\bar{Z}_2 + jX_t) \cdot \bar{V}_s - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.8)$$

$$\bar{I}_{sh} = \frac{-\bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_s \cdot (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.9)$$

$$\bar{I}_r = \frac{jX_t + \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_{sh} - (\bar{Z}_1 + jX_t) \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \quad (III.10)$$

Les puissances injectées par la source V_s peuvent être calculée à partir des équations (III.11) et (III.12): [73]

$$P_S = R_e(\bar{V}_S \cdot \bar{I}_S^*) = R_e \left[\bar{V}_S \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t) \cdot \bar{V}_S - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (III.11)$$

$$Q_S = \text{Im}(\bar{V}_S \cdot \bar{I}_S^*) = \text{Im} \left[\bar{V}_S \times \left(\frac{(\bar{Z}_2 + jX_t) \cdot \bar{V}_S - \bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_{sh} - jX_t \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_2 + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (III.12)$$

En visualisant sur la courbe de la figure (III.6) la variation des puissances actives (P_s) et réactives (Q_s) délivrées par la source pour différentes valeurs de la tension V_{sh} injectée par

Le D-STATCOM, on voit que la puissance réactive Q_s diminue (*compensée*) ce qui explique l'augmentation du réactive injectée par le compensateur shunt dans le réseau. [71][72]

Par exemple, sur la même courbe de la figure (III.6), afin de transmettre une puissance active P_s égale à 1.0 p.u, la puissance réactive Q_s transmise dans la même ligne doit être égale à 0.8 p.u si la tension à la sortie de l'onduleur V_{sh} est égale à 0.2 p.u.

Par contre Q_s diminue jusqu'à 0.13 p.u si la tension injectée $V_{sh}=1.1$ p.u pour transmettre la même quantité de la puissance active P_s .

Les puissances délivrées par le D-STATCOM données par les équations (III.13) et (III.14) sont présentées sur la figure (III.6).

(P_s, Q_s) : Puissances active et réactive en p.u produite par la source;

(P_{sh}, Q_{sh}) : Puissances active et réactive en p.u générées par le dispositif D-STATCOM

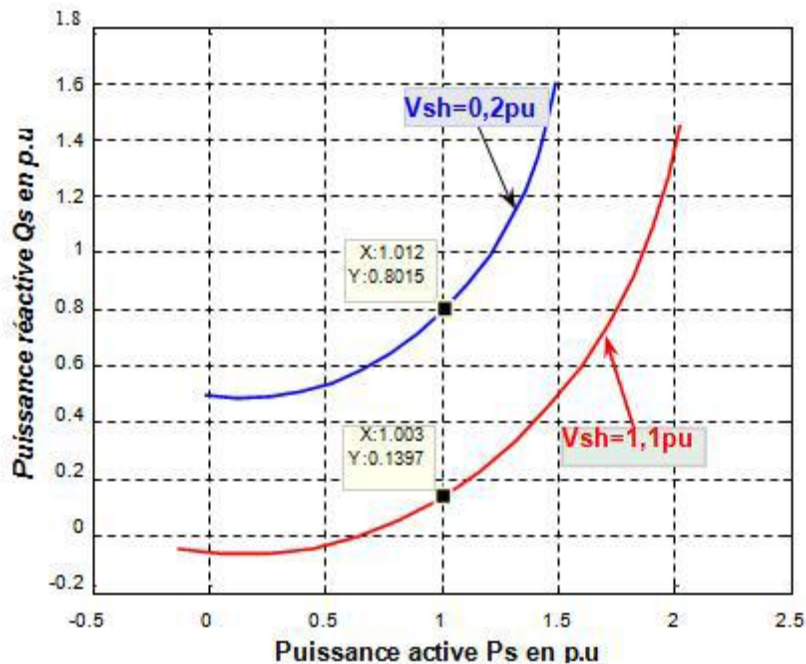


Figure III.6 : Q_s en fonction de P_s pour différentes valeurs de V_{sh}

$$P_{sh} = \text{Re}(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = \text{Re} \left[\bar{V}_{sh} \times \left(\frac{-\bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_s \cdot (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_s + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (\text{III.13})$$

$$Q_{sh} = \text{Im}(\bar{V}_{sh} \cdot \bar{I}_{sh}^*) = \text{Im} \left[\bar{V}_{sh} \times \left(\frac{-\bar{Z}_2 \cdot \bar{V}_s \cdot (\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2) \cdot \bar{V}_{sh} - \bar{Z}_1 \cdot \bar{V}_r}{\bar{Z}_1 \cdot \bar{Z}_s + jX_t(\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2)} \right)^* \right] \quad (\text{III.14})$$

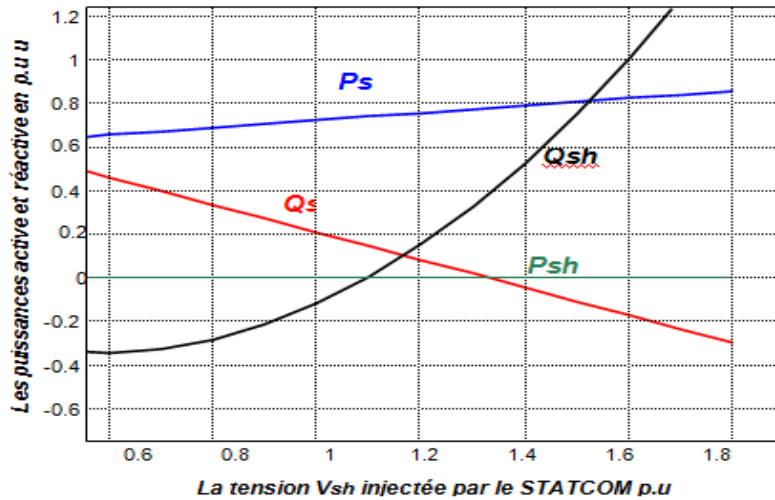


Figure III.7: Ps, Qs, Psh et Qsh en fonction de Vsh

Sur les caractéristiques de la figure (III.7) qui représentent la variation des puissances active et réactive Ps et Qs transportées par la ligne ainsi que les puissances active et réactive injectées par le D-STATCOM Psh et Qsh, en fonction des variations de l'amplitude de la tension Vsh il paraît clair que l'influence de cette tension sur la puissance réactive Qs est plus grand que sur la puissance active Ps. Et on voit qu'en augmentant la tension Vsh la puissance réactive injectée par le D-STATCOM augmente, et par conséquent la puissance réactive injectée au réseau par le générateur diminue.

Nous pouvons constater aussi que la capacité de transit de la puissance active est améliorée. Celle-ci était occupée par la puissance réactive. [70][72]

Donc, pour améliorer le transfert de puissance à travers des lignes importantes, il faut disposer de compensateur shunt installé de façon appropriée. Cependant, généralement les compensateurs shunts ne sont pas utilisés pour cette fonction qui est plutôt mieux satisfaite par les compensateurs série qui produisent le même résultat pour un coût meilleur.

III.4 Modélisation d'un D-STATCOM :

III.4.1 Modèle Mathématique Simplifié:

Le D- STATCOM comme il était déjà décrit précédemment, peut être représenté par le

Schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure (III.1) en tenant compte uniquement du jeu de barre où est connecte ce dispositif:

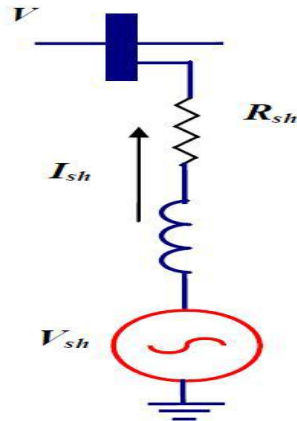


Figure III.8: Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau.

Pour le modèle simplifié du D-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 de ce dispositif est donc une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance \$L_{sh}\$ figure (III.8) à travers un 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. [73][74]

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

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh} \bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (III.15)$$

Où les grandeurs en triphasé sont :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \text{ et } \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe \$(\alpha, \beta)\$ on multipliant l'équation (III.15) par la matrice de la transformation de CLARK suivante:

$$T_{\alpha\beta} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

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(III.9). Donc :

$$\bar{U}_{(dq)} = \bar{U}_{(\alpha\beta)} \cdot e^{-j\gamma} \quad (III.18)$$

Et inversement

$$\bar{U}_{(\alpha\beta)} = \bar{U}_{(dq)} \cdot e^{j\gamma} \quad (III.19)$$

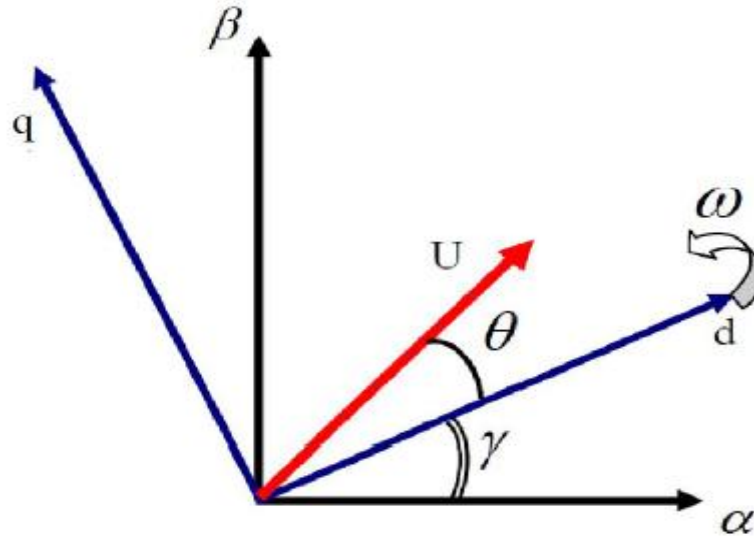


Figure III.9: Passage du repère (α, β) vers le repère (d, q).

