

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

## UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux Electriques

## THÈME

**Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par  
l'utilisation d'un filtre actif parallèle dans un réseau  
électrique**

Préparé par : Melle ZOUKH Nadjet  
Melle RAS GHANEM Amria

Devant le Jury :

<i>Nom et prénoms</i>	<i>Grade</i>		<i>Qualité</i>
<i>Y. BEKAOUAL</i>	<i>MAA</i>		<i>Président</i>
<i>A. BERKANI</i>	<i>MCA</i>		<i>Examineur 1</i>
<i>M. BENASLA</i>	<i>MCB</i>		<i>Examineur 2</i>
<i>M.BEDOUI</i>	<i>MCB</i>		<i>Encadreur</i>
<i>K.BELHACEL</i>	<i>MAA</i>		<i>Co-encadreur</i>

PROMOTION 2022 /2023

## **Remerciements**

*Mes remerciements vont tout premièrement à Allah tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toute cette période.*

*Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadreur Mme M.BEDOUI et Co-encadreur Mme K.BELHACEL, pour avoir d'abord proposés ce thème, pour le suivi continué tout ce long de la réalisation de ce mémoire et pour leurs conseils et remarques.*

*Nos remerciements à Mme Y.BEKAOUAL de nous avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Nos sincères remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur et le temps qu'ils ont consacré à l'évaluation de ce travail :*

*Mr A. BERKANI et Mr M. BENASLA*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

## **Table des Matières**

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des symboles et abréviations

**Introduction générale ..... 1**

### ***Chapitre I : Qualité de l'énergie Electrique***

***I.1 Introduction ..... 4***

***I.2 Qualité de l'énergie électrique (QEE) ..... 4***

I.2.1 Qualité de la tension ..... 5

I.2.2 Qualité du courant ..... 5

I.2.3 Normes de la qualité d'énergie électrique ..... 6

***I.3 Dégradation de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques ..... 6***

I.3.1 Perturbations harmoniques I.3.1.1 Définition ..... 6

I.3.1.2. Origine des harmoniques ..... 7

I.3.1.3 Conséquences des harmoniques ..... 8

I.3.2 Fluctuations de tension (flicker) ..... 9

I.3.2.1 Définition ..... 9

I.3.2.2 Origines ..... 9

I.3.2.3 Conséquences ..... 10

I.3.3 Déséquilibre de la tension ..... 10

I.3.3.1 Origines ..... 10

I.3.3.2 Conséquences ..... 11

I.2.3 Creux de tension I.2.3.1. Définition et Origine des creux de tension ..... 12

I.2.3.2 Conséquences des creux de tension ..... 12

I.3.4 Variation de la fréquence ..... 13

***I.4 Caractérisation et normes ..... 14***

I.4.1 Puissance active ..... 14

I.4.2 Puissance réactive ..... 14

I.4.3 Puissance déformante ..... 14

I.4.4 Facteur de puissance ..... 14

I.4.5 Rang d'harmonique ..... 15

I.4.6 Taux global de distorsion harmonique .....	15
I.4.7 THD en courant ou en tension.....	16
I.4.8 Normes imposées sur le THD .....	16
<b><i>I.5 Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques .....</i></b>	<b><i>17</i></b>
I.5.1 Solutions traditionnel .....	18
I.5.1.1 Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau .....	18
I.5.1.2 Utilisation d'inductances anti-harmoniques.....	18
I.5.1.3 Placement d'une inductance de ligne .....	18
I.5.1.4 Compensation de la puissance réactive .....	18
I.5.1.5 Filtres passifs .....	18
I.5.2 Solutions modernes .....	21
I.5.2.1. Filtres actifs .....	21
I-6-2 Filtre actif parallèle.....	23
<b><i>I.7 Les systèmes de transmission en courant alternatif flexibles FACTS .....</i></b>	<b><i>26</i></b>
<b><i>I.7 Conclusion.....</i></b>	<b><i>27</i></b>
 <b>Chapitre II : Structure et commande du filtre actif parallèle (FAP)</b>	
<b><i>II.1 Introduction .....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b><i>II.2 Principe de filtrage actif .....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b><i>II.3 Objectif du filtre actif .....</i></b>	<b><i>29</i></b>
<b><i>II.4 Filtre actif parallèle (FAP).....</i></b>	<b><i>29</i></b>
II.4.1 Principe de fonctionnement .....	29
II.4.2 Structure d'un filtre actif parallèle.....	30
II.4.2.1 FAP à structure de tension.....	31
II.4.2.2 FAP à source de courant.....	32
<b><i>II.5 Etude de la partie puissance du FAP.....</i></b>	<b><i>35</i></b>
II.5.1 Description d'un onduleur triphasé à quatre bras .....	35
II.5.2 Filtre de couplage.....	36
II.5.3 Système de stockage d'énergie.....	37
II.5.3.1 Filtre de sortie.....	38
<b><i>II.6 Etude de la partie commande .....</i></b>	<b><i>41</i></b>
II.6.1 Commande de l'onduleur.....	41
II.6.1.1 Commande conventionnel par hystérésis .....	42

II.6.1.2	Commande par hystérésis modulée .....	43
II.6.1.3	Commande par modulation de largeur d’impulsion (MLI).....	44
<b>II.7</b>	<b>Régulation de la tension continue .....</b>	<b>46</b>
II.7.1	Principe de la régulation .....	47
II.7.2.	Synthèse du régulateur de tension.....	47
<b>II-8</b>	<b>Dimensionnement du filtre actif .....</b>	<b>49</b>
II.8.1	Description du fonctionnement de la capacité .....	49
II.8.2	Estimation de la tension de référence du bus continu ( <b>Vdcref</b> ) .....	50
II.8.3	Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage ( <b>Cdc</b> ) .....	51
<b>II.9</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>51</b>
<b>Chapitre III : Méthodes d’identifications des courants de références</b>		
<b>III.1</b>	<b>Introduction.....</b>	<b>53</b>
<b>III.2</b>	<b>Méthodes d’identification des courants perturbés .....</b>	<b>53</b>
III.2.1	Domaine fréquentiel .....	54
III.2.2	Domaine temporel .....	54
<b>III.5</b>	<b>Méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées améliorée .....</b>	<b>58</b>
III.5.1	Principe du FMV .....	58
III.5.2	Méthode de référentiel lié au synchronisme SRF.....	61
III.5.3	Système à base de PLL .....	63
III.5.3.a	Principe d'un PLL .....	64
<b>III.6</b>	<b>Etude du contrôle direct de puissance (DPC) .....</b>	<b>65</b>
<b>III.7</b>	<b>Etat de l’art du contrôle direct de puissance.....</b>	<b>66</b>
<b>III.8</b>	<b>Principe du DPC classique .....</b>	<b>67</b>
<b>III.9</b>	<b>Stratégie du contrôle direct de puissance du SAPF .....</b>	<b>67</b>
III.9.1	Calcul des puissances instantanées .....	68
III.9.2	Table de commutation .....	68
<b>III.10</b>	<b>Conclusion.....</b>	<b>69</b>
<b>Chapitre IV : Simulations d’un FAP à quatre fils et interprétations des résultats</b>		
<b>IV.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>70</b>
<b>IV.2</b>	<b>Logiciel utilisé .....</b>	<b>70</b>
<b>IV.3</b>	<b>Paramètres de simulation.....</b>	<b>71</b>

<b><i>IV.4 Structure générale de simulation d'un filtre actif parallèle FAP</i></b> .....	<b>71</b>
IV.4.1 Source de tension triphasée à quatre fils .....	72
IV.4.2 Charge non linéaire .....	73
IV.4.3 Structure sans FAP (réseau triphasé/charge non linéaire).....	73
<b><i>IV.5 Simulation de FAP à quatre-fils</i></b> .....	<b>74</b>
IV.5.1 Simulation de FAP trois-bras à quatre-fils .....	74
IV.5.1.1 Commande d'un FAP par la méthode des puissances instantanées p-q .....	75
IV.5.1.2 Commande du FAP par MLI .....	76
IV.5.1.3 Régulateur PI de bus continu .....	76
IV.5.1.3 Résultats de simulation et interprétations .....	76
IV.5.2 Simulation de FAP à quatre bras .....	80
IV.5.2.1 Résultats de simulation et interprétations .....	81
<b><i>IV.6 Conclusion</i></b> .....	<b>85</b>
 <b><i>Chapitre V : STATCOM : Structure, principe de fonctionnement, modélisation, commande et simulation</i></b>	
<b><i>V.1 Introduction</i></b> .....	<b>86</b>
<b><i>V.2 Les systèmes de transmission flexibles en courant</i></b> .....	<b>86</b>
<b><i>V.2.1 Définition</i></b> .....	<b>87</b>
V.2.2 Différents types des systèmes FACTS .....	87
V.2.3 Avantages de la technologie des dispositifs FACTS .....	88
<b><i>V.3 Structure des Principaux Dispositifs FACTS</i></b> .....	<b>89</b>
V.3.1 Dispositifs de compensation dynamique shunts .....	89
V.3.1.1 Compensateur statique de puissance réactive (SVC).....	89
V.3.1.2 STATCOM (Static Compensator) .....	90
V.3.2 Dispositifs de compensation dynamique série.....	93
V.3.2.1 Commande de Condensateur série par thyristor (TCSC).....	93
V.3.2.2 Compensateur statique série synchrone (SSSC) .....	95
<b><i>V.4 Dispositifs de compensation dynamique hybrides "série - parallèle "</i></b> .....	<b>96</b>
V.4.1 Compensateur universel.....	96
V.4.1.1 Définition .....	96
V.4.1.2 Principe de fonctionnement .....	96
<b><i>V.5 Modélisation du STATCOM</i></b> .....	<b>97</b>

V.5.1 Modèle Mathématique Simplifié .....	97
V.5.2 Modèle mathématique en considérant le circuit DC.....	99
<b>V.6 Contrôle du STATCOM .....</b>	<b>101</b>
V.6.1 Détermination des Références .....	102
V.6.2 Régulateur PI avec compensation de pôles .....	102
V.6.3 Régulation de la tension continue <i>U<sub>dc</sub></i> .....	103
<b>V.7 Résultats de simulation et discussions .....</b>	<b>104</b>
V.7.1 Description du modèle .....	105
<b>V.8 Conclusion .....</b>	<b>109</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>111</b>

## Liste des figures

### Chapitre I : Qualité de l'énergie Electrique

Figure I- 1: Image d'une onde déformée.....	8
Figure I- 2: Fluctuations de tension .....	10
Figure I- 3: Déséquilibre du système triphasé de tension .....	11
Figure I- 4: Creux de tension .....	12
Figure I- 5: Variation de fréquence .....	13
Figure I- 6: diagramme vectorielle du facteur de puissance .....	15
Figure I- 7: Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant . .....	17
Figure I- 8: Raccordement d'un filtre passif .....	19
Figure I- 9: Filtre passif résonant .....	20
Figure I- 10: Filtre passif amorti .....	20
Figure I- 11: Différents types de filtres amortis .....	21
Figure I- 12: Exemple pratique de combinaison de filtres passifs résonants .....	21
Figure I- 13: Filtre actif série .....	23
Figure I- 14: Filtre actif parallèle .....	24
Figure I- 15: Filtre combiné parallèle-série (UPQC) .....	24
Figure I- 16: Filtre actif hybride .....	25
Figure I- 17: Filtre actif série avec un filtre passif parallèle .....	26
Figure I- 18: Schema d'un FACT shunt .....	27

### Chapitre II : Structure et commande du filtre actif parallèle (FAP)

Figure II- 1: Principe du filtrage actif parallèle .....	30
Figure II- 2: Structure générale d'un filtre actif parallèle . .....	30
Figure II- 3: Filtre actif parallèle à structure de tension . .....	31
Figure II- 4: Filtre actif parallèle à structure de courant. ....	32
Figure II- 5: Onduleur à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils. ....	35
Figure II- 6: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur .....	38
Figure II- 7: Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T . ....	40
Figure II- 8: Diagramme de Bode de gain du filtre de sortie . .....	41
Figure II- 9: Commande par hystérésis . .....	42
Figure II- 10: Commande montrant la bande d'hystérésis .....	42
Figure II- 11: Principe de la commande par hystérésis. (a) Cas d'un onduleur à trois bras avec condensateur à point milieu, (b) Cas d'un onduleur à quatre bras .....	43
Figure II- 12 : Principe de la commande par hystérésis modulé .....	44
Figure II- 13: Principe de la commande par MLI . .....	44
Figure II- 14: Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées .....	47
Figure II- 15: Boucle de régulation de la tension continue . .....	48

### Chapitre III : Méthodes d'identifications des courants de références

<b>Figure III- 1:</b> Identification par la méthode des puissances .....	57
<b>Figure III- 2:</b> Filtres d'extraction .....	58
<b>Figure III- 3:</b> Schéma bloc du FMV .....	59
<b>Figure III- 4:</b> Schéma de principe d'identification des harmoniques par la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées améliorée .....	60
<b>Figure III- 5:</b> Schéma vectoriel de passage du (abc) vers (dq). .....	62
<b>Figure III- 6:</b> Schéma de principe de la PLL .....	65
<b>Figure III- 7:</b> Configuration générale de la commande directe de puissance .....	67
<b>Figure III- 8:</b> Synoptique de contrôle du SAPF avec la commande DPC .....	68
<b>Chapitre IV : Simulations d'un FAP à quatre fils et interprétations des résultats</b>	
<b>Figure IV- 1:</b> Structure générale du FAP sous Matlab/SimPowerSystems.....	72
<b>Figure IV- 2:</b> Source de tension triphasée. ....	73
<b>Figure IV- 3:</b> Charge non linéaire. ....	73
<b>Figure IV- 4 :</b> Structure sans FAP (réseau triphasé/charge non linéaire). ....	74
<b>Figure IV- 5:</b> Structure générale du FAP à quatre fils sous Matlab/SimPowerSystems. ....	74
<b>Figure IV- 6:</b> Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées p-q.....	75
<b>Figure IV- 7:</b> Schéma de transformations :a) Repère abc vers $\alpha\beta$ , b) Calcul de puissances p-q, c) Calcul des courants de références dans le repère $\alpha\beta$ , d) Calcul des courants de références dans le repère abc.....	75
<b>Figure IV- 8:</b> Schéma de principe de la commande du FAP par MLI. ....	76
<b>Figure IV- 9:</b> Schémas de régulation de la tension du bus continu par un PI.....	76
<b>Figure IV- 10:</b> Courant de source.....	77
<b>Figure IV- 11:</b> Tension Vdc de bus continu.....	77
<b>Figure IV- 12:</b> Courant de charge .....	77
<b>Figure IV- 13:</b> Puissance active et réactive .....	77
<b>Figure IV- 14:</b> Courant de filtre.....	78
<b>Figure IV- 15:</b> Courant et tension de source .....	78
<b>Figure IV- 16:</b> Courant du neutre avant et après le filtrage.....	78
<b>Figure IV- 17:</b> Courant de charge $I_{ch}$ . a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique.....	78
<b>Figure IV- 18:</b> Courant de source $I_s$ après le filtrage. a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique sans déséquilibre. ....	79
<b>Figure IV- 19 :</b> Courant de source $I_s$ a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique avec déséquilibre. ....	79
<b>Figure IV- 20:</b> Structure générale du FAP quatre bras sous Matlab/SimPowerSystems. ....	80
<b>Figure IV- 21:</b> Schéma de principe d'un onduleur à quatre bras sous Matlab/SimPowerSystems. ....	81
<b>Figure IV- 22:</b> Schéma de principe de la commande par MLI. ....	81
<b>Figure IV- 23:</b> Courant de source.....	82
<b>Figure IV- 24:</b> Tension Vdc de bus continu.....	82
<b>Figure IV- 25:</b> Courant de charge .....	82
<b>Figure IV- 26:</b> puissance active et réactive.....	82
<b>Figure IV- 27:</b> Courant de filtre.....	83
<b>Figure IV- 28:</b> Courant et tension de source .....	83