En appliquant cette écriture sur l'équation (III.15) on aura:

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} e^{j\gamma} = R_{sh} \bar{I}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma} + L_{sh} \frac{d}{dt} (\bar{I}^{(d,q)} \cdot e^{j\gamma}) \quad (III.20)$$

Après simplification de calcul en aboutit aux équations dynamiques du D-STATCOM dans le repère (d, q) suivante:

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (III.21)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (III.22)$$

Sous forme matricielle on écrit le système d'état du D-STATCOM comme suit:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (III.23)$$

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

III.4.2 Modèle mathématique en considérant le circuit DC :

Le modèle simplifié est dérivé sous l'hypothèse d'aucune variation de la tension continue U_{dc} durant les petits 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. [73][75]

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(III.10) [74] [76]. On suppose que :

$$V_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + j V_{shq} = v \cos \theta + j v \sin \theta \tag{III.24}$$

v : étant le module de la tension injectée qui dépend directement de la tension continue U_{dc} et peut être exprimé par: $v = m \times U_{dc}$

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

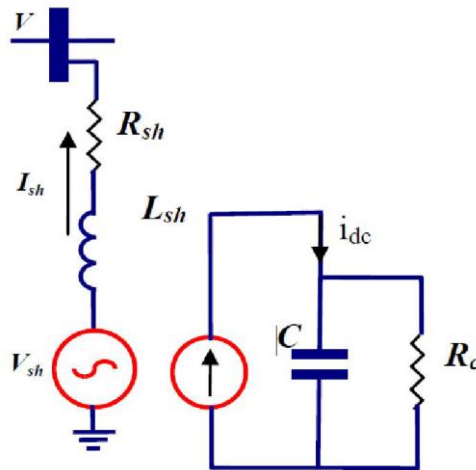


Figure III.10 ; Schéma équivalent du D-STATCOM avec Circuit DC.

En substituant les équations (III.24) et (III.25) dans les équations (III.21) et (III.22) on aboutit aux équations:

$$V_d - mU_{dc} \cos \theta = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \tag{III.25}$$

$$V_q - mU_{dc} \sin \theta = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \tag{III.26}$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (III.28) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (III.29):

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \tag{III.27}$$

$$U_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (III.28)$$

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} .

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (III.29)$$

De ces équations (III.24), (III.25), (III.29) et (III.30) on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du D-STATCOM suivante:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{shd} \cos \theta - I_{shd} \sin \theta) - \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (III.30)$$

Les équations (III.26) (III.27) (III.31) forme le système d'équation d'état du D-STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta \\ \frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{3m}{2c} \sin \theta & -\frac{1}{R_{dc} c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (III.31)$$

On peut observer qu'il y a deux paramètres de commande dans ce système avec trois paramètres d'état à contrôler et uniquement deux grandeurs peuvent être commandés indépendamment. Ce système qu'on doit le ramener linéaire autour d'un point de fonctionnement sera de la forme suivante [73] [74]:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos \theta_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin \theta_0 \\ \frac{3m}{2c} \cos \theta & -\frac{3m}{2c} \sin \theta_0 & -\frac{1}{R_{dc} c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin \theta_0 \\ \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \cos \theta_0 \\ -\frac{2m}{3c} (I_{shd} \sin \theta + I_{shd} \cos \theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (III.32)$$

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. [73][77].

III.5 Contrôle du D- STATCOM :

Dans la totalité des applications pratiques le D-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}^* , qui est

l'image de la puissance à compensée. Ces courants (I_{shd}^* , I_{shq}^*), I sont donc les grandeurs de références du D-STATCOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées.

III.5.1 Détermination des Références:

Les puissances injectées par le D-STATCOM sont la puissance réactive Q_{shd}^* calculée en fonction de la chute de tension et la puissance active $P_{sh}^* \approx 0$ représentant les pertes joules dans le circuit continu et des interrupteurs dans l'onduleur. [72][78]

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

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{shd}^* \\ Q_{shd}^* \end{bmatrix} \tag{III.33}$$

Où 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 (III.11).

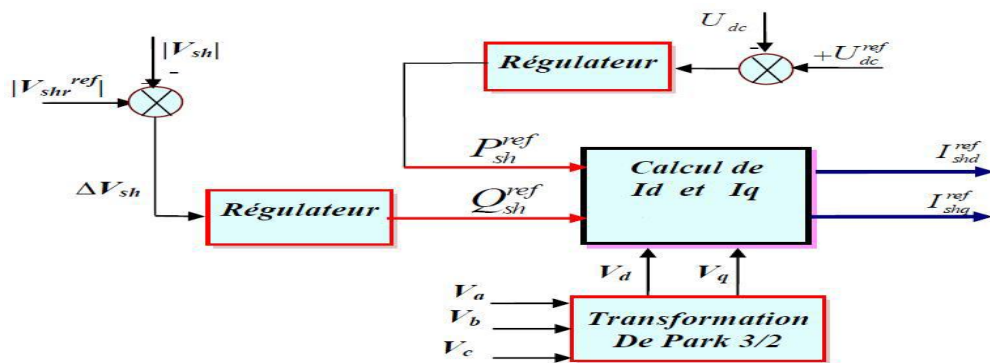


Figure III.11 : Identification des Courants de Référence.

III.5.2 Méthode Watt-Var découplée :

Considérant le modelé simplifié représenté par le système d'équation (III.23) précédent:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \tag{III.34}$$

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

$$\frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \tag{III.35}$$

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 (III.23) on aura :

$$\frac{dI_{shd}}{dt} = -\frac{R_{sh}}{L_{sh}} I_{shd} + \omega I_{shq} + X_1 \tag{III.36}$$

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

$$\left(s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}\right) I_{shd} = \omega I_{shq} + X_1 = \tilde{X}_1 \quad (III.37)$$

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

$$\frac{I_{shd}}{\tilde{X}_1} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (III.38)$$

Notre commande en réalité est en X_1 et comme $\tilde{X}_1 = \omega \cdot I_{shq} + X_1$, on doit 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 (III.12) suivante:

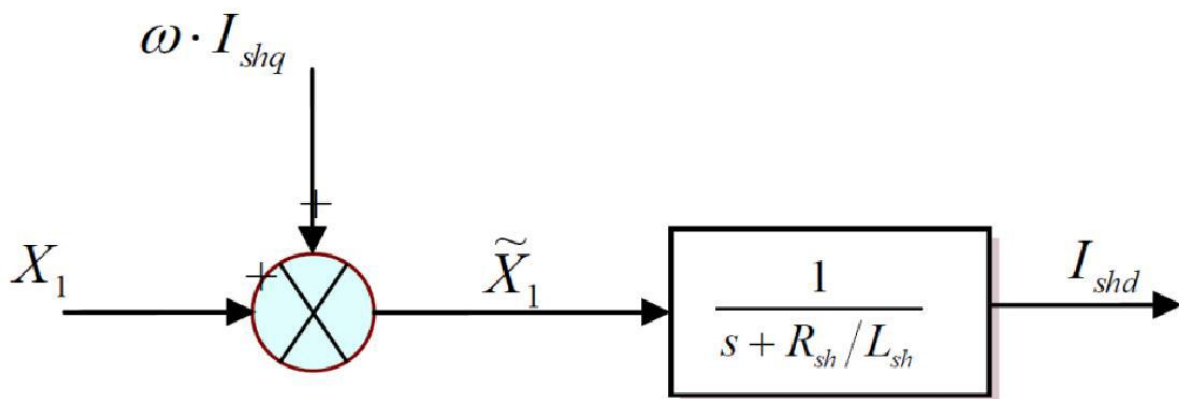


Figure III.12 : Transfert du I_{shd} en fonction de X_1 .

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:

$$\frac{I_{shq}}{\tilde{X}_2} = \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \quad (III.39)$$

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

Le schéma suivant résume ce transfert:

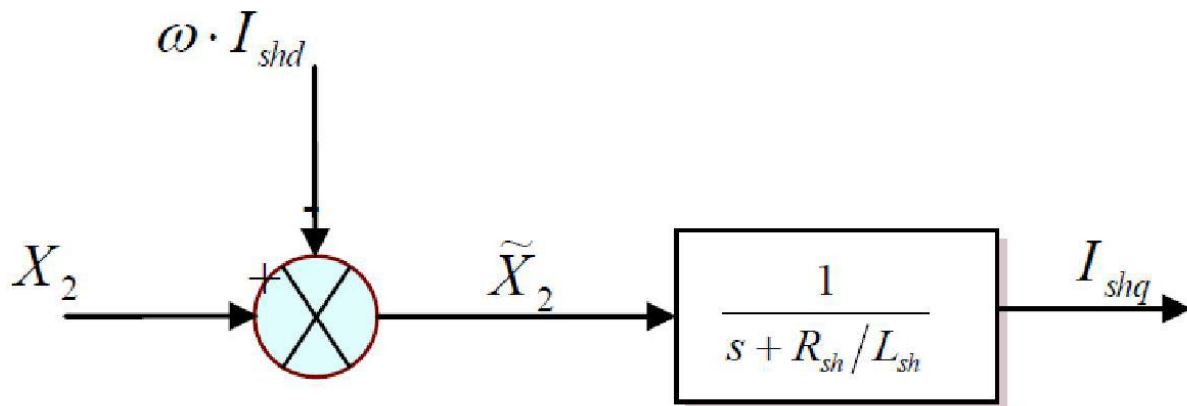


Figure III.13 : Transfert I_{shq} en fonction de X_2 .

De ce qu'on vient de voir on constate 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 régulateurs PI on peut contrôler les courants de sortie du D-STATCOM et les faires suivre leurs consignes et comme le représente le schéma bloc de la figure (III.14).

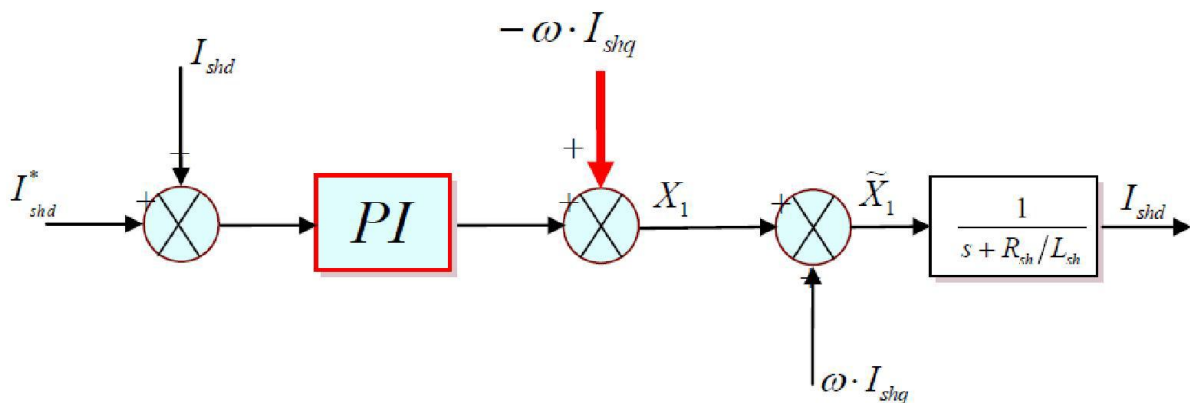


Figure III.14 : Régulation et découplage de I_{shd} .

De la même pour le courant réactif on doit ajouter la composante et finalement arriver au schéma de régulation du D-STATCOM par la méthode Watt-Var découplée de la figure (III.15).

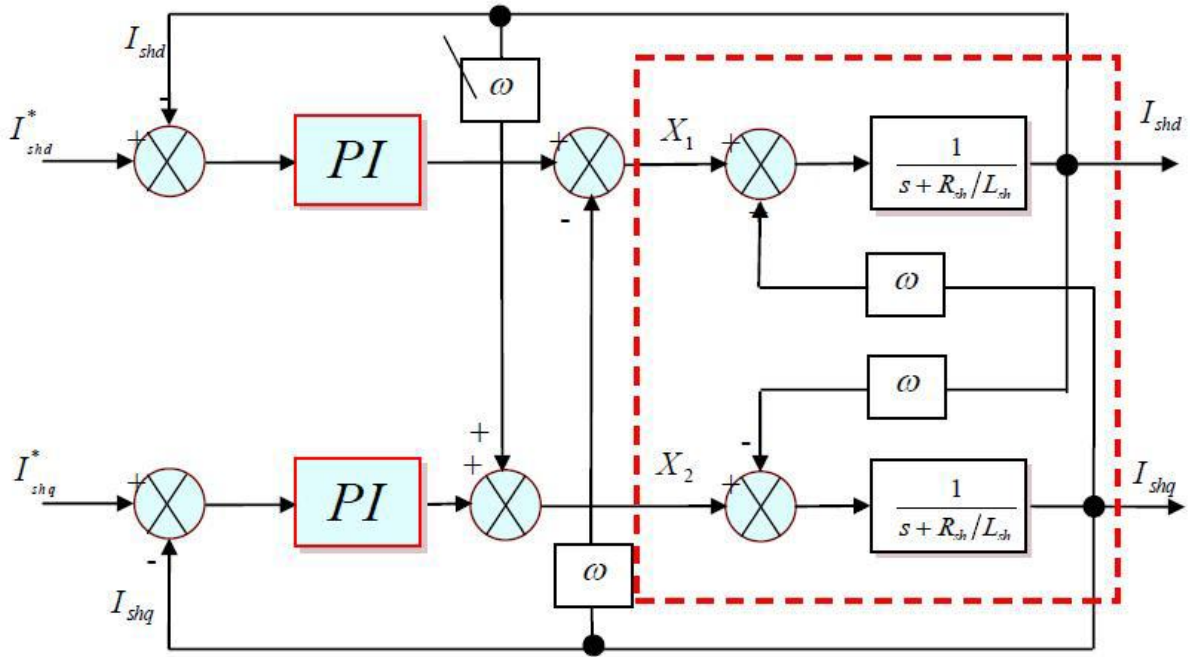


Figure III.15 : Schéma de Régulation du D-STATCOM (Watt-Var découplé).

III.5.3 Régulateur PI avec compensation de pôles:

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du D-STATCOM des régulateurs Proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure (III.16) :

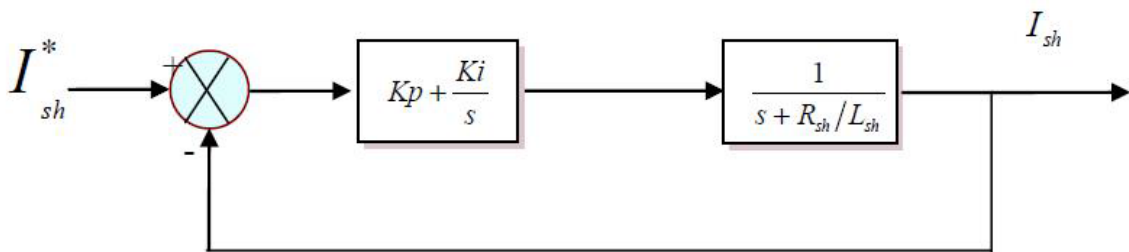


Figure III.16 : Schéma bloc de la Régulation PI des courants du D-STATCOM.

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

$$G(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) = K_p \left(\frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left(\frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) \tag{III.40}$$

Et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \tag{III.41} \quad \text{et}$$

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:

$$F(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{K_p}{s+K_p} = \frac{1}{T_{BF}(s)+1} \quad (III.42)$$

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

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 de 1/3 du temps de réponse en boucle ouverte) on déterminera à l'aide des équations (III.41)

(III.42) les gains du contrôleur PI.

$$K_p = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \text{ et } K_i = K_p \times \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (III.43)$$

III.5.4 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 D-STATCOM qui traduira l'absorption ou la fourniture d'une puissance active sur le réseau. La puissance échangée avec le condensateur peut être exprimée par l'équation (III.44). [72] [74] [78].

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} \Rightarrow \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2 \cdot P_{sh}}{C} \quad (III.44)$$

En passant au domaine fréquentiel (Laplacien) on aura :

$$\frac{U_{dc}^2}{P_{sh}} = \frac{2}{C \cdot s} \quad (III.45)$$

Pour obtenir le signal nous avons le choix entre un régulateur proportionnel et un régulateur proportionnel intégral. Ce dernier est souvent préférable du fait qu'il permet d'annuler l'erreur statique.

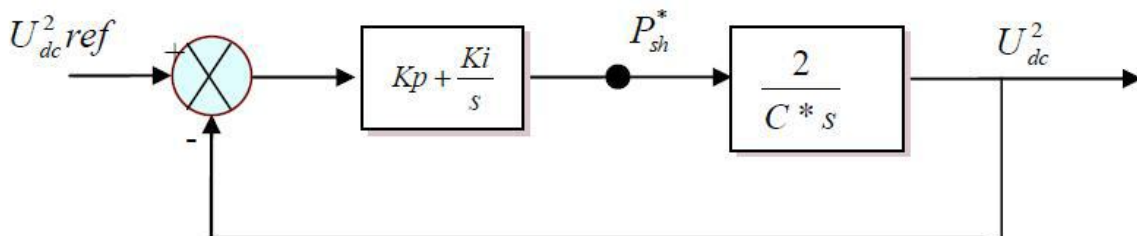


Figure III.17 : Régulation de la tension continue U_{dc} .

La fonction de transfert en boucle fermée de ce système sous forme de Bode est :

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dcref}^2} = \frac{\frac{2.K_p}{C}s + \frac{2.K_i}{C}}{s^2 + \frac{2.K_p}{C}s + \frac{2.K_i}{C}} \quad (\text{III.46})$$

$$\text{Avec } \omega_n^2 = \frac{2.K_i}{C}, \quad \varepsilon = K_p \cdot \sqrt{\frac{1}{2.C.K_i}} \quad (\text{III.47})$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi $\varepsilon = 0.7$. Et à fin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir $\omega_n = \frac{2\pi \cdot 300}{10}$ rad/sec et finalement on détermine à partir des équations (III.47) les valeurs des gains k_p et k_i .