<b>Figure IV- 29:</b> Courant du neutre avant et après le filtrage.....	83
<b>Figure IV- 30 :</b> Courant de source $I_s$ . a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique sans déséquilibre. ....	84
<b>Figure IV- 31 :</b> Courant de source $I_s$ . a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique avec déséquilibre. ....	84
<b>Chapitre V : STATCOM : Structure, principe de fonctionnement, modélisation, commande et simulation</b>	
<b>Figure V- 1 :</b> Schéma de principe d'un FACTS .....	87
<b>Figure V- 2:</b> Classification des dispositifs de compensation FACTS .....	88
<b>Figure V- 3:</b> Modèle mathématique de SVC .....	89
<b>Figure V- 4:</b> Schéma de base du STATCOM .....	91
<b>Figure V- 5 :</b> Présentation d'un compensateur .....	92
<b>Figure V- 6 :</b> Présentation d'un compensateur .....	92
<b>Figure V- 7:</b> Caractéristique statique du STATCOM .....	92
<b>Figure V- 8:</b> Insertion d'un TCSC sur une ligne.....	94
<b>Figure V- 9:</b> Impédance du TCSC en fonction de l'angle .....	94
<b>Figure V- 10:</b> Schéma de base du SSSC.....	95
<b>Figure V- 11:</b> Statique du SSSC .....	95
<b>Figure V- 12:</b> Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique .....	96
<b>Figure V- 13:</b> Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau . ....	97
<b>Figure V- 14:</b> Passage du repère $(\alpha, \beta)$ vers le repère $(d, q)$ .....	99
<b>Figure V- 15:</b> Schéma équivalent du STATCOM avec circuit DC .....	100
<b>Figure V- 16:</b> Identification des Courants de Référence .....	102
<b>Figure V- 17:</b> Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM .....	103
<b>Figure V- 18 :</b> Régulation de la tension continue $U_{dc}$ .....	104
<b>Figure V- 19:</b> Structure générale du STATCOM.....	105
<b>Figure V- 20:</b> Puissances de la source, de charge et du STATCOM. a) Puissances actives et Réactives.....	107
<b>Figure V- 21:</b> Tension et courant : a) Tension du bus continu et b) Courant du Statcom....	107
<b>Figure V- 22:</b> Tension et courant de source.....	108
<b>Figure V- 23:</b> Courant de source, de la charge et du STATCOM pour les différents modes de Fonctionnement c) Mode inductif, c) Mode capacitif. ....	109

## ***Liste des tableaux***

### ***Chapitre I: Qualité de l'énergie Electrique***

***Tableau I- 1: Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles ..... 13***

### ***Chapitre II : Structure et commande du filtre actif parallèle (FAP)***

***Tableau II- 1: Tensions générées par Chapitre V : STATCOM : Structure, principe de fonctionnement, modélisation, commande et simulation r l'onduleur de tension à quatre bras ..... 36***

### ***Chapitre III : Méthodes d'identifications des courants de références***

***Tableau III- 1: Modes de compensation de la commande des puissances instantanées..... 56***

***Tableau III- 2: Table de commutation pour la DPC..... 69***

### ***Chapitre IV : Simulations d'un FAP à quatre fils et interprétations des résultats***

***Tableau IV- 1 : Tableau des paramètres de simulations..... 71***

### ***Chapitre V : STATCOM : Structure, principe de fonctionnement, modélisation, commande et simulation***

***Tableau V- 1: Paramètres du STATCOM..... 106***

***Tableau V- 2: Paramètres de régulation et du contrôle..... 106***

### *Liste des Symboles et Acronymes*

$f$	Fréquence
$f_1$	Fréquence de la composante fondamentale
<b>THD</b>	Taux de Distorsion Harmonique
$D$	Puissance déformante
$Q$	Puissance réactive
$P$	Puissance active
<b>FP</b>	Facteur de puissance
$S$	Puissance apparente
$V_1$	Valeur efficace de la tension de l'harmonique de rang h
$I_h$	Valeur efficace du Courant harmonique du rang h
$I_f$	Valeur efficace du courant injecté par le FAP
$L$	Inductance
$R$	Résistance
$C$	Capacité
$I_{ch}$	Courant harmonique de la charge
$I_f$	Courant du filtre
$L_s$	Inductance de source (H).
$R_c$	Résistance coûté de charge ( $\Omega$ ).
$L_c$	Inductance de charge (H).
$R_s$	Résistance du réseau coûté source ( $\Omega$ ).
<b>FAP</b>	Filtre actif parallèle
<b>QEE</b>	Qualité de l'énergie électrique
<b>UPQC</b>	Unified Power Quality Conditionner.
<b>THD<sub>i</sub></b>	Taux de distorsion harmonique en courant
<b>THD<sub>v</sub></b>	Taux de distorsion harmonique en tension

<b><i>IEEE</i></b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers
<b><i>CEI</i></b>	Commission Electrotechnique Internationale
<b><i>I<sub>sa</sub>, I<sub>sb</sub>, I<sub>sc</sub></i></b>	Courants de source
<b><i>I<sub>fa</sub><sup>*</sup>, I<sub>fb</sub><sup>*</sup>, I<sub>fc</sub><sup>*</sup></i></b>	Courants de référence du filtre
<b><i>I<sub>fn</sub></i></b>	Courants du neutre côté filtre
<b><i>V<sub>sa</sub>, V<sub>sb</sub>, V<sub>sc</sub></i></b>	Tensions de la source
<b><i>K<sub>p</sub></i></b>	Constante proportionnelle
<b><i>K<sub>i</sub></i></b>	Constante intégral
<b><i>V<sub>dc</sub></i></b>	Tension du bus continu
<b><i>FMV</i></b>	Filtre Multi-variables
<b><i>PLL</i></b>	Boucle de verrouillage de la phase
<b><i>SRF</i></b>	Méthode de référence synchrone
<b><i>V<sub>fmax</sub></i></b>	Valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.
<b><i>V<sub>α</sub>, V<sub>β</sub>, V<sub>0</sub></i></b>	Tensions perturbateurs calculés dans le repère $\alpha$ - $\beta$ - 0
<b><i>i<sub>α</sub>, i<sub>β</sub>, i<sub>0</sub></i></b>	Courants perturbateurs calculés dans le repère $\alpha$ - $\beta$ - 0
<b><math>\bar{V}_\alpha</math></b>	Tension fondamental sur l'axe $\alpha$
<b><math>\bar{V}_\beta</math></b>	Tension fondamental sur l'axe $\beta$
<b><i>p</i></b>	Puissance réelle
<b><i>q</i></b>	Puissance Imaginaire

$\bar{p}$ , $\bar{q}$ et $\bar{p}_0$	composantes continues des puissances instantanées.
$\tilde{p}$ , $\tilde{q}$ et $\tilde{p}_0$	Composantes alternatives des puissances instantanées
<b><i>PIRI</i></b>	Puissances Instantanées Réelle et Imaginaire
$\tilde{V}_\alpha$	Tension harmonique sur l'axe $\alpha$
$\tilde{V}_\beta$	Tension harmonique sur l'axe $\beta$
$\varepsilon$	Coefficient d'amortissement
<b><i>MLI</i></b>	Modulation de largeur d'Impulsion
<b><i>FACTS</i></b>	Flexible alternatif curant transmission Systems
<b><i>IGBT</i></b>	Insulated Gate Bipolar Transistors
<b><i>STATCOM</i></b>	Static Synchronous Compensator
<b><i>SSSC</i></b>	Static Synchronous Series Compensator
<b><i>TCSR</i></b>	T hyristor Switched Serie Reactor
<b><i>TCSC</i></b>	Thyristor-Controlled Series Capacitor.
<b><i>UPFC</i></b>	Unified Power Flow Controller
$V_{sh}$	Tension de STATCOM
$I_{sh}$	Courant de STATCOM
$R_{sh}$	Résistance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
$X_{sh}$	Réactance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
$Q_{sh}$	Puissance réactive délivrée par le STATCOM

$P_{sh}$	Puissance active du STATCOM
$U_{dc}$	Tension continu aux bornes du condensateur
$L_{sh}$	Inductance du transformateur de couplage shunt du STATCOM
$\Delta T$	Période de variation du courant du filtre
$T_i$	Etat de l'interrupteur i (ouvert ou fermé)
$\alpha\text{-}\beta$	Axes du repaire de Concordia
$V_{dcref}$	Tension de référence.
$I_{inj}$	Courant injecte dans le réseau par FAP(A).
$\theta$	Angle enter les secteurs.

---

---

# *Introduction générale*

---

---

## *Introduction générale*

Actuellement la plus part des industries se voient affectées par les harmoniques qui sont générés par des charges non linéaires, elles engendrent de graves conséquences pour le système électrique en général, et tous cela abouti finalement à des pertes économiques importantes.

La majorité des systèmes de production utilise généralement un convertisseur statique pour la conversion d'énergie électrique produite par le générateur. Ceci à un effet négatif sur la qualité énergétique à cause d'ouverture et de fermeture des interrupteurs des deux inverseurs.

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion de l'énergie électrique a contribué considérablement à l'amélioration des performances et à la fiabilité des fonctionnements de ces installations. En revanche, à cause de leur nature non linéaire, ils sont la cause principale de la détérioration de la qualité de l'énergie électrique. Puisque, la réglementation internationale en matière énergétique exige aux consommateurs le respect des normes aux harmoniques, le filtrage des composantes harmoniques est devenu alors une préoccupation major pour les distributeurs et les utilisateurs de cette énergie.

Néanmoins, la commande des filtres actifs est délicate car il faut identifier les perturbations et les corriger en temps réel. En effet, ce type de filtre doit pouvoir compenser les perturbations même lorsque les caractéristiques de la charge évoluent dans le temps. Ainsi, pour la topologie de l'onduleur à quatre files peut neutraliser le courant de neutre dans le cas d'une charge non linéaire déséquilibrée.

L'utilisation de filtres actifs parallèles à quatre bras est une méthode efficace pour améliorer la qualité de l'énergie électrique. Ces filtres sont des dispositifs électroniques qui permettent de réduire les perturbations et les harmoniques présentes dans le réseau électrique, garantissant ainsi un approvisionnement en électrique plus stable et de meilleure qualité.

Les filtre actifs parallèles utilisent des techniques avancées de traitement du signal pour analyse les caractéristique indésirables du courant électrique, telles que les harmoniques, les fluctuations de tension et les distorsions, et les neutraliser en générant des signaux opposés de même amplitude mais de phase inversée. Ces signaux sont ensuite injectés dans le réseau électrique pour annuler les perturbations.

Le principe de fonctionnement des filtres actifs parallèles repose sur l'utilisation de convertisseurs de puissance, tels que des onduleurs, qui sont capables de générer des signaux de courant en phase avec les harmoniques présents dans le réseau. Ces convertisseurs peuvent

être contrôlés de manière précise pour s'adapter aux variations du réseau et générer des courants de compensation appropriés.

L'avantage majeur des filtres actifs parallèles à quatre bras est leur capacité à traiter plusieurs harmoniques simultanément. Chaque bras du filtre est capable de compenser une harmonique spécifique, ce qui permet une correction sélective et précise des différentes composantes indésirables du courant électrique. De plus, ces filtres sont capables de fournir une compensation réactive, ce qui contribue à maintenir une tension stable sur le réseau.

En conclusion, l'utilisation de filtres actifs parallèles à quatre bras constitue une solution efficace pour améliorer la qualité de l'énergie électrique. Ces dispositifs offrent une compensation sélective et précise des harmoniques et des perturbations présentes dans le réseau, ce qui contribue à garantir un approvisionnement électrique plus fiable et de meilleure qualité [1].

Une autre technique de réglage des transits de puissances actives et réactive utilisant l'électronique de puissance a fait ses preuves. Aujourd'hui, grâce à l'amélioration des performances de l'électronique de puissance, on voit apparaître des nouveaux équipements connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) qui permettent d'améliorer la qualité des réseaux électriques et accroître la puissance de transport des lignes. Le rôle principal du dispositif FACTS est la compensation de l'énergie électrique à l'intérieur d'un réseau électrique[2].

Le travail présenté dans ce mémoire est scindé en cinq chapitres répartis comme suit :

Une introduction générale présente un contexte général relatif à la problématique, les objectifs de recherche de ce mémoire.

Le premier chapitre, est consacré à la présentation d'un état de l'art sur la qualité d'énergie dans les réseaux électriques : les perturbations, leurs origines et conséquences ainsi les solutions possibles proposées dans la littérature.

Dans le second chapitre, nous exposerons la structure générale du filtre actif parallèle et les stratégies de commande proposées dans la littérature, à savoir les principaux régulateurs et les différentes techniques de commande.

Dans le troisième chapitre, Nous nous présentons une étude théorique sur la topologie de filtre actif parallèle (FAP) à structure tension et sa stratégie de commande. Différentes méthodes d'identifications des courants harmoniques des références sont détaillées telles que la commande p-q, p-q modifiée et la commande SRF et DPC.

Dans le quatrième chapitre, nous étudions les résultats de simulation sous l'environnement Matlab/SimPowerSystems relatifs aux comportements du FAP à quatre fils, en régime déséquilibré et distordu.

Au cinquième chapitre, nous traiterons dans un premier temps la nouvelle génération des systèmes FACTS. Ces systèmes selon leur connexion au réseau sont distingués en compensateurs shunt et série tels que : STACOM, SSSC, TCSC. Dans un deuxième temps, nous présenterons les différents résultats de simulations pour les différents modes de charges.

Enfin nous avons terminé ce travail par une conclusion générale relative aux résultats de simulations.

# *Chapitre I:*

---

---

## *Qualité de l'énergie Electrique (QEE)*

---

---

## **I.1 Introduction**

Généralement, le distributeur d'énergie délivre l'énergie électrique sous forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Les paramètres caractéristiques de ce système sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, qui doit être sinusoïdale et la symétrie du système triphasé. Mais depuis quelques années, avec l'évolution technologique des composants d'électronique de puissance les distributeurs d'énergie rencontrent plusieurs problèmes liés à l'accroissement du nombre de convertisseurs statiques raccordés aux réseaux de distribution d'énergie[3].

En effet, ces convertisseurs sont des sources polluantes qui absorbent des courants non sinusoïdaux et consomment pour la plupart de la puissance réactive. Les harmoniques générés sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations se superposent à l'onde fondamentale. Elles ont donc pour conséquence de modifier l'onde de tension ou de courant ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance et/ou par la génération de courants et de tensions alternatives de fréquence différente de celle du fondamental.

Les 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. Dans ce chapitre nous allons présenter les principales perturbations affectant la qualité de l'onde électrique, notamment les harmoniques.

Nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques, ainsi nous détaillerons les origines, les conséquences matérielles et les limites tolérées et imposées par les normes internationales de ces perturbations. A la fin de ce chapitre, nous présentons les solutions mises en œuvre pour dépolluer le réseau électrique.

## **I.2 Qualité de l'énergie électrique (QEE)**

La qualité de l'énergie désigne plus concrètement la qualité de la fourniture électrique. Celle-ci dépend de trois facteurs que sont la continuité d'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service [4].

La continuité d'alimentation recouvre les coupures ou interruptions du réseau. On distingue les coupures très brèves (entre 1 seconde et 3 minutes) des coupures longues (supérieures à 3 minutes).

La qualité de l'onde de tension désigne les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques

raccordés au réseau, voire de les endommager. Les types de perturbations identifiés sont par exemple les creux de tension, les surtensions impulsionnelles, les variations de fréquence, les papillotements,... etc.