III.6 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation de D-STATCOM pour contrôler et régler la tension par la compensation de l'énergie réactive.

La validation du fonctionnement et la qualité de compensation du D-STATCOM seront justifiées par la simulation achevée dans le prochain chapitre.

CHAPITRE IV :
résultats de simulation
du D-STATCOM

IV.1 Introduction :

Le réseau électrique est exposé aux différentes perturbations telles que l'augmentation de la charge, augmentation ou diminution de la tension, ... Le «D- STATCOM » est utilisé pour rendre l'équilibre de tension au réseau, ou compenser la puissance réactive.

Dans ce chapitre, on va étudier le comportement dynamique du « D-STATCOM » vis à vis des perturbations de tension et de puissance réactive. Le comportement du « D-STATCOM » sera vérifié par des simulations en utilisant MATLAB/Simulink.

Afin de surmonter les perturbations de tension, plusieurs modèles de compensateur statique de distribution (D-STATCOM) ont été proposées et des analyses statiques et dynamiques ont été publiées. Cependant, la plupart de ces analyses examinent le réglage de la tension ou du facteur de puissance au niveau de la charge. Cette simulation traite le fonctionnement d'un (D-STATCOM) avec la stratégie de contrôle MLI. Ce dispositif de distribution est alimenté par un condensateur de stockage DC.

Notre D-STATCOM est conçu pour renforcer la fiabilité et la qualité de l'énergie électrique dans les réseaux de distribution. Une étude analytique d'écoulement de la puissance active et réactive entre (D-STATCOM) et le système (source, charge) est introduite dans ce travail. Cette analyse joue un rôle important pour mieux comprendre le fonctionnement (D-STATCOM) ainsi qu'il apporte des informations utiles sur les dimensionnements des composants du (D-STATCOM).

Pour examiner la performance du D-STATCOM contre les creux de tension et les surtensions, une charge fixe est connectée à la ligne de distribution et des lourdes charges capacitatives et inductives sont connectées aux instants précis, cette variation de la charge conduit à une perturbation de tension, le schéma du système est illustré dans la figure IV.1.

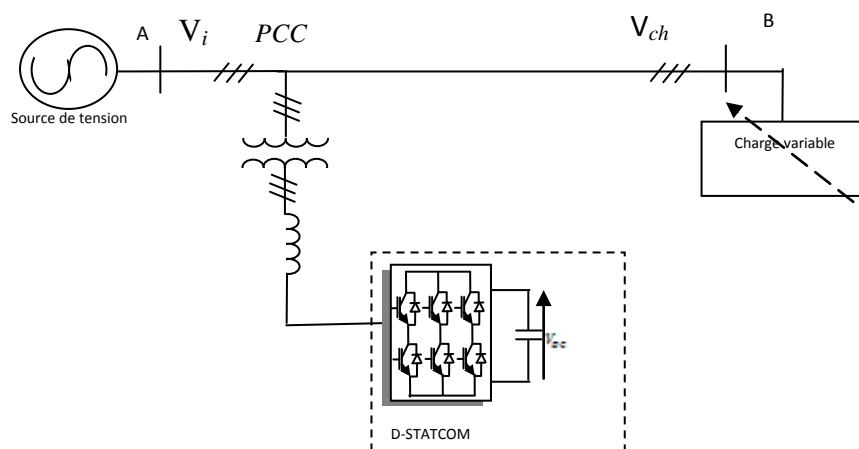


Figure IV.1: D-STATCOM avec une charge variable.

Le fonctionnement du (D-STATCOM) est de détecter à la fois les courants les tensions de charge, ensuite extraire la puissance réactive demandée par la charge afin de générer les courants de références i_c^* (la méthode p-q), un bloc-diagramme du système est illustré dans la figure IV.4. Le courant de référence consiste de composante réactive du courant de charge que le (D-STATCOM) doit les fournir. Ces courants de références sont transmis à un contrôleur et puis un train d'impulsions est généré pour commander l'ouverture et la fermeture les interrupteurs de puissance du convertisseur de telle sorte que le D-STATCOM produira l'énergie réactive exigée par le réseau.

Figure IV.2 montre le système à tester en utilisant l'environnement Matlab-Simulink. Ce système comprend un réseau de distribution (à 11kV et 50Hz) et alimente une charge variable. Un D-STATCOM est connecté au réseau par un transformateur Y / Y, 5/11/100 kVA afin de fournir l'énergie réactive. Un condensateur 4,4 mF sur le côté courant continu assure le stockage d'énergie pour le D-STATCOM.

Dans le but de montrer l'efficacité de ce contrôleur pour la régulation permanente de la tension, l'étude de simulation est effectuée avec et sans D-STATCOM.

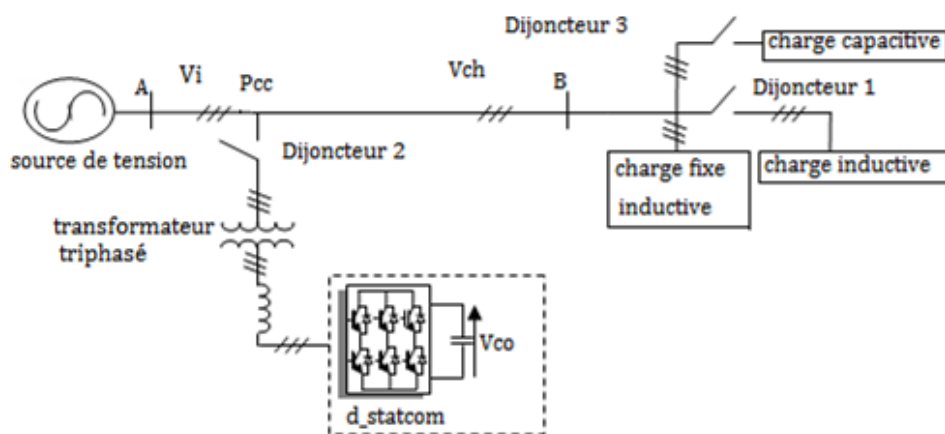


Figure IV.2 : Système modélisé dans Simulink.

I. Résultats du Simulation :

Cas 1: chute de tension

Initialement, une charge inductive fixe est connectée au point B, la tension triphasée est diminuée de la tension de référence de 3% environ.

Deuxièmement, le disjoncteur -1- est fermé à l'instant $t = 0,4$ s, ce qui permet à la charge inductive (lourde) de se connecter au point B. La tension de distribution diminue avec 11%. La forme d'onde de la tension triphasée de la charge est présentée dans la figure IV.3.

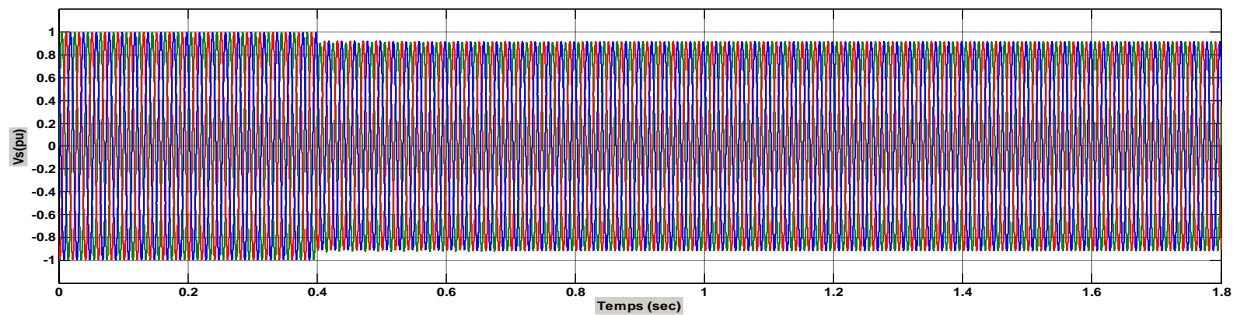


Figure IV.3 : Simulation de la tension de la charge en (p.u) sans D-STATCOM, cas chute de tension.

Pour la deuxième simulation, les mêmes conditions précédentes sont maintenues et le disjoncteur -2- est fermé lors du premier cycle. (D-STATCOM) est connecté en parallèle avec le réseau à travers un transformateur. A cause du courant réactif I_c injecté par D-STATCOM, la tension d'alimentation est restaurée à sa valeur référence 11 kV (1p.u.), comme le montre les Figures IV.4 et IV.5.

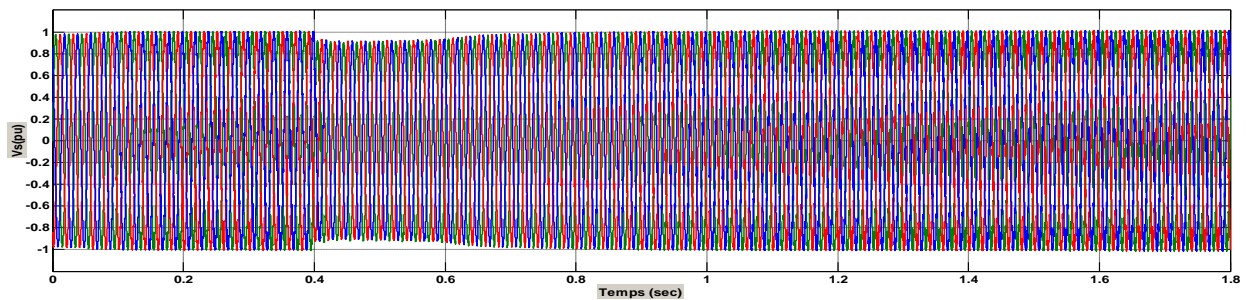


Figure IV.4 : Simulation de la tension de la charge en (p.u) avec D-STATCOM, cas chute de tension.

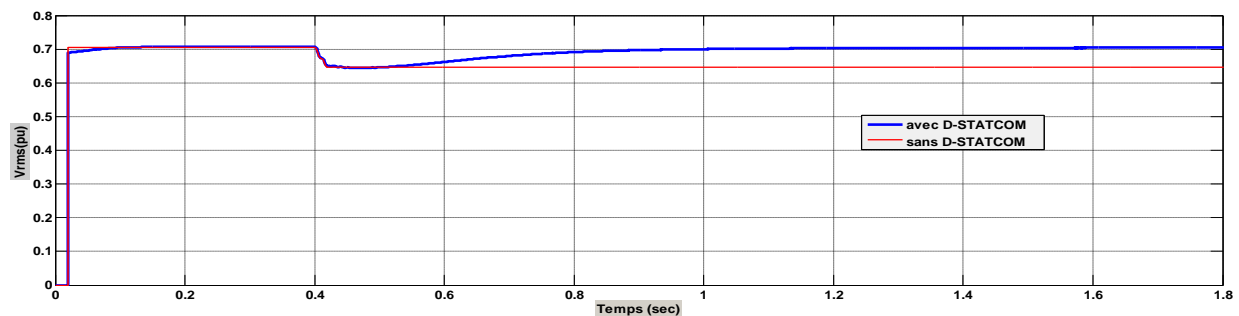


Figure IV.5 : Valeur efficace de la tension de la charge en (p.u) avec et sans D-STATCOM.

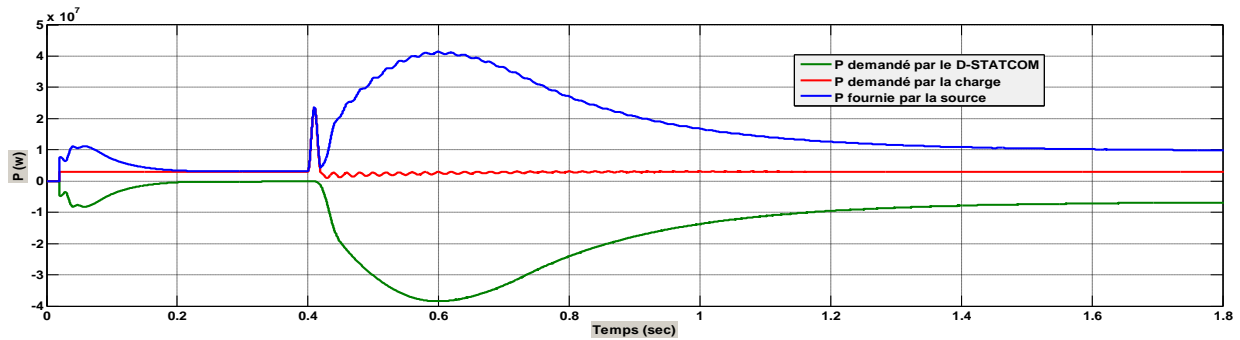


Figure IV.6 : Puissances actives écoulées entre les parties de système durant la chute de tension.

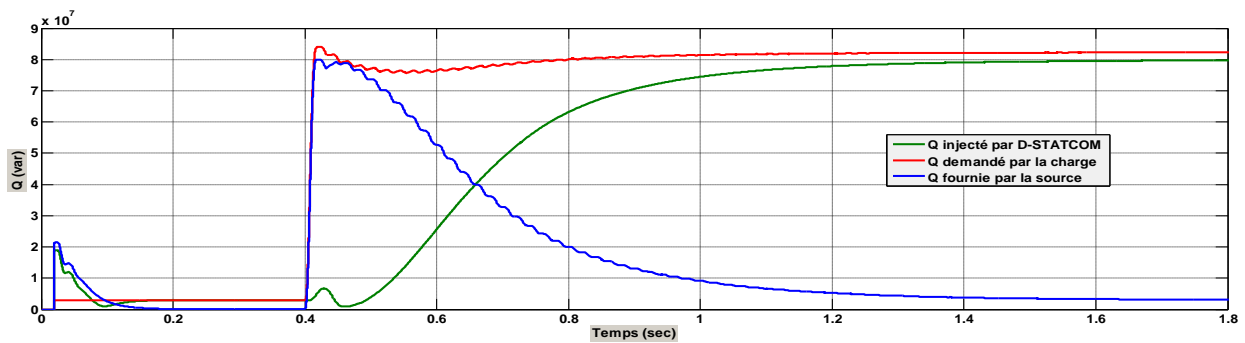


Figure IV.7 : Puissances réactives écoulées entre les parties de système durant la chute de tension.

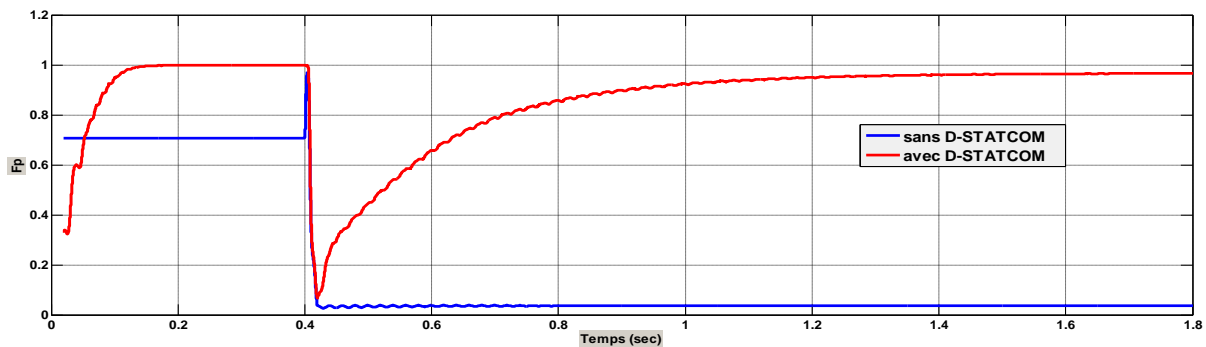


Figure IV.8: Valeur du facteur de puissance à côté de la charge avec et sans D-STATCOM.

Cas 2: Surtension

Dans ce cas, au lieu d'une chute de tension, une surtension se produit dans le réseau par l'implantation d'une charge capacitive à $t = 0.4s$. Par conséquent, les tensions des trois phases a, b, c sont augmentées de 97% à 111% par rapport à la valeur nominale, comme le représente la figure IV.9.

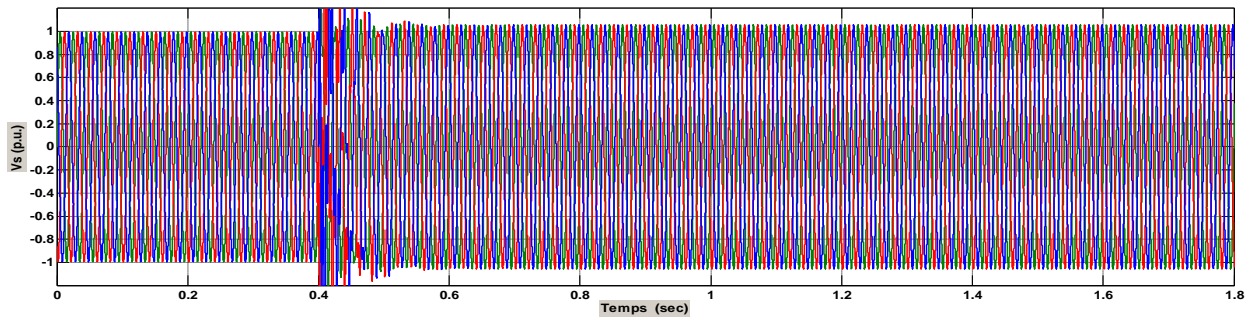


Figure IV.9: Simulation de la tension de la charge en (p.u) sans D-STATCOM, cas surtension.

Maintenant considérons le cas où D-STATCOM est connecté en parallèle au réseau, un courant réactif est absorbé par le D-STATCOM (il se comporte comme une inductance) afin de maintenir la tension d'alimentation à 1p.u comme le indique les figures IV.12 et IV.13.