Enfin, la qualité de l'énergie dépend de la qualité de service qui caractérise la relation entre un utilisateur et son gestionnaire de réseau ou son fournisseur. Il s'agit par exemple des délais de (re)mise en service, des délais d'intervention d'urgence, des délais de raccordement, des notifications de coupure programmée, etc.

Deux types d'acteurs agissent donc sur la qualité de l'énergie : le distributeur d'une part, et l'utilisateur d'autre part. Sur chacun de ces maillons, la responsabilité de l'un ou de l'autre est engagée. Côté distributeur, la qualité de fourniture du réseau est très encadrée, notamment par la norme EN50160. Cette norme européenne liste les différents types de Perturbations et les paramètres à surveiller.

### **I.2.1 Qualité de la tension**

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement[5].

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales :

- ✓ Fréquence
- ✓ Amplitude
- ✓ Forme d'onde
- ✓ Symétrie.

Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zone de réglage), qui doivent participer aux réglages primaires de la fréquence. Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre 10% autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite plusieurs de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- ◆ Creux de tension et coupures brèves.
- ◆ Variations rapides de tension (Flicker).
- ◆ Surtensions temporaires ou transitoires.

Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents.

### **I.2.2 Qualité du courant**

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, et se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et

de fréquence constante déphasés de  $\frac{2\pi}{3}$  radians entre eux, et de forme purement sinusoïdale[6].

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension », où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension.

### **I.2.3 Normes de la qualité d'énergie électrique**

Afin de limiter les effets des perturbations électromagnétiques sur les réseaux électriques, des normes ont été mises en place. Les deux principaux organismes qui ont établi de telles normes sont la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) et IEEE. Les normes qu'ils ont établies sont, de façon respective, la série **CEI 61000** et l'**IEEE Standard 519** [7].

De façon générale ces normes, identifiant les principales sources de perturbations électromagnétiques, décrivent les effets de ces perturbations sur les réseaux, et donnent des méthodes d'analyse et de mesure pour les harmoniques.

### **I.3 Dégradation de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques**

La qualité d'énergie est un concept très large qui peut se définir par rapport à la continuité de la fourniture électrique et la forme de la tension disponible. L'évaluation de cette qualité consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques parmi lesquelles on peut citer:

- ✓ Perturbations harmoniques.
- ✓ Déséquilibres de tension.
- ✓ Creux de tension et coupures.
- ✓ Variations de la fréquence d'alimentation, etc.

Ces perturbations peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie. Elles peuvent aussi être classées selon qu'elles soient permanentes, semi-permanentes ou aléatoires (foudre, court-circuit, manœuvre...).

#### **I.3.1 Perturbations harmoniques**

##### **I.3.1.1 Définition**

Un harmonique est défini comme étant une composante sinusoïdale d'un signal périodique ayant une fréquence multiple de l'onde fondamentale. Le domaine des fréquences qui

correspondre à l'étude des harmoniques est généralement compris entre 100 Hz et 2000 Hz (entre les harmoniques de rangs  $h=2$  et  $h=40$ ).

L'amplitude de rang 1 est appelée la composante fondamentale du signal électrique périodique dans notre cas c'est la (50 Hz). L'amplitude de chaque harmonique est inversement proportionnelle à son ordre. Les premiers rangs harmoniques tel que (3, 5, 7) ont des amplitudes élevées, d'où l'importance des courants injectés, raison pour laquelle il faut limiter ces harmoniques dans les normes. La figure (I-1) suivante représente la forme d'onde fondamentale, la forme d'onde harmonique et la forme d'onde déformée.

### **I.3.1.2. Origine des harmoniques**

Dans les secteurs industriels et domestiques on constate un accroissement de générateurs d'harmoniques. Il s'agit des dispositifs, tels que les convertisseurs statiques, contenant des éléments de commutation ainsi que d'autres dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire :

- Convertisseurs statiques : Les convertisseurs statiques sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installée. On peut citer de manière non exhaustive [8, 9]:
  - ❖ Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence dépend sensiblement de la commande adoptée.
  - ❖ Les cyclo-convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif
  - ❖ Les gradateurs utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage de chauffage
  - ❖ Les variateurs de vitesse électroniques constitués principalement d'un convertisseur statique et d'une partie électronique, destinés à commander la vitesse d'un moteur électrique...
- Dispositifs à caractéristique tension-courant non linéaire, on distingue :
  - ❖ Les fours à arc et à induction.
  - ❖ Les transformations.
  - ❖ Les machines tournantes.
  - ❖ Inductances saturées, etc.

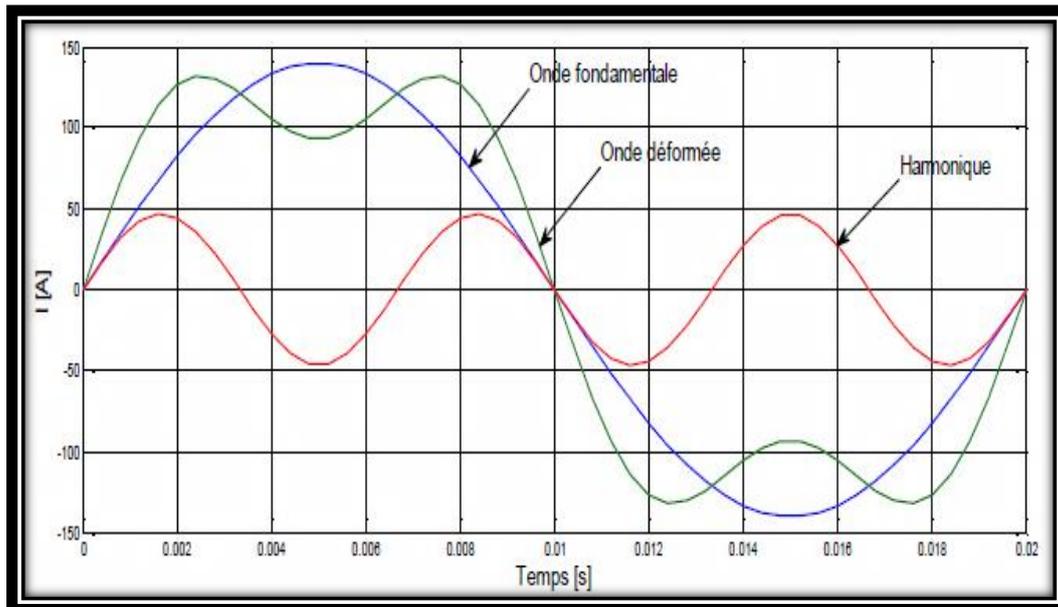


Figure I- 1: Image d'une onde déformée[7].

### I.3.1.3 Conséquences des harmoniques

De nombreux effets des harmoniques sur les installations et les équipements électriques peuvent être cités. Les effets les plus importants sont l'échauffement, les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques et le risque d'excitation de résonance [10].

#### a- Echauffement

Les pertes totales par effet Joule sont la somme de celles du fondamental et des harmoniques [11]:

$$I^2 \cdot R = R \sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \quad (\text{I-1})$$

Avec :

$I$  : Courant total.

$I_h$  : Courant harmonique de rang h.

$R$  : Résistance traversée par le courant  $I$ .

Les harmoniques augmentent aussi les pertes fer (pertes par courants de Foucault). Ils prennent de l'importance dans les matériels utilisant les circuits magnétiques (moteurs transformateurs...etc.). Le vieillissement des isolants est souvent dû à une contrainte en tension consécutive à la présence de la tension harmonique et donc à une augmentation locale du courant de fuite, ou encore à l'échauffement exagéré dans les conducteurs.

**b. L'interférence avec les réseaux de télécommunication**

Le couplage électromagnétique peut provoquer un bruit considérable dans les réseaux de communication. Certaines parties des réseaux de communication peuvent devenir inutiles en raison de résonances.

**c. Les défauts de fonctionnement de certains équipements électriques**

Tout dispositif dont la fonction dépend du passage à zéro de grandeurs électriques (dispositifs utilisant la tension comme référence) peut être perturbé en présence d'harmoniques puisque la tension (ou le courant) peut changer de signe plusieurs fois en une demi-période.

**d. Le risque d'excitation de résonance**

Les fréquences de résonance des circuits d'inductances de transformateurs et de câbles sont généralement élevées. Lorsque des batteries de capacité sont connectées au réseau pour améliorer le facteur de puissance, les fréquences de résonance peuvent devenir extrêmement faibles et coïncider ainsi avec les harmoniques créées par les convertisseurs statiques, ce qui entraîne une amplification harmonique.

**I.3.2 Fluctuations de tension (flicker)****I.3.2.1 Définition**

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques ou erratiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de  $\pm 10\%$  et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de secondes[12].

**I.3.2.2 Origines**

L'origine principale de ces courants est le fonctionnement d'appareil dont la puissance absorbée varie de manière rapide, comme les fours à arc et des machines à souder. Ces fluctuations se traduisent par des variations d'intensité, visible au niveau de l'éclairage causant une gêne visuelle perceptible pour une variation de 1% de la tension. Ce phénomène de papillotement est appelé flicker. Un exemple de fluctuation de tension est montré dans la figure I.2.

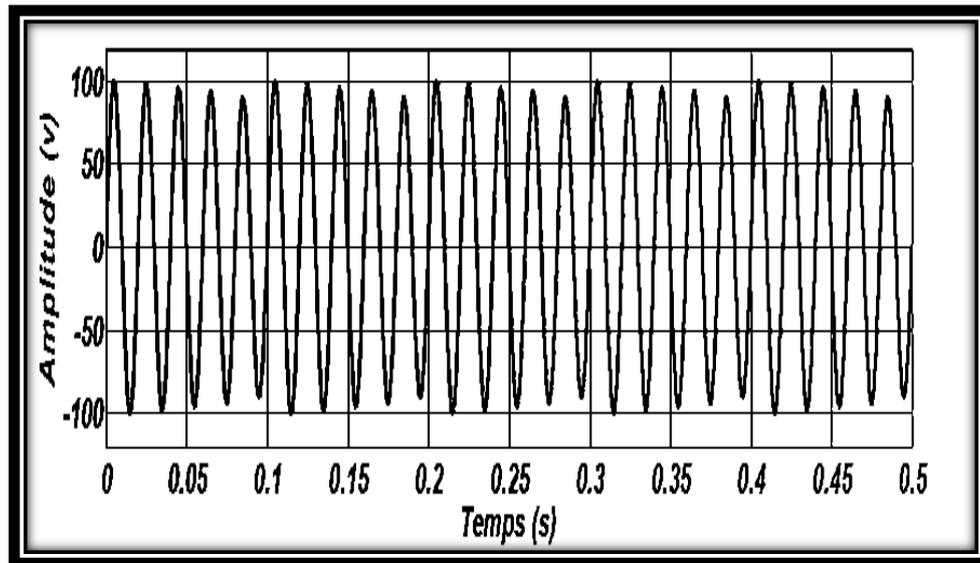


Figure I- 2:Fluctuations de tension [12].

### I.3.2.3 Conséquences

Le flicker est défini comme une impression d'instabilité de la sensation visuelle due à un Stimulus lumineux dont la luminosité ou la couleur fluctuent dans le temps. Il peut gêner les Personnes dans les ateliers, les bureaux, les locaux d'habitation en provoquant une fatigue visuelle et nerveuse [13].

### I.3.3 Déséquilibre de la tension

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

#### I.3.3.1 Origines

Un récepteur triphasé électrique qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour la réceptrice monophasée basse tension. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire [12]

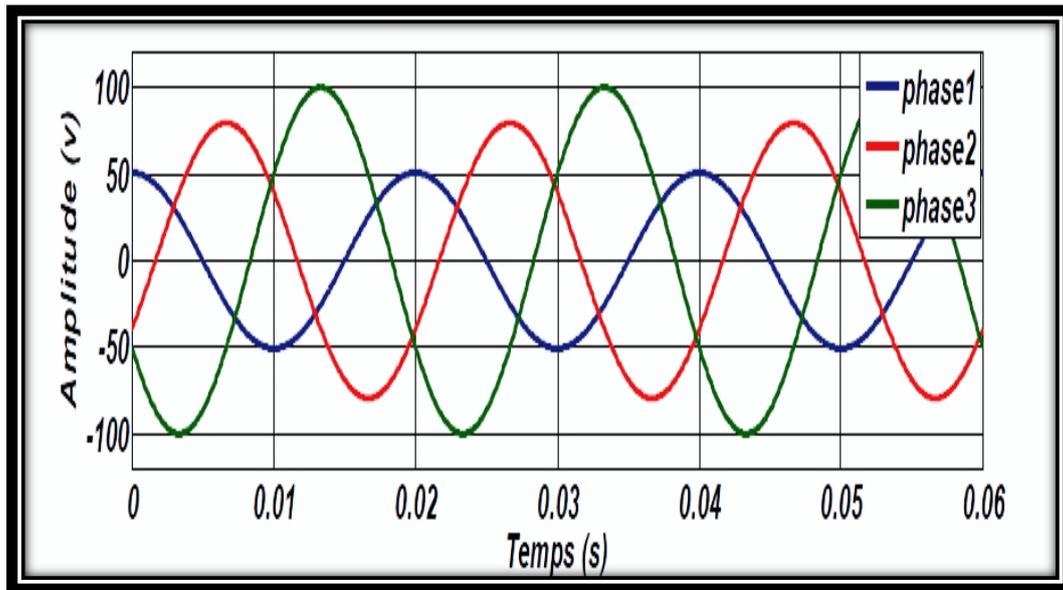


Figure I- 3: Déséquilibre du système triphasé de tension [12].

### I.3.3.2 Conséquences

- ◆ Mauvais fonctionnement d'un appareil monophasé alimenté par une tension très faible (lampe à incandescence qui fournit un mauvais éclairage) [13, 14]
  - ◆ Destruction d'un appareil monophasé alimenté par une tension trop élevée, il peut être détruit (claquage d'un filament de lampe par surtension).
  - ◆ Concernant les dispositifs triphasés d'électronique de puissance, principalement les ponts redresseurs, le fonctionnement en présence de déséquilibre entraîne l'apparition de composantes harmoniques non caractéristiques, notamment des harmoniques de rang multiple de 3. L'apparition de ces courants harmoniques peut poser des problèmes, comme la génération d'une anti-résonance lors du filtrage de l'harmonique de rang 5.
- Outre les effets classiques des harmoniques, ces fréquences non caractéristiques peuvent conduire, dans certains cas, au blocage de la commande. La conséquence des composantes inverses sur les machines tournantes est la création d'un champ tournant en sens inverse du sens de rotation normal, d'où un couple de freinage parasite et des pertes supplémentaires qui provoquent l'échauffement de la machine.
- ◆ Concernant l'effet du déséquilibre homopolaire, il faut signaler le risque d'échauffement du conducteur neutre dans un réseau BT qui, lorsque le conducteur est d'un diamètre trop faible, peut provoquer une rupture du conducteur ou un incendie.

### 1.2.3 Creux de tension

#### 1.2.3.1. Définition et Origine des creux de tension

Un creux de tension est une diminution brusque de la tension de fourniture. Cette diminution, située entre 90% et 10% de la tension nominale  $U_n$ , est suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de 10 ms. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension : [10, 15]

- Les creux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs...etc.).
- Les creux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts circuits accidentels sur les réseaux de distribution ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, protection de branches sur les lignes aériennes...etc.).