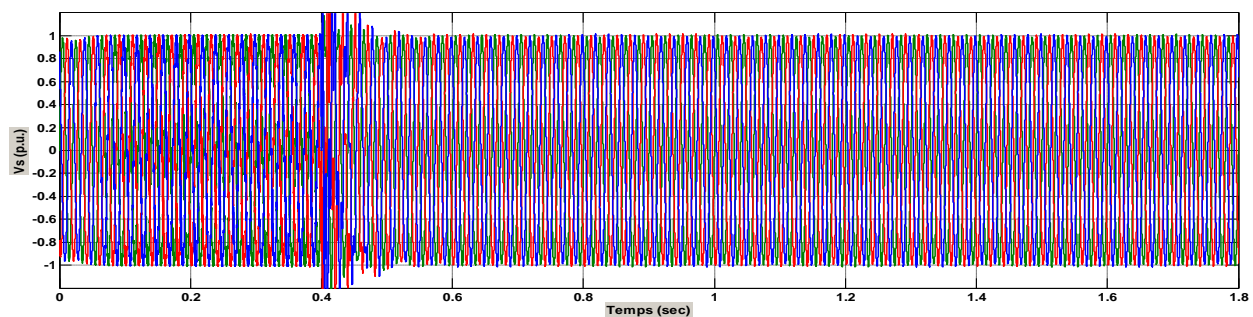


Figure IV.10: Simulation de la tension de la charge en (p.u) avec D-STATCOM, cas surtension.

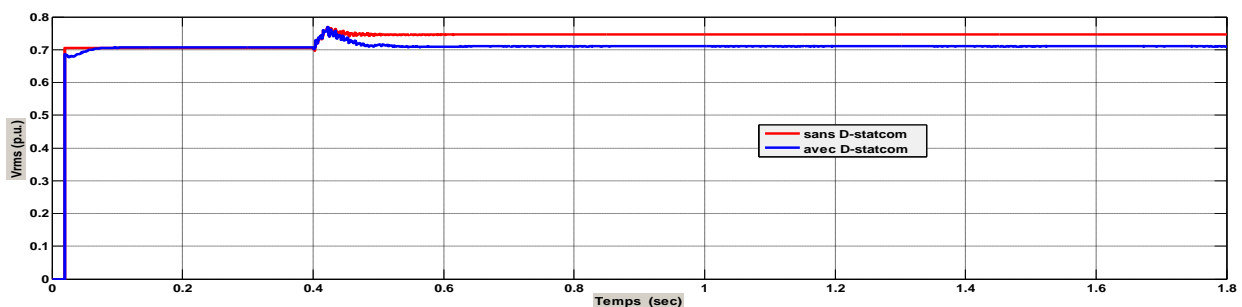


Figure IV.11: Valeur efficace de la tension de la charge en (p.u) avec et sans D-STATCOM.

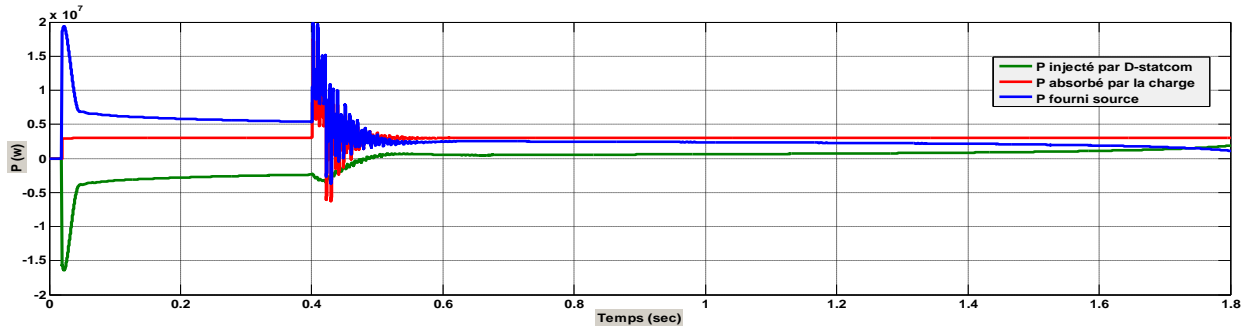


Figure IV.12: Puissances actives écoulees entre les parties de système durant la surtension.

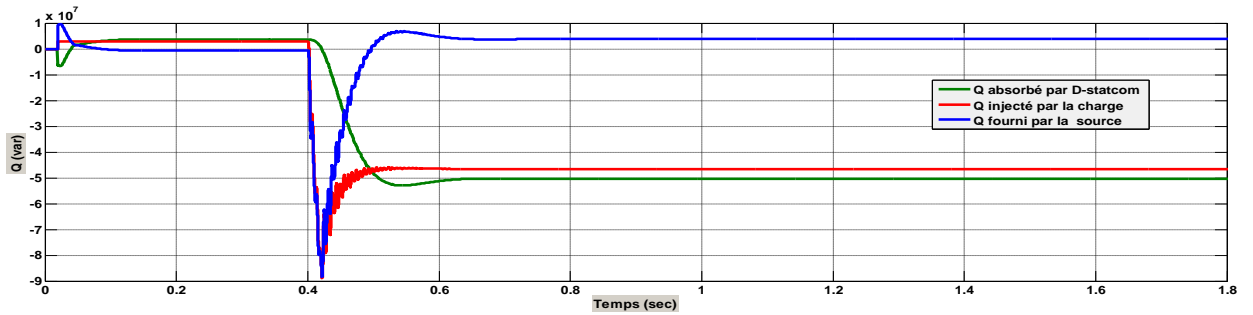


Figure IV.13: Puissances réactives écoulees entre les parties de système durant la surtension.

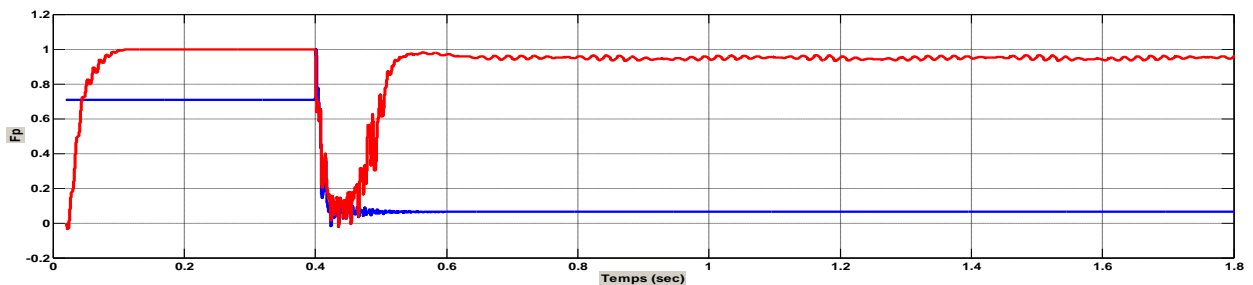


Figure IV.14 : Valeur du facteur de puissance à côté de la charge avec et sans D-STATCOM.

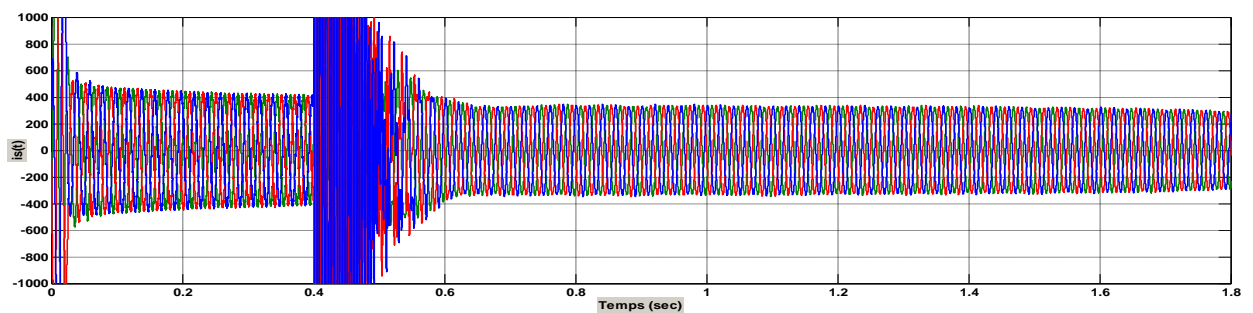


Figure IV.15 : Le courant de source durant la compensation de chute de tension.

IV.2 Discussions :

Cas 1: chute de tension

Durant le fonctionnement normal (c'est à dire après 0,4 s du commencement de la simulation), D-STATCOM compense la puissance réactive de la charge à travers le transformateur. La puissance D-STATCOM dépend principalement du courant injecté dans le réseau, qui à son tour dépend du facteur de puissance côté charge, comme illustré dans la figure IV.10.

En cas du chute de tension: $V_S < V_{ch}$, les figures IV.8 et IV.9 montrent que la puissance réactive est injectée par le D-STATCOM, afin de maintenir la tension de la charge à sa valeur de référence dans les conditions de chute de tension. Dans le but de recharger le condensateur pour garder la tension VDC, D-STATCOM absorbe la puissance active à partir du réseau. Par conséquent, l'écoulement de puissance peut être résumé par le schéma suivant:

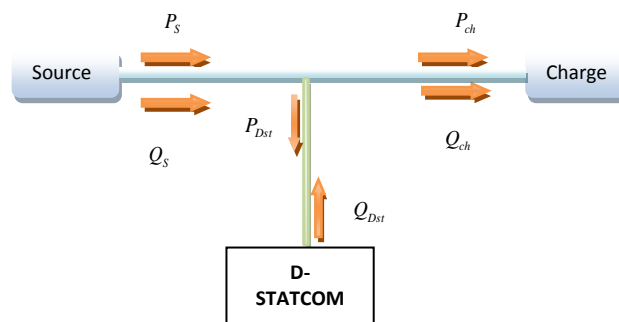


Figure IV.16: écoulement des puissances durant la chute de tension.

Cas 2: surtension

Dans le cas de surtension: $V_S > V_{ch}$, la réduction du courant d'alimentation (voir figure IV.17) signifie que la puissance active est injectée par le D-STATCOM vers le réseau pour libérer l'excès de puissance dans le condensateur DC (voir figure IV.14), de manière à stabiliser la tension (voir figures IV.12 et IV.13) en ce qui concerne la puissance réactive pendant la surtension, le D-STATCOM absorbe la puissance réactive à travers le transformateur (voir Figure IV.15). D'ailleurs, le D-STATCOM compense la puissance réactive de la charge au cours de la simulation (c'est à dire avant et après 0,4 s), en injectant la puissance réactive (voir Fig IV.13). Par conséquent, l'écoulement de puissance peut être résumé par le schéma ci-dessous :

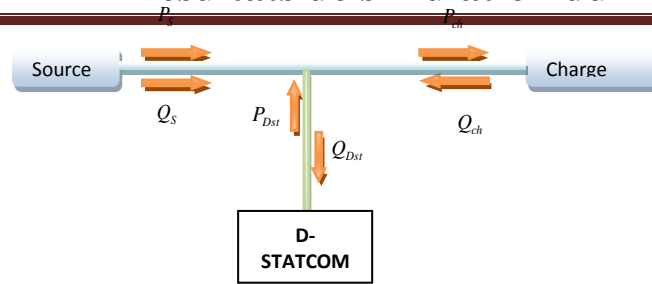


Figure IV.17: écoulement des puissances durant la surtension.

IV.3 Conclusion :

Pour mieux comprendre le fonctionnement du D-STATCOM, une analyse d'écoulement de puissance active et réactive a été présentée dans cette simulation. En général, le D-STATCOM est destiné à compenser plusieurs perturbations de la tension et améliorer le facteur de puissance. Par conséquent, il peut compenser la chute et la surtension simultanément en injectant ou absorbant un courant réactif à travers le transformateur.

A cet effet une nouvelle interprétation de phénomène de compensation pour la chute de tension et la surtension a été présentée dans ce document basée principalement sur l'écoulement des puissances.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

Dans l'industrie moderne, les fournisseurs de l'énergie électrique doivent s'efforcer afin d'obtenir de meilleures performances des lignes de distribution ainsi que les équipements tout en réduisant les perturbations associés au système de distribution. Plus les systèmes et dispositifs de contrôle sont efficaces, plus ils peuvent aider à maintenir les normes de qualité tout en réduisant les pertes liées aux clients et les coûts de réparation et d'entretien liés au système de distribution. Ce mémoire a cherché d'investiguer les méthodes de dépollution les perturbations associées à la tension ainsi qu'il a étudié l'assurance de la puissance réactive aux charges variables.

Notre travail présente une étude sur le D-STATCOM qui est utilisé principalement pour la compensation de l'énergie réactive exigée par la charge, comme il peut compenser certaines perturbations en tension créés au point de raccordement de la charge à protéger.

Les résultats obtenus par la simulation ont mis en évidence l'efficacité et la performance du D-STATCOM pour la compensation en utilisant La méthode des puissances instantanées p-q. Afin de bien comprendre le fonctionnement de notre contrôleur de puissance, une analyse des puissances actives et réactives a été présentée dans cette partie.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES



References Bibliographiques:

- [1] **D.Robinson**, « Harmonic management in MV distribution systems », A thesis submitted in fulfilment of PHD degree from university of wollongong, School of electrical, computer and telecommunication engineering, 2003.
- [2] **J. Arrillaga, N.R. Watson**, « Power system harmonics », Second Edition 2003, John Wiley & Sons, Ltd ISBN: 0-470-85129-5
- [3] **A. Bouafia**, « Techniques de Commande Prédictive et Floue pour les Systèmes D'Electronique de puissance: application aux redresseurs a MLI », Thèse doctorat en science, Université Ferhat Abbas, Sétif, 2010.
- [4] **M.A.E. Alali**, « Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension », Thèse de l'université Louis Pasteur, Strasbourg I, 12 Septembre 2002
- [5] **L. Amaia**. « Commandes Avancées des Systèmes Dédiées a l'Amélioration de la Qualité de L'Energie: de la Basse Tension à la Montée en Tension ». Thèse Doctorat, Institut National Polytechnique De Grenoble (Mondragón, Espagne), 2006.
- [6] **IEEE Std 519-1992**, « IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems »; 12 April 1993.
- [7] **M. Morati**. « contribution l'étude et contrôle des convertisseurs multi niveaux », thèse docteur de l'université de Lorraine, soutenu 11 Juin 2014
- [8] **M.A. Ben rassetS. Laroui**.mémoire master académique "utilisation d'un dispositif STATCOM pour l'amélioration du transit de puissance d'un réseau de transport d'énergie alternatif "université Ouargla .soutenu le 09/06/2015
- [9] **H. Sekhane**. mémoire magister "l'optimisation de la puissance réactive et le contrôle de tension a travers l'incorporation des dispositifs FACTs ".université de Constantine 1 .2013
- [10] **J R, Ibazine Mr M.Fersaoui**. Mémoire de fine de cycle "interactions d'un dispositif FACTs dans un réseau électrique (STATCOM)";2015/2016.
- [11] **A. Senni et F.Aziz**. « control de tension de réseau de transport par les dispositifsFACTs (SVC) ».projet fine d'étude Pour l'obtention du diplôme de licence LMD, université d'Adrar le 6/6/2013.
- [12] **N.H. Mendalek**, « Qualité de l'onde électrique et moyens de mitigation » , thèse de doctorat de l'université du Québec , 14 Janvier 2003.

- [13] **A.Chandra, B. Singh, B.N. Singh, K. Al-Haddad**, « An improved control algorithm of shunt active filter for voltage regulation, harmonic elimination, power-factor correction, and balancing of nonlinear loads », IEEE Trans. Power Delivery, Vol. 15, No. 3, May 2000, Page(s):495 – 507.
- [14] **The power electronics handbook** / edited by Timothy L. Skvarenina; 2002 by CRC Press LLC.
- [15] **S. Boutaba**. « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un SVC ». mémoire de magister, université Hassiba ben Bouali .soutenu le 09/06/2009
- [16] **BARAR ; LADJICI** "Introduction aux Systèmes Flexibles de Transmission en Courant Alternatif « FACTS »" projet de fin d'études école nationale polytechnique 2002.
- [17] **C. Benachaiba, B. Mazari, S. Dib**, « GeneticAlgorithmMethod of MinimizingHarmonicDistortion in PWM Converters », Annales de l'Université de Bechar, N°1, 2005.
- [18] **C. Benachaiba, B. Mazari, S. Dib**, « Genetic Algorithm Method of Minimizing Harmonic Distortion in PWM Converters Part II », Communication Science and Technologie (COST), N°4, 2006.
- [19] **L. Gyugyi, E.C. Strycula**, « Active AC power filters », in Proc. IEEE US, 529- 535 (1976).
- [20] **H. Akagi**, « Active and hybrid filters for power conditioning », IEEE ISIE. TU26-TU36 (2000).
- [21] **B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra**, « A review of active filters for power quality improvement », IEEE Trans. on Ind Electronics, 46(5), 960-97 1(1999).
- [22] **M. Takeda, K. Ikeda, Y. Tominaga**, « Harmonic current compensation with active filter », IEEE PESC, 808-8 15 (1987).
- [23] **F.Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae**, « A Novel harmonic power filter », IEEE PESC, 1151-1 159 (1988).
- [24] **T.M. Gruz**, « A survey of neutral cunents in three-phase computer power systems », IEEE Trans. on Ind Applications, 26(4), 7 19-725 (1990).
- [25] **A. Esfandiari, M. Parniani, H. Mokhtari**, « A New control strategy of shunt active filters for power quality improvement of highly and randomly varying loads », IEEE Ind. Electronics, Vol. 2,4-7 May 2004, Page(s):1297 - 1302.
- [26] **H. Akagi**, « Active harmonic filters », IEEE Proc., Vol 93, No 12, December 2005, Page(s): 2128 - 2141.

- [27] **Miao-Xin Wang**, « Filtrage actif de puissance : Etudes et réalisation d'un filtre actif à commande numérique en temps réel » Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 18 Décembre 1992.
- [28] **H. Akagi, Y. Tsukamoto, A. Nabae**, « Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 26, No. 1, pp. 93-98, 1990.
- [29] **J. Xu**, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 20 Janvier 1994.
- [30] **M.A.E. Alali, S. Saadate, Y.A. Chapuis, F. Braun**, « Energetic study of a shunt active conditioner compensating current harmonics, power factor and unbalanced », EPE-PEMC 2000, Kosic, Slovak Republic, vol. 5, pp. 211-216, September 2000.
- [31] **F.Z. Peng, H. Akagi and A. Nabae**, « A study of active power filters using quad-series voltage-source PWM converters for harmonic compensation », IEEE Trans. on power electronics, vol. 5, N°1, pp. 9-15, January 1990.
- [32] **S. Guffon**, « Modélisation et commandes a structure variable de filtres actifs de puissance », Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 24 Juillet 2000.
- [33] **C. Lott**, « Filtrage actif parallèle des harmoniques de courant sur des réseaux industriels : étude théorique et réalisation d'une maquette à GTO », Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy 17 Octobre 1995.
- [34] **O.L. Lapena, L.G. de Vicuna, J. Matas, M. Lopez and M. Castilla**, « A sliding mode control design of an active power filter with a low-pass filter as input stage », EPE-99 Lausanne, Suisse, 1999.
- [35] **H. Akagi**, « New trends in active filters for power conditioning », IEEE Trans. on Industry applications, vol. 32, No. 6, pp. 1312-1322, November/December 1996.
- [36] **H. Akagi**, « Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems », IEEE Trans. on power delivery, vol. 12, No. 1, pp. 354-363, January 1997.
- [37] **M. Aredes**, « Active Power Conditioners », Thèse de doctorat de l'université de Berlin Allemagne, 1996.
- [38] **G. H. Choe, A. K. Wallace, and M. H. Park**, « Control technique of active power filter for harmonic elimination, reactive power control », in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1988, pp. 859.866.
- [39] **W. M. Grady, M. J. Samotyj, and A. H. Noyola**, « Survey of active power line conditioning Methodologies », IEEE Trans. Power Delivery, vol. 5, pp. 1536.1542, July 1990.