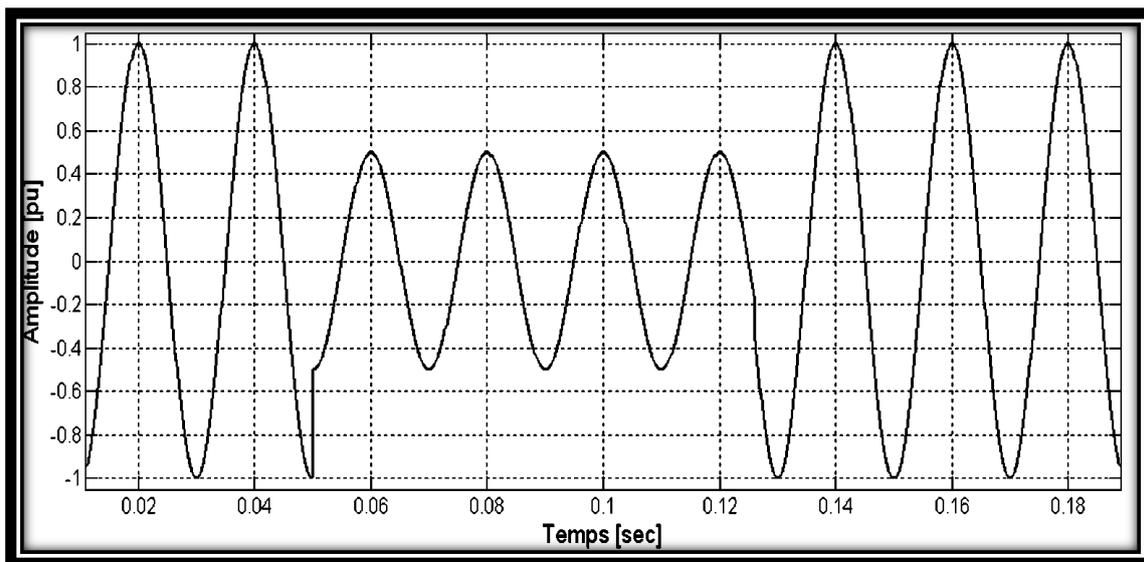


Figure I- 4: Creux de tension [16].

#### 1.2.3.2 Conséquences des creux de tension

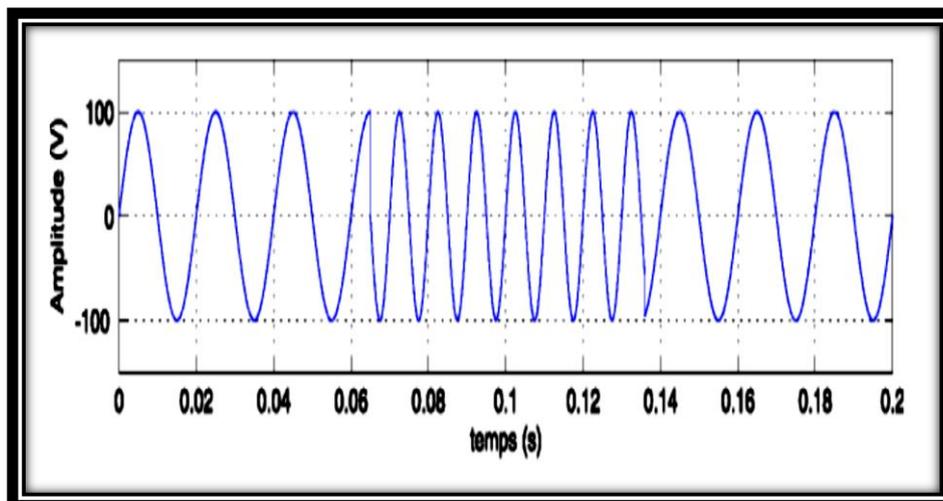
Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Le tableau (I.1) Résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles [17].

**Tableau I- 1:** Conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles

<i>Types d'appareils</i>	<i>Conséquences néfastes</i>
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et rallumage (lampes à arc)
Systèmes à base d'électronique de puissance	Arrêt de la diapositive
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, blocage, surintensité au retour de la Tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En mode redresseur : ralentissement de la machine</li> <li>• En mode onduleur : destruction des protections</li> </ul>
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement blocage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

### I.3.4 Variation de la fréquence

Les réseaux de distributions ou de transports ont une fréquence constante, sa variation est très rare sauf dans des circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans les conditions normales d'exploitations, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle de 50 Hz  $\pm$ 1% [18].



**Figure I- 5:** Variation de fréquence [16].

## I.4 Caractérisation et normes

### I.4.1 Puissance active

La puissance active  $P$  d'un signal comportant des harmoniques est la somme des puissances actives dues aux tensions et courants de même rang. La décomposition de la tension et du courant en leurs composantes harmoniques nous donne [13].

$$P = \sum_{i=1}^{\infty} (U_i I_i \cos \varphi_i) \quad (\text{I-2})$$

$\varphi_i$  étant le déphasage entre la tension et le courant de l'harmonique de rang  $i$ . En l'absence d'harmoniques, on retrouve bien l'expression :

$$P = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (\text{I-3})$$

### I.4.2 Puissance réactive

$$Q = \sum_{i=1}^{\infty} (U_i I_i \sin \varphi_i) \quad (\text{I-4})$$

### I.4.3 Puissance déformante

Considérons la puissance apparente  $S$ .

$$S = U_{\text{eff}} I_{\text{eff}} \quad (\text{I-5})$$

En présence d'harmoniques, on peut écrire

$$S^2 = \sum_{i=0}^{\infty} (U_i^2) \times \sum_{i=0}^{\infty} (I_i^2) \quad (\text{I-6})$$

Par conséquent, en présence d'harmoniques, la relation  $S^2 = P^2 + Q^2$  n'est pas applicable. On définit la puissance de distorsion  $D$  tel que :

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (\text{I-7})$$

### I.4.4 Facteur de puissance

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active  $P$  et la puissance apparente  $S$ . Les générateurs, les transformateurs, les lignes de transport et les appareils de contrôle et de mesure sont dimensionnés pour la tension et le courant nominal. Une faible valeur du facteur de puissance se traduit par une mauvaise utilisation de ces équipements. Dans le cas où il y a des harmoniques, une puissance supplémentaire appelée la puissance déformante ( $D$ ), donnée par la relation (I-7), apparaît comme le montre le diagramme de Fresnel de la figure (I-4)[19].

$$D = 3 \cdot V_1 \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \quad (\text{I-8})$$

Le facteur de puissance (*FP*) devient :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{D^2 + P^2 + Q^2}} = \cos \varphi_1 \cos \gamma \quad (\text{I-9})$$

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

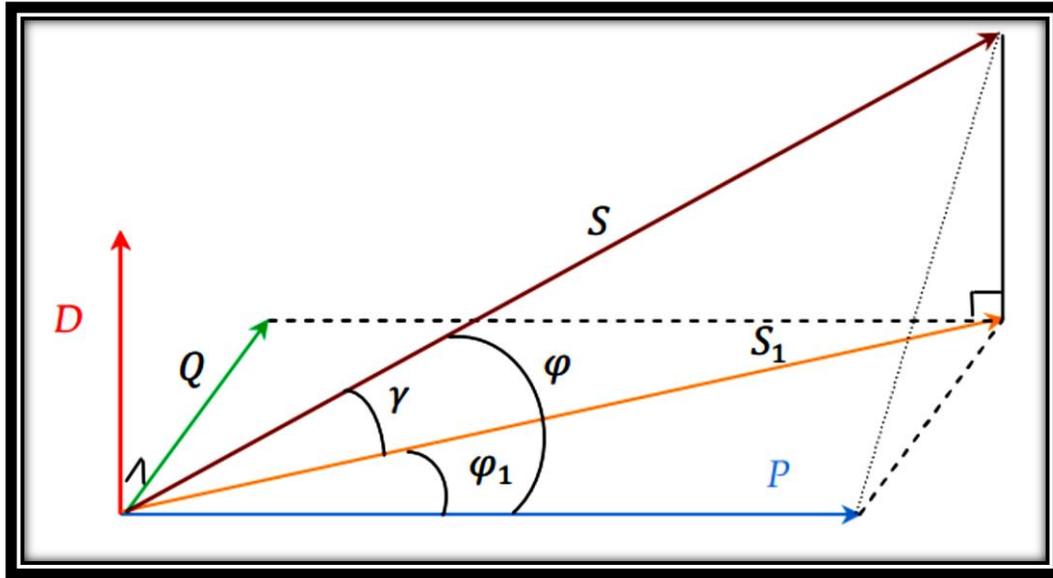


Figure I- 6: diagramme vectorielle du facteur de puissance [20].

- $\varphi_1$  : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente  $S_1$  dans le cas d'un système linéaire.
- $\varphi$  : Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente  $S$  dans le cas d'un système non linéaire.

#### I.4.5 Rang d'harmonique

Elle est définie par[21]:

$$n = \frac{h_i}{h_1} \quad (\text{I-10})$$

Ou

$h_i$  : Composante harmonique de rang  $i$ ,

$h_1$  : Composante fondamentale.

#### I.4.6 Taux global de distorsion harmonique

Le terme **THD** correspond au (Total Harmonique Distorsion), représente le rapport entre la valeur efficace des harmoniques et la valeur efficace du fondamental. Le taux de distorsion

harmonique est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif[22].

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} h_i^2 / h_1^2} \quad (\text{I-11})$$

#### I.4.7 THD en courant ou en tension

Il existe deux sortes de THD : en tension (apparaît à la source) ou en courant (dû aux charges non linéaires) Lorsqu'il s'agit des harmoniques de courant, l'expression devient.

$$\text{THD}_i = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2 / I_1^2} \quad (\text{I-12})$$

$I_i$  : Valeur efficace du courant harmonique du rang  $i$ .

$I_1$  : Valeur efficace du courant fondamental.

Lorsqu'il s'agit des harmoniques de tension, l'expression devient [3, 21, 23]

$$\text{THD}_v = \sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2 / V_1^2} \quad (\text{I-13})$$

$V_i$  : Valeur efficace du Tension harmonique du rang  $i$ .

$V_1$ : Valeur efficace du Tension fondamental.

#### I.4.8 Normes imposées sur le THD

Afin de garantir un niveau de qualité de l'énergie satisfaisant en limitant les effets des perturbations harmoniques, les distributeurs d'énergie et les utilisateurs sont amenés à respecter des normes et des recommandations qui définissent les règles relatives à la compatibilité électromagnétique (CEM) définies[21]:

- ✓ Au niveau international par la **CEI**,
- ✓ Au niveau européen par le **CENELEC**,
- ✓ Au niveau français, par l'**UTE** et le **CEF**.

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

Afin de faciliter la connaissance des normes pour chaque domaine, les normes **CEI** qui couvrent tous les domaines de l'électrotechnique sont numérotées et référencées comme par exemple **CEI 61000** sur la compatibilité électromagnétique et **CEI 60063** qui définit les séries

de valeurs normalisées pour les résistances et condensateurs ,...etc. Les normes internationales publiées par la **CEI** dans les domaines de l'électricité et de l'électronique ont pour objectifs :

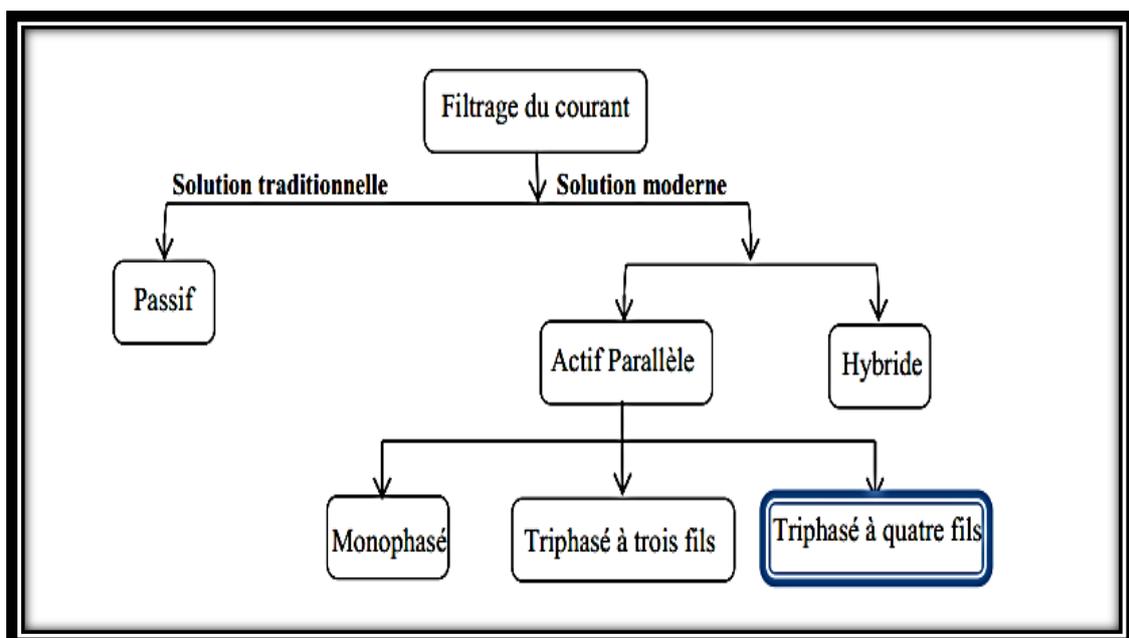
- Faciliter les échanges dans le monde en supprimant les barrières techniques.
- Assurer la qualité des produits.
- Garantir l'interopérabilité des produits et des systèmes.
- Contribuer à la sécurité lors de l'utilisation des produits
- Contribuer à la protection de l'environnement et à la qualité de vie.

Au niveau international (**CEI**), les normes **CEI 61000** publiées dans le domaine de la compatibilité électromagnétique (CEM) sont divisées en plusieurs parties, conformément à la structure suivante :

- ❖ Généralités,
- ❖ Environnement.
- ❖ Limites.
- ❖ Techniques d'essais et de mesures.
- ❖ Guide d'installation et d'atténuation.
- ❖ Normes génériques.

### I.5 Solutions de dépollution du courant dans les réseaux électriques

Afin de compenser les perturbations du courant d'après la figure (I-5), deux groupes de solution de dépollution, traditionnelle et moderne existent [22, 24]



*Figure I- 7: Différentes solutions utilisées dans le filtrage du courant [7].*

### **I.5.1 Solutions traditionnelles**

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 [25].

#### **I.5.1.1 Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau**

L'impédance de court-circuit en un point du réseau est inversement proportionnelle à la puissance de court-circuit disponible en ce point. Aussi l'impact des harmoniques sera d'autant plus réduit si la puissance de court-circuit est grande [26].

La puissance harmonique augmente lorsque la puissance de court-circuit diminue si l'on ne prend pas en compte les phénomènes de résonance. La diminution de l'impédance totale en amont de la charge non-linéaire permet de réduire la tension créée par les harmoniques de courant, et donc de diminuer le taux de distorsion harmonique en tension au point de raccordement. En revanche, les courants harmoniques ne sont pas atténués.

#### **I.5.1.2 Utilisation d'inductances anti-harmoniques**

Cette disposition consiste à protéger les condensateurs, destinés à améliorer le facteur de puissance, en plaçant une inductance en série. Cette inductance est calculée de façon à ce que la fréquence de résonance ne corresponde à aucun des harmoniques présents [25].

#### **I.5.1.3 Placement d'une inductance de ligne**

Dans le but de limiter la prolifération des effets nocifs dans le réseau, il est possible de limiter les courants harmoniques de certains convertisseurs. Cette solution est utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés. Elle consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [26].

#### **I.5.1.4 Compensation de la puissance réactive**

La compensation de l'énergie réactive utilisée pour limiter le transport de cette énergie qui cause une chute de tension et des pertes au long de la ligne. Différentes méthodes de compensation sont utilisées pour relever le facteur de puissance, la plus simple consiste à placer des batteries de condensateur en parallèle avec le réseau ou avec la charge (comme des moteurs asynchrones) [27, 28].

#### **I.5.1.5 Filtres passifs**

Il s'agit des premiers dispositifs utilisés pour l'élimination d'harmoniques. Ils sont composés par des éléments passifs comme des inductances, des condensateurs et des

résistances. En général, les filtres d'harmoniques sont connectés en parallèle avec les charges génératrices d'harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électriques, etc...). Parmi les dispositifs de filtrage passif les plus répandus, on distingue le filtre passif résonant et le filtre passif amorti ou passe-haut, c'est à dire dans le filtre passif et donc plus dans l'impédance de court-circuit du réseau comme l'illustre la figure (I-6).

Equations des courants :

$$i_{ch} = i_{fondmental} + i_{h-5} + i_{h-7} + i_{h-11} + i_{h-13} + \dots \quad (I-14)$$

$$i_{filter} = i_{h-5} \quad (I-15)$$

$$i_{rés} = i_{fondmental} + i_{h-7} + i_{h-11} + i_{h-13} + \dots \quad (I-16)$$

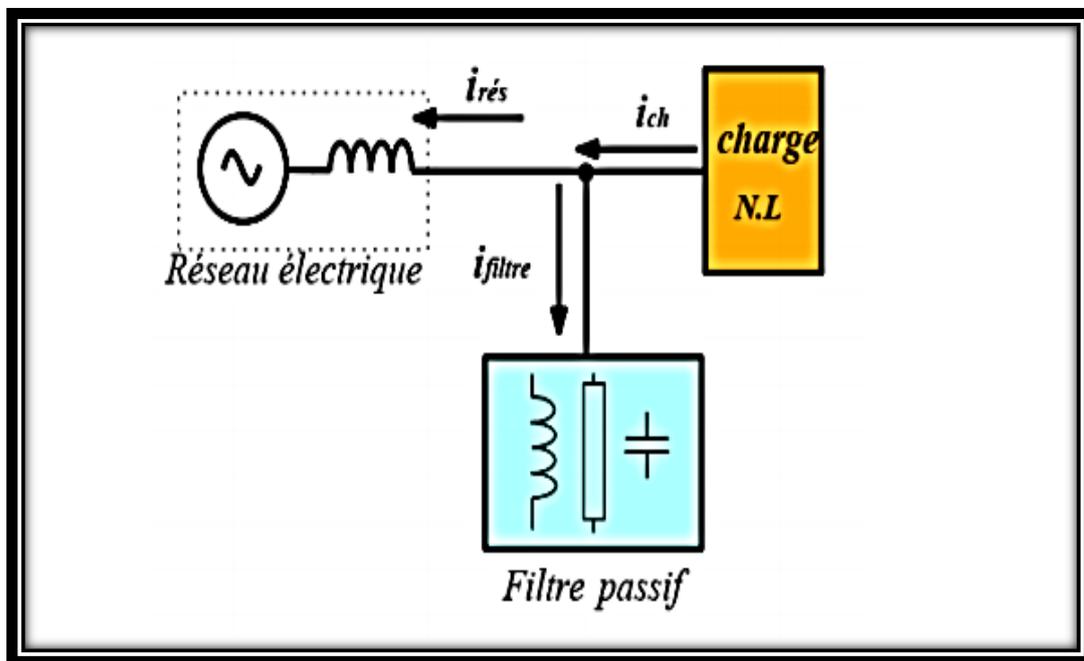


Figure I- 8: Raccordement d'un filtre passif [7].

Parmi les dispositifs de filtrage les plus répandus, on distingue le filtre passif résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut[29].

**a) 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 I-7, son impédance équivalente est[7] :

$$Z_{éq} = \frac{1-lc\omega^2+jRC\omega}{jc\omega} \quad (I-17)$$

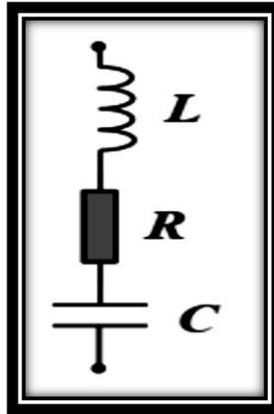


Figure I- 9: Filtre passif résonant [7].

### b) 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 I-8. Son impédance équivalente est :

$$Z_{\text{éq}}(\omega) = \frac{1 - LC\omega^2 + j\frac{L}{C}\omega}{-\frac{L}{R}C\omega^2 + jC\omega} \quad (\text{I-18})$$

Le filtre amorti peut réduire le risque de résonance non souhaitée, et permet de réduire considérablement la taille du filtre passif, en fonctionnant sur une large gamme de fréquence. En distingue trois types de filtre amorti : le filtre de premier ordre est très peu utilisé car il exige une grande capacité et provoque des pertes de puissance élevées. Les filtres de deuxième et troisième ordres sont plus performances.

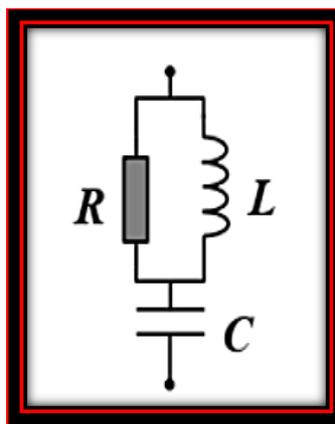


Figure I- 10: Filtre passif amorti [7].

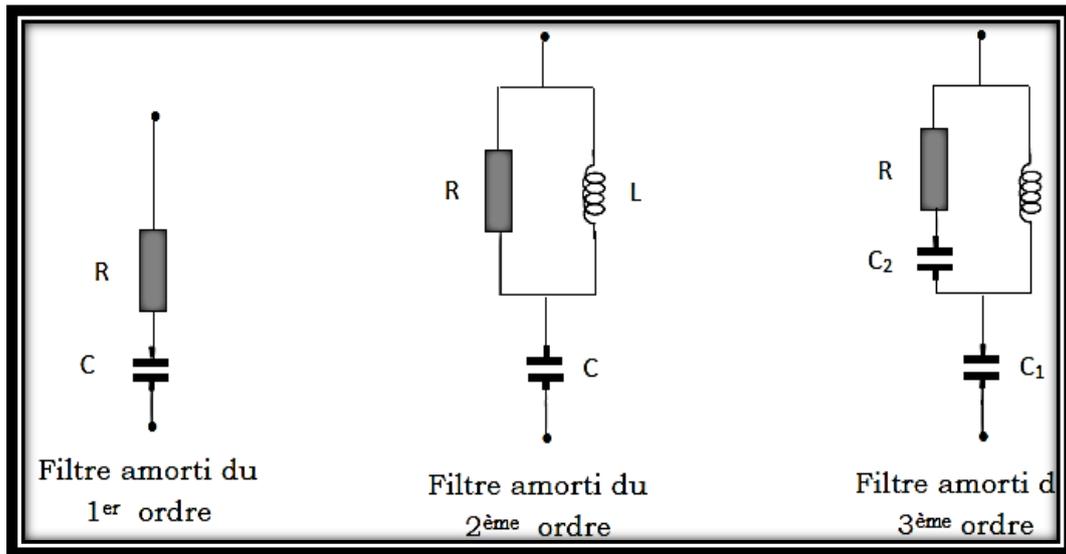


Figure I- 11: Différents types de filtres amortis [30].

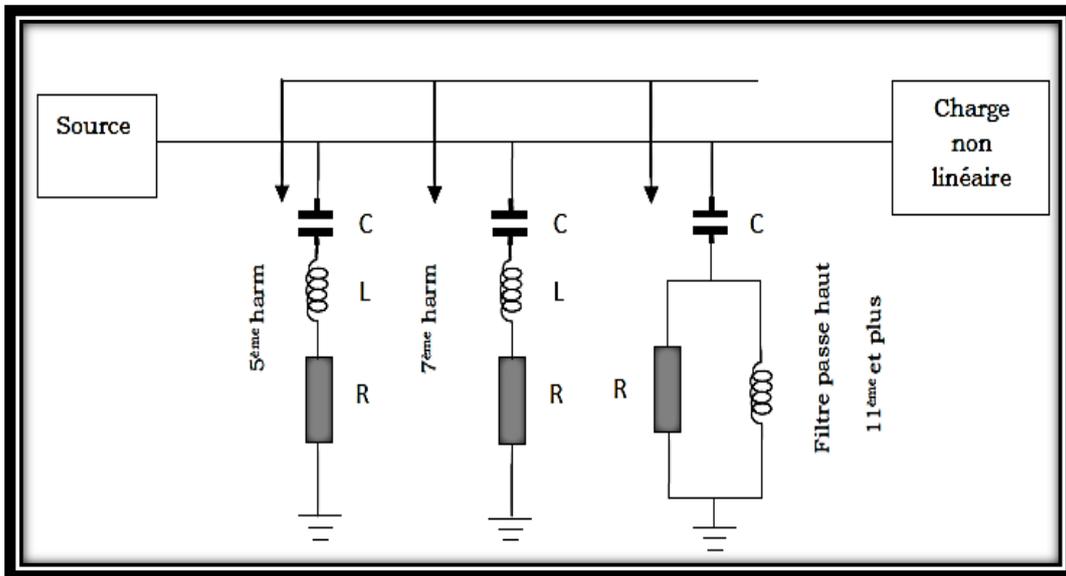


Figure I- 12: Exemple pratique de combinaison de filtres passifs résonants et amortis [30].

## I.5.2 Solutions modernes

### I.5.2.1. Filtres actifs

Les inconvénients inhérents aux filtres passifs (non adaptatif aux variations de la charge et du réseau, phénomène de résonance) et l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les Transistors IGBT, ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres appelée filtres actifs de puissance (APF). Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à ce que le courant et la tension du réseau soient rendus sinusoïdaux et parfois avec un facteur de puissance unitaire. Le filtre actif est connecté en série, en parallèle, en combinant ces deux dernières structures

ensembles ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser[7].

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

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

Pourtant, ils présentent quelques inconvénients :

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

Deux types de convertisseurs connus dans la littérature constituent l'APF :

Convertisseur à source de courant (CSI) ou à source de tension(VSI). Bien que la première structure est suffisamment fiable, elle présente des pertes élevées et nécessite d'une importante et coûteuse inductance. De plus, elle ne peut être utilisée dans des applications multi niveaux pour améliorer les performances avec un coût acceptable. Cependant, la deuxième structure en tension d'APF, où le bus continu est équipé d'un condensateur représentant l'élément de stockage, est sûrement la plus répandue car moins onéreuse, plus légère et extensible à des applications multi niveaux. Ainsi, pour la suite nous ne présentons que les différentes structures d'APF avec source de tension en entrée.

#### **a) Filtre actif série**

Le but du filtre actif série est de créer une impédance en série avec le réseau qui sera nulle pour le fondamental et de valeur élevée pour les harmoniques. Il est destiné à protéger les installations sensibles aux perturbations provenant du réseau telles que les harmoniques en tension, les surtensions, déséquilibres et creux de tension. En revanche, le filtrage série ne permet pas de compenser les courants harmoniques consommés par la charge. En plus, ce filtre nécessite une protection complexe contre le court-circuit des réseaux. En effet, lors d'un court-circuit côté réseau, ce dernier peut être amené à supporter tout le courant de court-circuit[7].

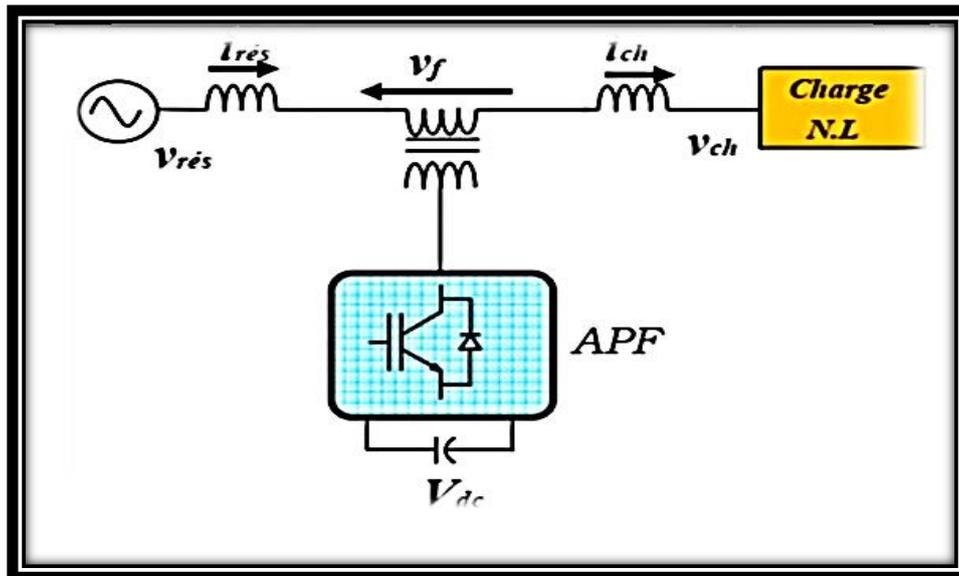


Figure I- 13: Filtre actif série [7].

### I-6-2 Filtre actif parallèle

Sur la figure I-12 apparaît le synoptique d'un filtre actif parallèle. Le filtre actif est constitué d'un onduleur de tension et d'un filtre inductif en sortie. Ainsi, l'inductance en sortie de l'onduleur donne la nature de source de courant au filtre actif. Dans le cas où le réseau alimente plusieurs charges polluantes, il est préférable d'utiliser un seul filtre actif pour toutes les charges car, dans ce cas, le coût du filtrage est moindre. Cependant, lorsque la puissance des charges polluantes est élevée, la solution d'un filtre actif par charge s'avère nécessaire. Cette dernière méthode est bien sûr plus coûteuse mais elle possède l'avantage d'éviter que la stabilité des harmoniques vienne perturber le réseau dans le cas où un filtre actif est défectueux[7].

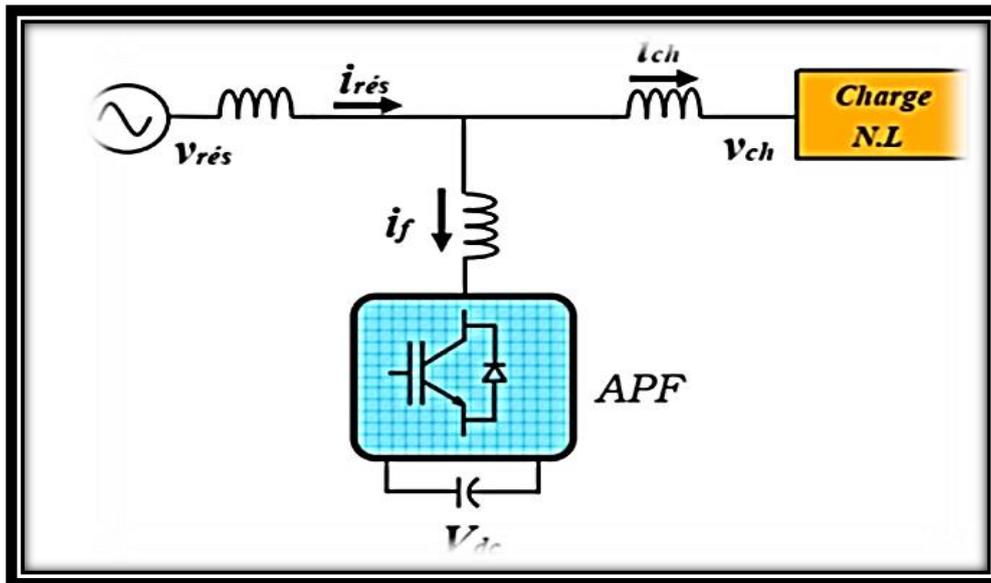


Figure I- 14: Filtre actif parallèle [7].

### b) Filtre combiné parallèle-série (UPQC)

Cette combinaison parallèle-série actifs, aussi appelée (Unified Power Quality Conditionner) (UPQC), résulte de l'association des deux filtres actifs parallèle et série, comme le montre la figure (I-13). Profitant des avantages des deux filtres actifs, l'UPQC assure un courant et une tension sinusoïdaux du réseau électrique à partir d'un courant et d'une tension perturbés de celui-ci[8].