- [40] **W. M. Grady, M. J. Samotyj, and A. H. Noyola**, « Minimizing network harmonic voltage distortion with an active power line conditioner », *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 6, pp. 1690.1697, Oct. 1991.
- [41] **L. Rossetto and P. Tenti**, « Using AC-fed PWM converters as instantaneous reactive power compensators », in *Proc. IEEE PESC.90*, 1990, pp. 855.861.
- [42] **F. Z. Peng, H. Akagi, and A. Nabae**, « A new approach to harmonic compensation in power systems. A combined system of shunt passive, series active filters », *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 26, pp. 983.990, Nov./Dec. 1990.
- [43] **S. Bhattacharya, D. M. Divan, and B. B. Banerjee**, « Active filter solutions for utility Interface », in *Proc. IEEE ISIE.95*, 1995, pp. 1.11.
- [44] **S. Bhattacharya, D. M. Divan, and B. B. Banerjee**, « Control, reduction of terminal voltage total harmonic distortion (THD) in a hybrid series active, parallel passive filter system », in *Proc. IEEE PESC.93*, 1993, pp. 779.786.
- [45] **P. T. Cheng, S. Bhattacharya, and D. M. Divan**, « Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications », in *Proc. IEEE APEC.96*, 1996, pp. 911.917.
- [46] **C. E. Lin, C. L. Chen, and C. L. Huang**, « Calculating approach, implementation for active filters in unbalanced three-phase system using synchronous detection method », in *Proc. IEEE IECON.92*, 1992, pp. 374.380.
- [47] **A. Campos, G. Joos, P. Ziogas, J. Lindsay**, « Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switching function », *IEEE Trans. on power electronics*, vol.9, N°3, P. 269-274, May 1994.
- [48] **S. Bhattacharya, A. Veltman, D. M. Divan, and R. D. Lorenz**, « Flux based active filter controller », in *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, 1995, pp. 2483.2491
- [49] **N. Bruyant**, « Etude et commande généralisées de filtres actifs parallèles : compensation globale ou sélective des harmoniques, régime équilibré ou déséquilibré », Thèse de doctorat de l'université de Nantes, Saint-Nazaire, 25 Novembre 1998.
- [50] **L. Benchaïta**, « Etude par simulation numérique et expérimentale d'un filtre actif parallèle à structure courant avec une nouvelle méthode de contrôle-commande », thèse de doctorat de l'université H. Poincaré. Nancy, 1998.
- [51] **P. Salmerón, R. S. Herrera**, « Distorted and Unbalanced Systems Compensation Within Instantaneous Reactive Power Framework », *IEEE Transactions on power delivery*, VOL. 21, NO. 3, JULY 2006

- [52] **C. Yu-long, L. Hong, W. Jing-qin, S. Shu-guang**, « Simulation and reliability analysis of shunt active power filter based on instantaneous reactive power theory », Cui et al. / J Zhejiang UnivSci A 2007.
- [53] **J. Afonso, C. Couto, J. Martins**, « Active Filters with Control Based on the p-q Theory », IEEE Industrial Electronics Society Newsletter vol. 47, n° 3, Sept. 2000, ISSN: 0746-1240, pp. 5-10
- [54] **H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh**, « Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters », IEEE Trans. on Industry applications, vol. IA-22, pp. 460-465, 1986.
- [55] **M. Bojrup**, « Advanced Control of Active Filters in a Battery Charger Application », thesis of Lund Institute of Technology, Sweden, 1999.
- [56] **C. Benachaïba**, « Contribution à l'Élimination des Harmoniques Par le Filtre Actif en Temps Réel dans les Réseaux Electriques », thèse de l'Université des Sciences et la Technologie d'Oran, 29 juin 2005.
- [57] **S. Bala**, « One cycle control of three-phase VAR compensators and active power filters », thesis of Indian Institute of Technology, Bombay, April 2003.
- [58] **R.A. El Shatshat**, « A Novel Modular Approach to Active Power-Line Harmonic Filtering in Distribution Systems », thesis of the University of Waterloo, Ontario, Canada, 2000.
- [59] **B. Singh, V. Verma**, « A new control scheme of series active filter for varying rectifier loads », IEEE Power Electronics and Drive Systems, PEDS 2003, The Fifth International Conference, Vol. 1, 17-20 Nov. 2003, Page(s):554 - 559.
- [60] **G. Alarcon, C. Nunez, V. Cardenas, M. Oliver**, « Design and implementation of a 3-phase series active filter to compensate voltage disturbances », IEEE Power Electronics Congress, CIEP 2000, 15-19 Oct. 2000, Page(s):93 - 98.
- [61] **M.A. Gray**, « A Comparative Analysis Of Proportional-Integral Compensated And Sliding Mode Compensated Shunt Active Power Filters », thesis of Mississippi State University, USA, December 2004.
- [62] **S. Bhattacharya**, « high power active filtersystems », thèse de l'université de WISCONSIN-MADISON, USA ; 2003.
- [63] **S. Bernard, G. Trochain**, « Deuxième génération de compensateur actif d'harmoniques forte capacité basé sur le mode d'injection du courant », MGE UPS SYSTEMS, doc N°, MGE0121UKI - 06/98

- [64] **O. Abdelkhalek, C. Benachaiba, S. Dib**, « Comparison Between two Detection Commands of Shunt Active Filter Under Non-Sinusoidal Condition », Annales de l'Université de Bechar, N°3, 2007.
- [65] **O. Abdelkhalek., C. Benachaiba, S. Dib** « Comparison of PQ Theory and Synchronous Detection Identification Methods for Current Harmonics under Non-Sinusoidal Condition for Shunt Active Compensator », 2^{ème} Conférence Internationale sur le Génie Electrique Béchar – Novembre 2006.
- [66] **Murat Kale, Engin Ozdemir**, « An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filters », Elsevier, Electric Power Systems Research 73 (2005) 113–119.
- [67] **ALIBI Abdelaali**, "Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS:(Flexible AC Transmission Systems)" mémoire de magistère université de Batna ,2009.
- [68] **BELGUIDOUM Hocine**, « Les systèmes FACTS utilisant les convertisseurs entièrement commandes » mémoire de magistère université Sétif ,2012
- [69] **A. Boulahia**, " Etude des Convertisseurs Statiques destinés à la Qualité de l'Energie Electrique", Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2009.
- [70] **NOROUZI Amir.** , (" Flexible AC Transmission Systems: Theory, Control and Simulation of the STATCOM and SSSC", mémoire de magister université de New Brunswick, 2003).
- [71] **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.
- [72] **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
- [73] **I. Papié**, "Mathematical analysis of FACTS devices based on a voltage source converter, Part1: mathematical models", electric power systems research, Elsevier science 56 (2000) 139-148.
- [74] **VORAPHONPIPUT Nituset CHATRATANA Somchai**, "STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation", transmission and distribution conference & exhibition 2005 IEEE/PER.
- [75] **Pranesh Rao, M.L. Crow**, "STATCOM control for power system voltage control application", IEEE Transaction on power system, vol 15, no 4, October 2000.
- [76] **Kalyan K. Sen**, "SSSC - Static Synchronous Series Compensator: Theory, Modeling, and Application", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998.
- [77] **ALLAOUI Tayeb**, "réglage robuste de L'UPFC pour optimiser l'écoulement des puissances dans un réseau électrique", mémoire de magister, université Mohamed Boudiaf Oran – 04/2002.

- [78] **Liming Liu, Pengcheng Zhu, Yong Kang, Jian Chen**, "Design and dynamic performance analysis of unified power flow controller", publication IEEE 2005.
- [79] **A. M. Munoz**, « Power Quality Mitigation Technologies in a Distributed Environment» (Springer, 2007) , Verlag London
- [80] **J. M. F. B. M.YUSOF**, « VOLTAGE SAGS RIDE THROUGH MITIGATION TECHNIQUES» Thèse de l'université Technologie Malaysia, 8 May 2009.
- [81] **R. Strzelecki, G. Benysek**, «Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks» (Springer, 2008), Verlag London.
- [82] **J. Jovitha, R. Subha** ,“ Power Quality Enhancement in Distribution System (DSTATCOM) ” , Proceedings of Thirteenth National Power Systems Conference (NPSC), Indian Institute of Technology (I.I.T), Chennai, India, 27-30 December 2004, pp. 749-754.