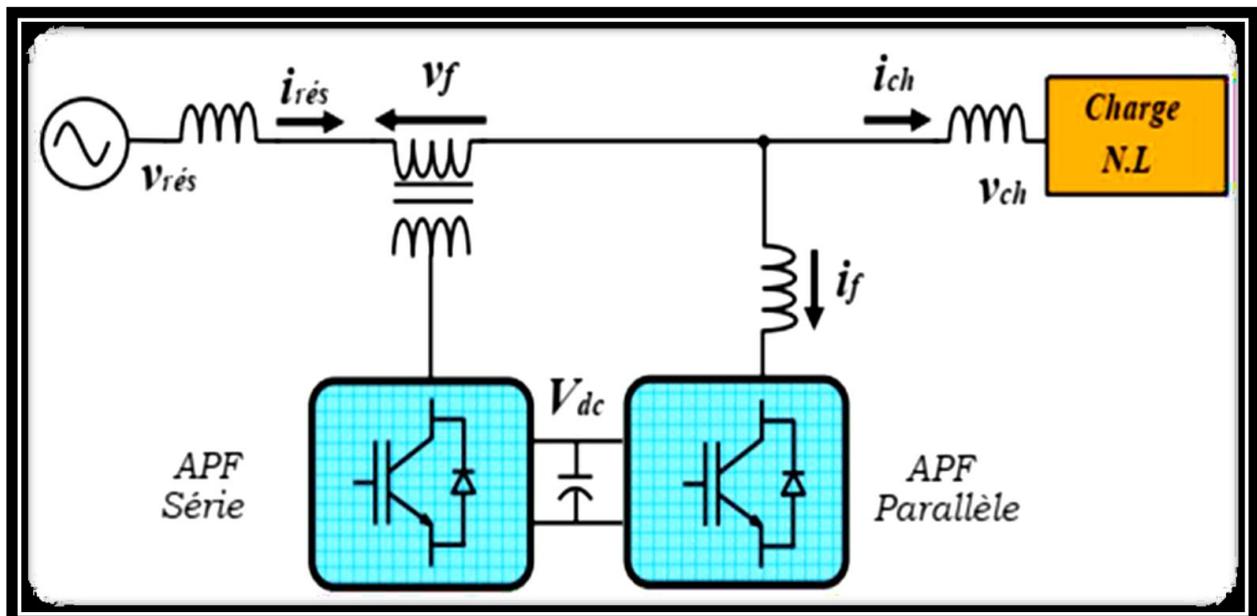


Figure I- 15: Filtre combiné parallèle-série (UPQC) [7].

Il existe plusieurs autres groupes mixtes de filtres actifs avec cette fois des filtres passifs :

- ❖ Filtre actif série connecter en série avec des filtres passifs parallèles.
- ❖ Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- ❖ Filtre actif parallèle avec des filtres passifs parallèles.

### c) Filtre actif hybride

Connecté avec ou sans transformateurs au réseau, le filtre actif hybride (Fig.I-14) est constitué d'un filtre passif connecté directement en série avec le filtre actif, ce qui entraîne une diminution de la tension du bus continu comparativement à celle d'un filtre actif pur et une réduction du dimensionnement du filtre hybride. En plus, le filtre passif évite les oscillations dues à la commutation (HF) car il présente une haute impédance à cette fréquence. Cependant, la mise en place d'une inductance à l'entrée de la charge non linéaire est indispensable pour le bon fonctionnement du filtre hybride[7].

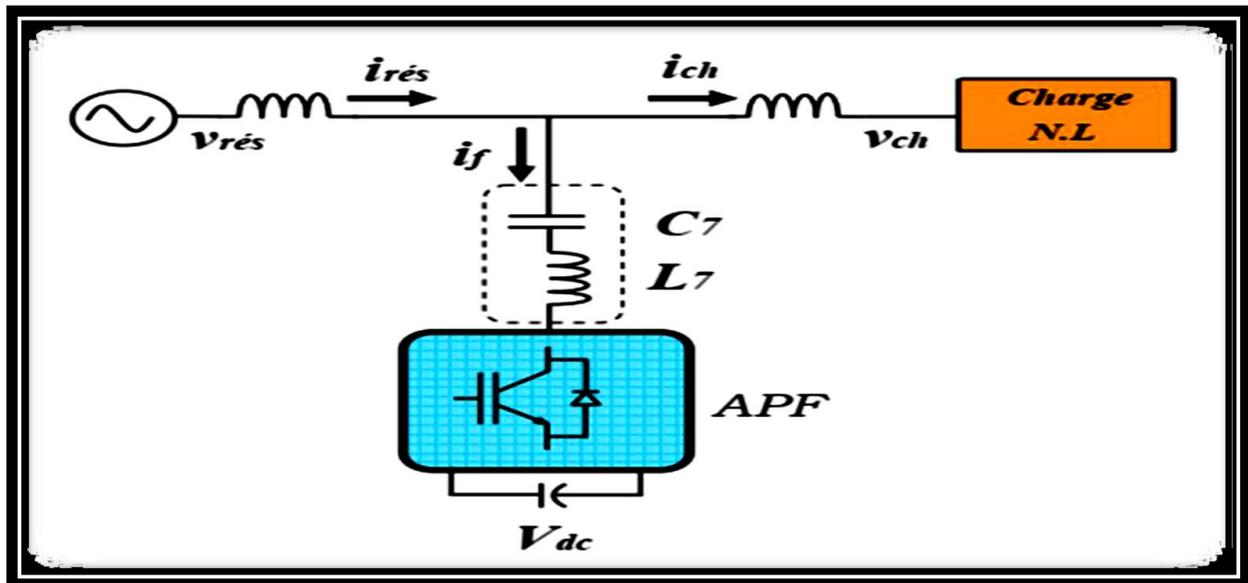


Figure I- 16: Filtre actif hybride [7].

### d) Filtre actif série avec un filtre passif parallèle

Une version moins chère de la structure précédente est illustrée par la figure (I-15) où un filtre actif série et un filtre parallèle passif sont exploités.

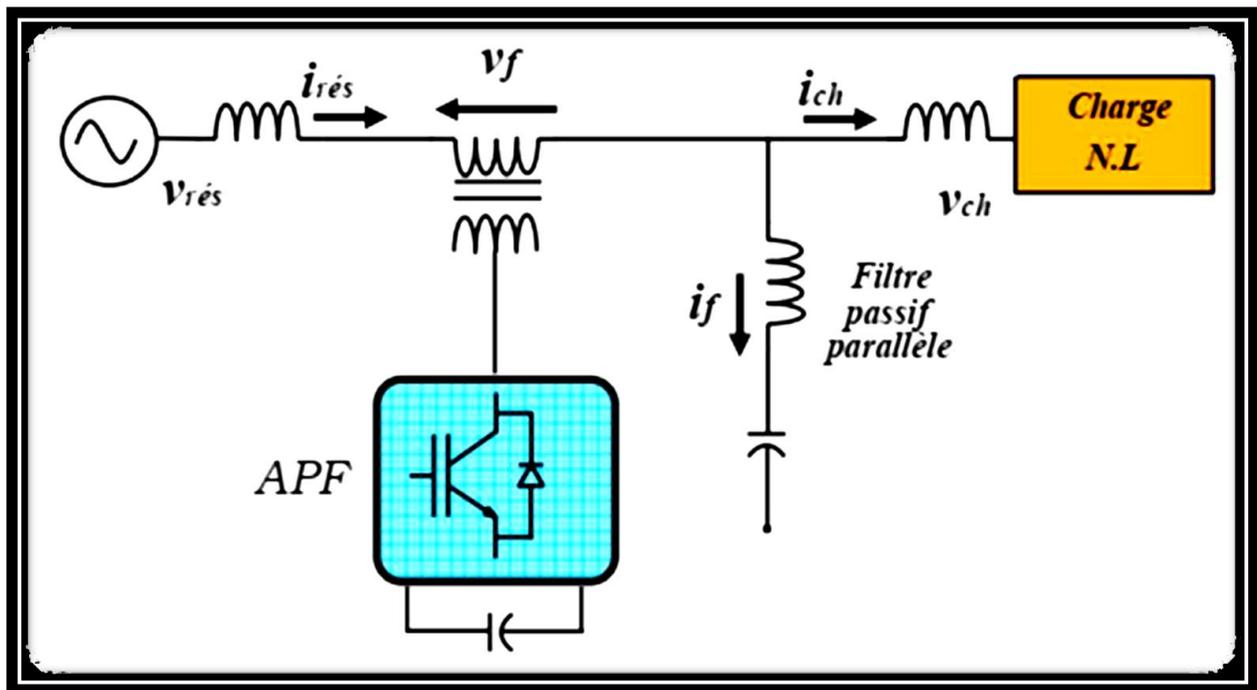


Figure I- 17: Filtre actif série avec un filtre passif parallèle [7].

Principalement, le filtre série régule la tension au point PCC tandis que le filtre parallèle est réglé sur quelques harmoniques de courant (rangs inférieurs) qui doivent être supprimés. Cette topologie a la possibilité de réduire les harmoniques de tension et de courant à un prix raisonnable[7].

### I.7 Les systèmes de transmission en courant alternatif flexibles FACTS

Les systèmes de transmission en courant alternatif flexibles, terme traduit de l'anglais « Flexible Alternating Current Transmission Systems (FACTS) », peuvent contribuer à faire face aux problèmes rencontrés dans l'exploitation des réseaux électriques. Le concept FACTS, introduit en 1986 par l'Electric Power Research Institute (EPRI), regroupe l'ensemble des dispositifs basés sur l'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation d'un réseau électrique. Son développement est étroitement lié aux progrès réalisés dans le domaine des composants semi-conducteurs de puissance et plus particulièrement des éléments commandables tels que le thyristor et le thyristor GTO. Des études et des réalisations pratiques ont mis en évidence l'énorme potentiel des dispositifs FACTS. Plusieurs types de FACTS, avec des architectures et des technologies différentes, ont été développés. Parmi eux, les plus connus sont[31] :

- Le SVC (Statice Var Compensator).
- Le STATCOM (Static Synchronous Compensator).
- Le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor).

- L'UPFC (Unified Power Flow Controller).

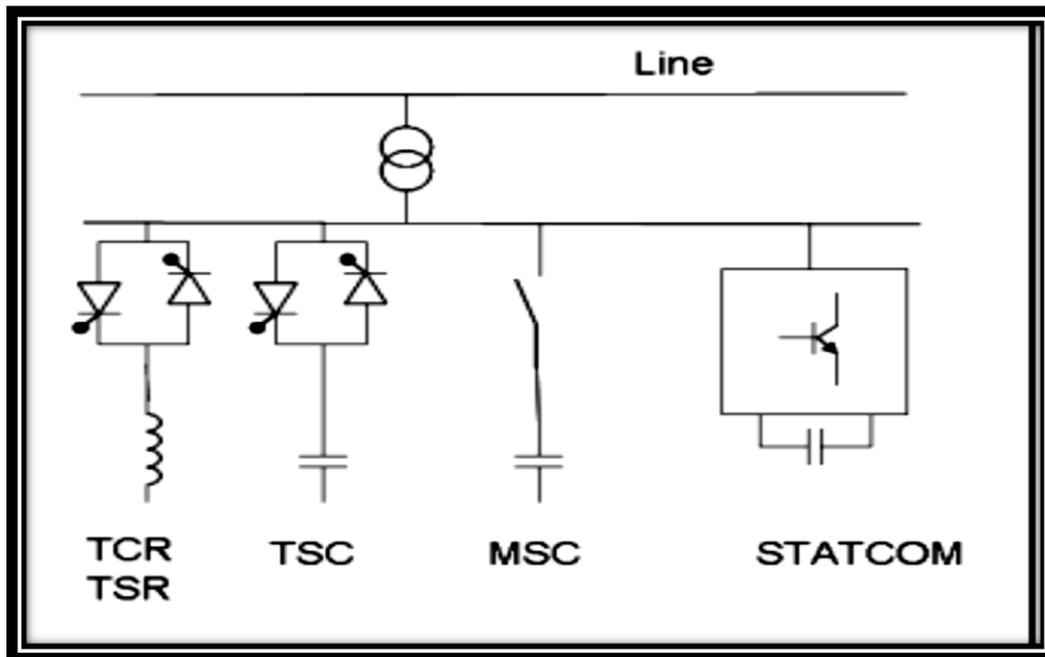


Figure I- 18:Schema d'un FACT shunt [32].

Les dispositifs **FACTS** sont utilisés principalement dans les contextes suivants :

- ◆ Limitation des variations de la tension à une valeur assignée en un point du réseau et ce quelles que soient les variations de la charge.
- ◆ Augmentation de la réserve de stabilité transitoire.
- ◆ Atténuation des oscillations de puissance.
- ◆ Contrôle des transits de puissance sur les lignes et liaisons afin de réduire les surcharges.

## 1.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. Comme nous avons pu le constater que, les harmoniques les déséquilibres de courant et de tension, les creux de tension ont des effets néfastes sur les équipements électriques. Ces effets peuvent aller des échauffements et de la dégradation du fonctionnement jusqu'à la destruction totale de ces équipements. Nous avons donné des définitions dont la connaissance nécessaire pour comprendre l'ensemble des développements de ce mémoire. Nous avons constaté l'importance de différentes solutions du filtrage, il y'a des points positifs ainsi que des points négatifs pour chaque type de solution. En vue de leur importance, les filtres actifs du courant sont aujourd'hui au stade de la recherche.

Le filtre actif parallèle (FAP) peut être installé pour compenser toutes les perturbations de courant comme les harmoniques et la puissance réactive. Le filtre actif série (FAS) peut être

installé pour compenser toutes les perturbations de tension comme les harmoniques et les creux de tension.

La combinaison parallèle-série actifs (UPQC) est la solution universelle pour compenser toutes les perturbations en courant et en tension. D'autres solutions de dépollution consistent à associer des filtres actifs et passifs pour trouver un compromis entre l'efficacité de compensation et le coût.

Le chapitre suivant est consacré à la structure et la commande du filtre actif parallèle.

## *Chapitre II :*

---

# *Structure et commande du filtre actif parallèle (FAP)*

---

## II.1 Introduction

Le but de ce travail est d'améliorer le niveau de la qualité de l'énergie et de proposer une étude détaillée sur le filtre actif parallèle.

Dans ce chapitre, nous étudierons la structure détaillée d'un filtre actif parallèle, laquelle a été divisé en deux grandes parties:

- ❖ Partie puissance.
- ❖ Partie commande.

## II.2 Principe de filtrage actif

Dans le cas idéal le rôle du filtre actif consiste à éliminer tous les harmoniques produits par la charge non linéaire en fournissant à tout instant des harmoniques égaux en amplitude et en opposition de phase à ceux produits par la charge, et ceci afin que le courant dans la ligne reste purement sinusoïdal et égal au fondamental du courant de charge [33].

## II.3 Objectif du filtre actif

Un filtre actif est un dispositif qui exploite au moins un convertisseur statique pour satisfaire la fonction de dépollution harmonique. Les besoins en termes de dépollution harmonique sont divers, parce qu'on espère toujours garantir :

- Le non pollution d'un réseau propre alimentant une charge sensible.
- Le bon fonctionnement d'une charge sensible dans un environnement pollué.

## II.4 Filtre actif parallèle (FAP)

### II.4.1 Principe de fonctionnement

Le compensateur actif est connecté en parallèle avec le réseau, et injecte en permanence de courants qui correspondent à tout moment aux composantes harmoniques des courants absorbés par la charge. de cette manière, le courant fourni par la source d'énergie reste sinusoïdal [34].

Une mesure du courant de la charge non linéaire permet de connaître le courant harmonique à fournir. L'injection peut être réalisée par différents types de convertisseurs.

Le courant harmonique  $I_{har}$ , le courant d'entrée  $I_c$  du convertisseur polluant et le courant sinusoïdal  $I_s$  fourni par le réseau sont illustrés comme le montre la figure II-1.

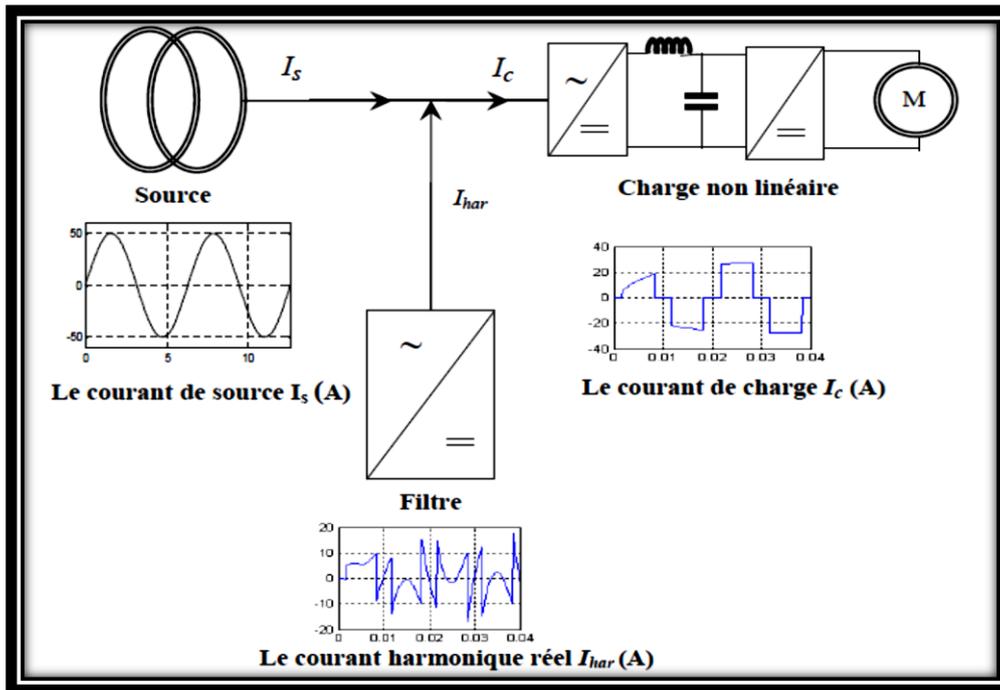


Figure II- 1: Principe du filtrage actif parallèle [11].

### II.4.2 Structure d'un filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle est composée de deux partie : la partie puissance et la partie contrôle-commande comme montre la figure (II-22).

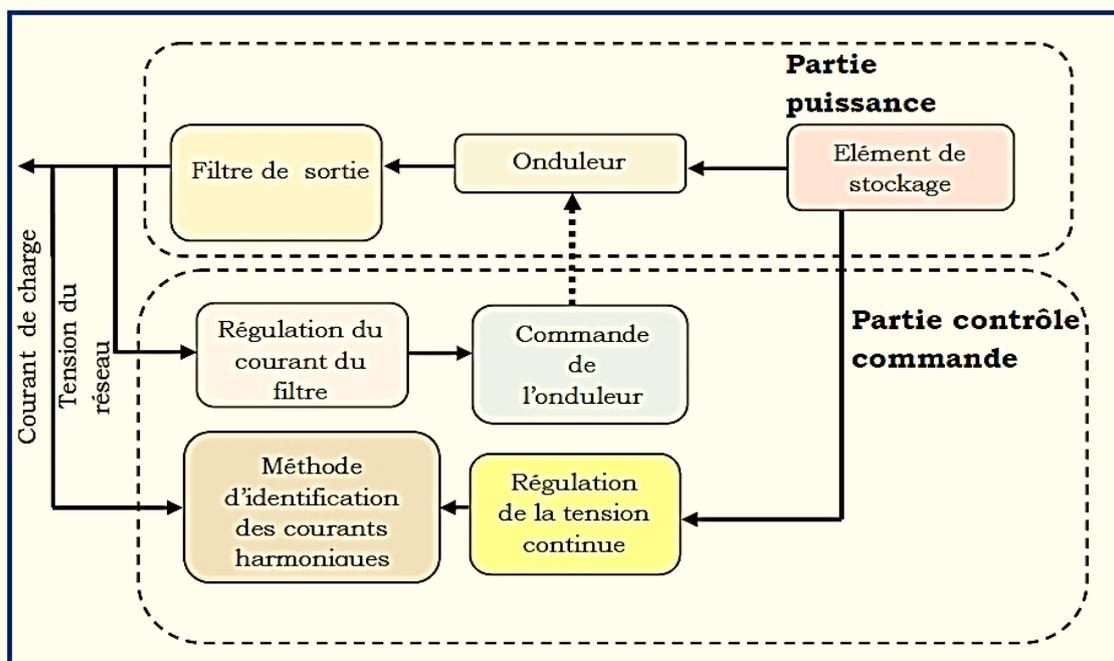


Figure II- 2: Structure générale d'un filtre actif parallèle[30].

### ➤ Partie puissance

La partie puissance est constituée d'un:

- ✓ Onduleur de tension à base d'interrupteurs de puissance, commandables à l'amorçage et au blocage (GTO, IGBT, MOSFET...etc.) avec des diodes en antiparallèle,
- ✓ Circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif,
- ✓ Filtre de sortie.

### ➤ Partie puissance contrôle-commande

La partie contrôle-commande est constituée de :

- ✓ Méthode d'identification des courants perturbés,
- ✓ Régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie,
- ✓ Régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension,
- ✓ Commande de l'onduleur de tension.

#### II.4.2.1 FAP à structure de tension

La figure (II-3) illustre le filtre actif parallèle (FAP) à structure de tension. La capacité et l'inductance de couplage caractérisent cette structure. L'élément servant de source d'énergie est la capacité  $C$  qui doit délivrer une tension quasi constante. La fluctuation de cette tension doit être faible, elle ne doit pas dépasser la limite de tension supportable par les semi-conducteurs [35].

De plus, pour une inductance  $L_f$  donnée, cette tension ne doit pas être inférieure à une certaine limite, car cela affectera les performances de compensation du filtre actif.

L'inductance par laquelle l'onduleur est relié au réseau sert à filtrer les courants harmoniques hautes fréquences. Ces derniers sont causés par les impulsions de tension générées par l'onduleur.

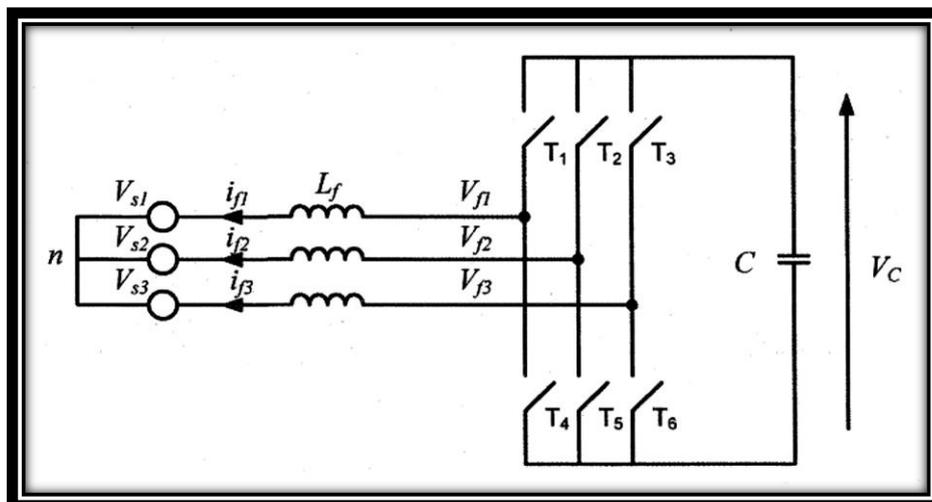


Figure II- 3: Filtre actif parallèle à structure de tension [36].

Pour la structure de tension, les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant. Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur doivent être associés en antiparallèle avec des diodes. Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture.

Dans cette structure, les deux interrupteurs d'un même bras fonctionnent de façon complémentaire, la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Ils ne peuvent donc être fermés à la fois sous peine de court-circuiter la source de tension (le condensateur). Par contre, dans certains cas, ils peuvent être ouverts simultanément (temps mort), et cela se produit durant les commutations pour permettre l'écoulement de la durée de blocage du premier interrupteur avant l'amorçage du deuxième [37].

#### II.4.2.2 FAP à source de courant

Le schéma de principe du filtre actif parallèle à structure de courant est représenté sur la figure (II-4). On insère entre l'onduleur et le réseau un filtre passe-bas du second ordre, l'inductance  $L_f$  et le filtre caractérisent cette structure. L'élément servant de source d'énergie est l'inductance  $L_{df}$  qui doit délivrer un courant continu de valeur quasi constante. Tout comme l'onduleur à structure de tension, la présence du filtre de couplage sert à filtrer les tensions harmoniques générées par les courants de l'onduleur [35].

Les harmoniques près de la fréquence de résonance du filtre passe-bas  $L_f C_f$  sont amplifiées et peuvent causer de graves dommages au montage. Dans le but de prévenir ce phénomène indésirable, des résistances peuvent être insérées dans le filtre passe-bas ou un contrôle approprié du courant, qui tient en compte la dérivée du courant instantané du filtre actif, peut être adopté.

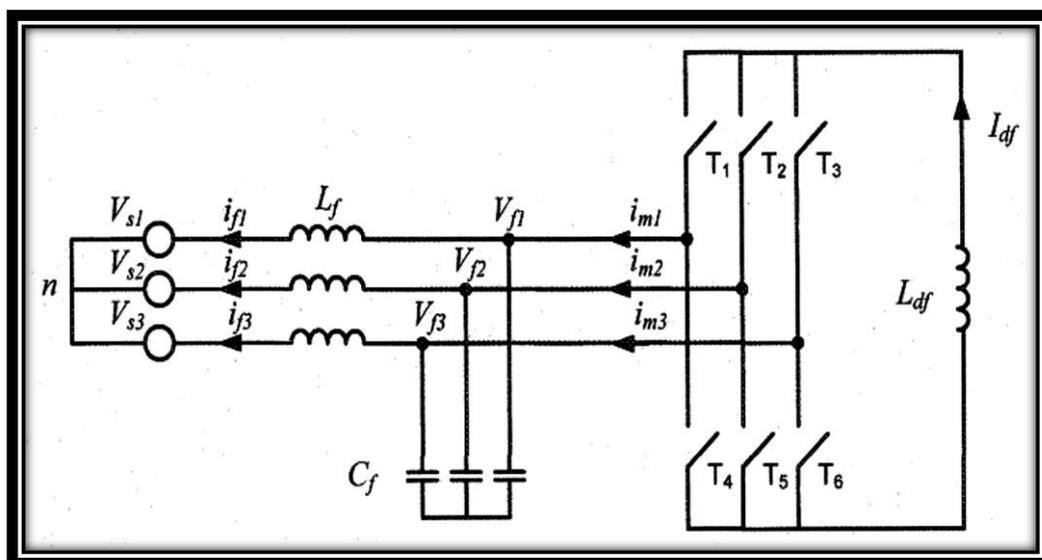


Figure II- 4: Filtre actif parallèle à structure de courant [36].

Les semi-conducteurs servant d'interrupteur à l'onduleur sont unidirectionnels en courant, mais bidirectionnels en tension. Ces interrupteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture, et pour que leurs états ne dépendent que des signaux de contrôle, il faut commander un seul composant par demi-point. Le mode où il y a deux composants d'un demi pont simultanément conducteurs existe uniquement lors des passages de courant d'une phase à l'autre (phénomène de commutation). Des trois interrupteurs reliés à la même borne de la source de courant continu, il faut qu'il y en ait toujours un fermé pour que cette source de courant ne soit jamais en circuit ouvert.

### II.4.2.3 Comparaison entre les deux structures

#### II.4.2.3.1 Élément de stockage

Le stockage de l'énergie est réalisé côté continu à l'aide d'un élément de stockage ( $C$  ou  $L_{df}$ ) servant de source en tension ou en courant continu pour l'onduleur. Dans le cas d'un système capacitif de stockage (cas de la structure en tension), le condensateur  $C$  joue le rôle de source de tension continue [35].

Le choix des paramètres du système de stockage a une influence directe sur la dynamique et sur les performances de compensation du **FAP**. Une tension continue élevée améliore la dynamique (pour assurer la continuité de courant la tension  $V_{cmoy}$  doit être au moins égale à  $3/2$  de la valeur maximale de la tension fondamentale côté alternatif du réseau). Or, ses ondulations dégradent la qualité de compensation du **FAP**. Tout en sachant que le choix de la valeur de la capacité  $C$  limite les ondulations de  $V_{dc}$ , une valeur élevée de  $C$  va permettre la diminution de ces dernières.

#### II.4.2.3.2 Filtrage des harmoniques générées par le découpage de l'onduleur

Le filtre actif doit être connecté au réseau de distribution à travers un filtre passif de découplage. Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte de deux points importants [36]:

- ✓ Fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation de Semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif.
- ✓ Préserver les performances du filtre actif.

Le filtre actif à structure de tension est couplé au réseau d'alimentation généralement par le biais d'un filtre passe-bas de premier ordre. Ce filtre est réalisé par une simple inductance de grande valeur. Cependant, une trop grande valeur d'inductance peut détériorer l'efficacité du filtrage si la tension du côté continu de l'onduleur n'est pas assez élevée. Afin de palier à ce

problème, un filtre passe-haut de troisième ordre servant à éliminer les harmoniques en hautes fréquences peut être installé si nécessaire.

Il est à noter cependant qu'avec cette solution, le filtre produit deux fréquences de résonance, ce qui complique le contrôle du filtre actif.

Le filtre actif à structure de courant est couplé au réseau d'alimentation par le biais d'un filtre passe-bas du second ordre réalisé au moyen d'une inductance ( $L_f$ ) et d'une capacité ( $C_f$ ). Par la sélection d'une fréquence de coupure appropriée, ce montage permet un compromis raisonnable entre la bande passante du filtre actif et l'atténuation des courants harmoniques générés par l'onduleur.

### II.4.2.3.3 Type de semi-conducteurs

Les semi-conducteurs utilisés par l'onduleur sont caractérisés par leur aptitude à supporter une tension et un courant maximal. Le dimensionnement de ces grandeurs dépend des circuits des deux côtés de l'onduleur (continu et alternatif), car ces derniers imposent les courants et les tensions de ces interrupteurs [36].

L'onduleur de tension utilise des semi-conducteurs réversibles en courant et unidirectionnels en tension. La tension que doivent supporter les semi-conducteurs composant l'onduleur de tension est limité par la valeur crête à crête de la tension  $V_c$ . L'intensité du courant qu'ils doivent supporter est imposée par le courant maximal généré par le filtre actif. Ils doivent être capables de supporter la valeur maximale du courant harmonique à compenser tout en tenant compte des courants harmoniques dus aux découpages.

Le semi-conducteur le plus approprié dans la conception de l'onduleur est le transistor **IGBT** avec une diode en antiparallèle.

D'une manière duale, l'onduleur de courant utilise des semi-conducteurs réversibles en tension mais unipolaires en courant. L'intensité du courant qu'ils doivent supporter est limitée par la valeur crête à crête du courant  $I_{df}$  tandis que la tension qu'ils doivent supporter doit être au moins égale à celle de la ligne d'alimentation. Suivant ce mode de fonctionnement, le semi-conducteur de prédilection est le thyristor **GTO** ou le transistor **IGBT** avec une diode connectée en série à la cathode servant de protection contre les surtensions.

### II.4.2.3.4 Commande et protection

Pour la structure en tension, le contrôle du courant de compensation généré par l'onduleur est réalisé par les tensions de ce même onduleur. La commande est par conséquent est plus lente. Par mesure de protection il convient d'insérer un temps mort lors du passage du courant entre deux interrupteurs d'un même bras [36].

Pour le filtre à structure courant, la commande est rapide et précise. Cette structure ne nécessite pas, de façon générale, une protection contre l'ouverture simultanée des interrupteurs d'un demi-point.

### II.5 Etude de la partie puissance du FAP

Dans cette section nous sommes intéressés à la partie puissance du FAP dont les composants sont les suivants :

- Onduleur à quatre bras.
- Filtre de couplage.
- Système de stockage de l'énergie

#### II.5.1 Description d'un onduleur triphasé à quatre bras

Dans cette topologie, nous utilisons un onduleur comprenant quatre bras constitués de huit interrupteurs réversibles en courant (transistors bipolaires, IGBT, GTO) en antiparallèle avec une diode [35]. Comme l'illustre la figure (II-5).

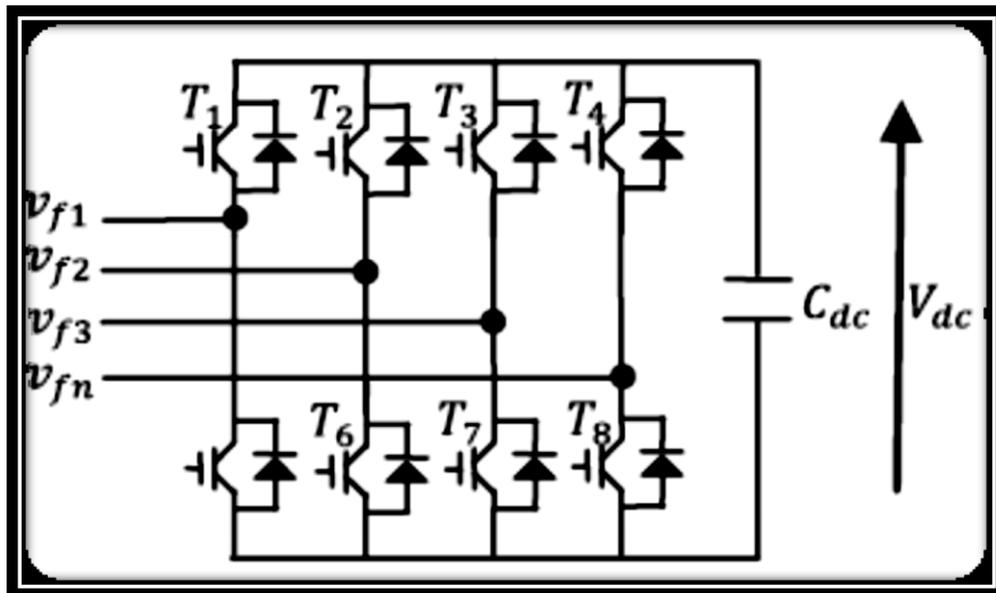


Figure II- 5: Onduleur à quatre bras pour un réseau triphasé à quatre fils [7].

Les états de commutation pour ce type d'onduleur sont présentés dans le tableau II-1. Ils sont obtenus grâce aux expressions suivantes [7] .

$$V_{f1} = (T_1 - T_4)V_{dc} \tag{II-1}$$

$$V_{f2} = (T_2 - T_4)V_{dc} \tag{II-2}$$

$$V_{f3} = (T_3 - T_4)V_{dc} \tag{II-3}$$

$$i_{dc} = T_1 i_1 + T_2 i_2 + T_3 i_3 \quad (\text{II-4})$$

Avec :  $T_i = 1$  si  $T_{i+4}$  est fermé, et  $T_i = 0$  si  $T_{i+4}$  est ouvert, et  $i=1$  à 4

**Tableau II- 1:** Tensions générées par l'onduleur de tension à quatre bras [7].

K	$T_4$	$T_3$	$T_2$	$T_1$	$V_{f3}$	$V_{f2}$	$V_{f1}$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	1	0	0	$V_{dc}$
2	0	0	1	0	0	$V_{dc}$	0
3	0	0	1	1	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$
4	0	1	0	0	$V_{dc}$	0	0
5	0	1	0	1	$V_{dc}$	0	$V_{dc}$
6	0	1	1	0	$V_{dc}$	$V_{dc}$	0
7	0	1	1	1	$V_{dc}$	$V_{dc}$	$V_{dc}$
8	1	0	0	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
9	1	0	0	1	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
10	1	0	1	0	$-V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
11	1	0	1	1	$-V_{dc}$	0	0
12	1	1	0	0	0	$-V_{dc}$	$-V_{dc}$
13	1	1	0	1	0	$-V_{dc}$	0
14	1	1	1	0	0	0	$-V_{dc}$
15	1	1	1	1	0	0	0

### II.5.2 Filtre de couplage

Le filtre de couplage est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau. Il est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants [7] :

- ✓ assurer la dynamique du courant du filtre défini par :

$$\frac{di_f}{dt} = \frac{di_h}{dt} \quad (\text{II-5})$$

Où

$i_f$  : Courant du filtre.

$i_h$  : Courant harmonique de la charge.

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

Pour satisfaire ces deux conditions, on utilise un filtre de premier ordre, composé d'une inductance  $L_f$  avec une résistance interne  $R_f$ , une petite valeur de cette inductance assure la dynamique du courant. Contrairement, une valeur relativement grande de celle-là empêche les composantes dues aux commutations de se propager sur le réseau. En négligeant la résistance de ce filtre de couplage on obtient [14, 38] :

$$\left(\frac{di_f}{dt}\right)_{max} = \frac{V_{fmax} - V_{smax}}{L_f} \quad (\text{II-6})$$

Avec :

$V_{fmax}$ : Valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur.

$V_{smax}$  : Valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre.

Prenons la valeur maximale de tension :

$$v_{fmax} = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc} \quad (\text{II-7})$$

Pour des petites variations du courant du filtre, on obtient:

$$\left(\frac{\Delta i_f}{\Delta T}\right)_{max} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} - V_{smax}}{L_f} \quad (\text{II-8})$$

avec :

$\Delta T = 1/f_{ond}$  : la période de variation du courant du filtre.

$f_{ond}$  : Fréquence de variation du courant du filtre.

En supposant la variation maximale du courant du filtre égale à 25% de la valeur maximale du courant du réseau, la valeur de l'inductance de couplage est donnée par :

$$L_f = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} - V_{smax}}{0.25 i_{max} f_{ond}} \quad (\text{II-9})$$

### II.5.3 Système de stockage d'énergie

Le stockage de l'énergie du côté continu se fait souvent par un système de stockage capacitif représenté par un condensateur  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension continue  $V_{dc}$  le choix des paramètres du système de stockage ( $V_{dc}$  et  $C_{dc}$ ) se répercute sur la dynamique et sur la qualité de compensation du filtre actif parallèle. En effet, une tension  $V_{dc}$  élevée améliore la dynamique du filtre actif. De plus, les ondulations de la tension continue  $V_{dc}$ , 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. Le condensateur du côté continu a deux fonctionnalités principales [39] :

Maintenir la tension avec un faible taux d'ondulation en régime permanent, être un réservoir qui sert à fournir la différence d'énergie de la charge et la source durant le régime transitoire.

En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la puissance active absorbée par la charge plus une faible puissance active qui sert à compenser les pertes dans le filtre. La tension de côté continu peut être maintenue à une valeur de référence désirée.

Néanmoins, quand les conditions de charge changent, la puissance transitant entre la source et la charge est perturbée et la différence d'énergie est compensée par le condensateur du côté continu ce qui éloigne cette tension de sa référence. Pour satisfaire les fonctionnalités du filtre actif, la valeur maximale du courant de référence doit être ajustée proportionnellement à l'énergie fournie par la source. Si la tension aux bornes du condensateur a été régulée et a atteint sa tension de référence, l'énergie fournie par la source est supposée être de référence est obtenue par régulation de la tension côté continu.

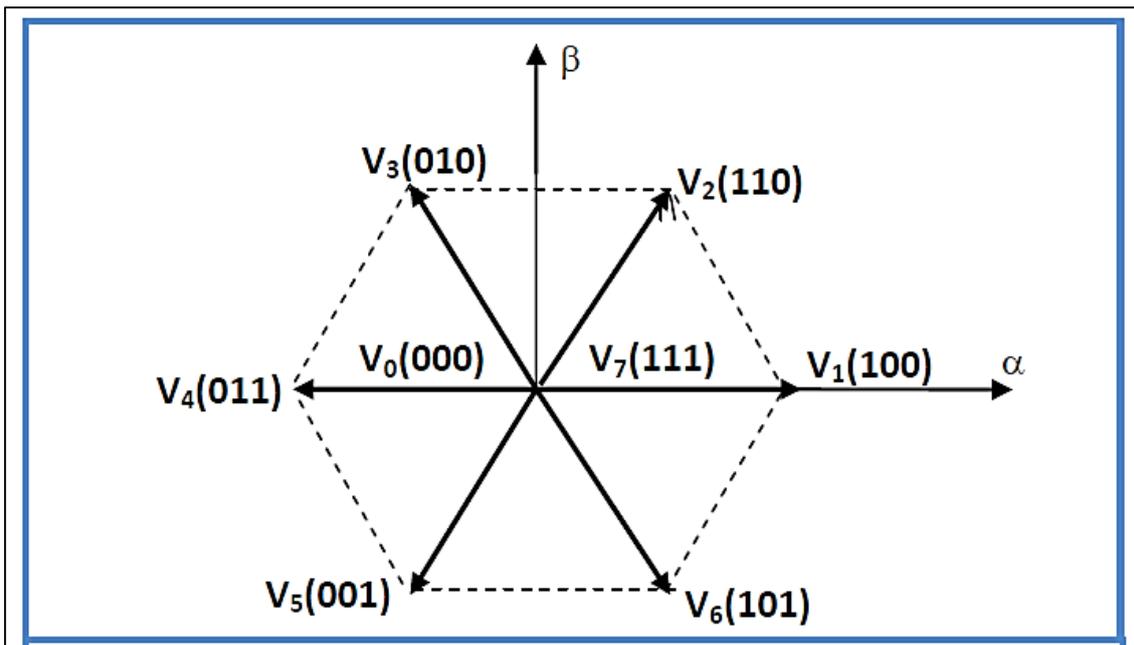


Figure II- 6: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur [40].

### II.5.3.1 Filtre de sortie

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour relier l'onduleur de tension au réseau électrique. Le filtre de sortie est dimensionné pour satisfaire les deux critères suivants :

➤ assurer la dynamique du courant :

$$\frac{d}{dt} \vec{I}_{h-ch} = \frac{d}{dt} \vec{I}_{inj} \quad (\text{II-10})$$

Avec

$I_{h-ch}$  : Courant harmonique de la charge,

$I_{inj}$  : 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 et un filtre de sortie du troisième ordre.

### II.5.3.1.1 Filtre du premier ordre

Ce type de filtre est le plus utilisé dans la littérature. Il est composé d'une inductance  $L_f$  de résistance interne  $R_f$ . 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  $L_f$  peut réaliser une bonne dynamique du filtre actif en satisfaisant l'égalité (II-10). Malheureusement, une valeur faible de  $L_f$  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  $L_f$  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 [41, 42].

Le bon dimensionnement du filtre de sortie du premier ordre dépendra donc du compromis à trouver entre la dynamique et l'efficacité du FAP. 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. 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 [43, 44].

### II.5.3.1.2 Filtre du troisième ordre

Nous proposons ici d'étudier le cas d'un filtre de sortie du troisième ordre afin d'échapper aux problèmes évoqués dans le cas du filtre de sortie du premier ordre. 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  $C_f$ . Dans ce travail, une petite résistance d'amortissement  $R_f$  a été ajoutée en série avec la capacité  $C_f$  comme le montre la figure (II-7).

Ce type de filtre et grâce au degré de liberté supplémentaire, fourni par la capacité  $C_f$ , peut assurer les deux critères de dimensionnement du filtre de sortie que nous avons évoqués précédemment [45-47].

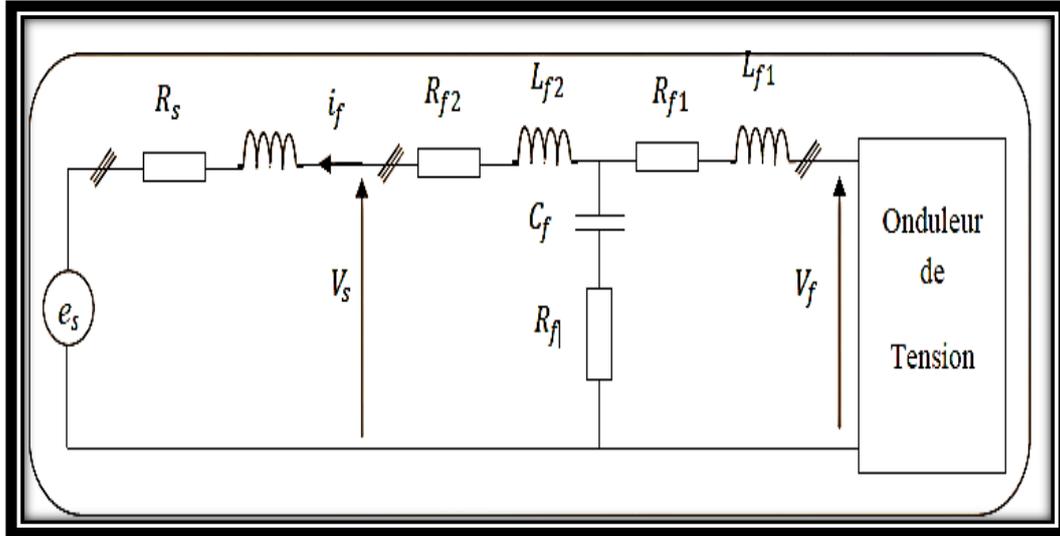


Figure II- 7:Schéma équivalent par phase du filtre de sortie du troisième ordre en T [48].

Les équations qui modélisent le filtre de sortie sont [14] :

$$I_{inj}(s) = \frac{B_1(s)}{A(s)} V_f(s) + \frac{B_2(s)}{A(s)} e_s(s) \quad (\text{II-11})$$

Avec

$V_f$  : Tension de sortie de l'onduleur,

$\frac{B_1(s)}{A(s)}$  : Fonction de transfert du filtre de sortie correspondant au système d'origine.

$\frac{B_2(s)}{A(s)}$  : Fonction de transfert correspondant au modèle de perturbation.

Ces perturbations sont causées par la tension du réseau électrique  $e_s$  que l'on considère désormais égale à la tension de raccordement  $V_s$  pour les réseaux électriques de forte puissance de court-circuit.

$$\left\{ \begin{array}{l} A(s) = a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4 \\ B_1(s) = b_{11} s + b_{12} \\ B_2(s) = -(b_{21} s^2 + b_{22} s + b_{23}) \end{array} \right\} \quad (\text{II-12})$$

Avec ces deux équations (II-11), (II-12) et si on néglige toutes les résistances, nous pouvons établir la relation suivante, valable aux fréquences supérieures à 50 Hz :

$$\frac{B_1}{A}(s) \approx \frac{1}{(L_{f1} L_{f2} C_f) s^3 + L_{f1} + L_{f2}} \quad (\text{II-13})$$

La fréquence de résonance  $f_{cp}$  du système d'origine est donnée par la relation II-14 :

$$f_{cp} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{(L_{f1}L_{f2})C_f}{L_{f1}+L_{f2}}}} \quad (\text{II-14})$$

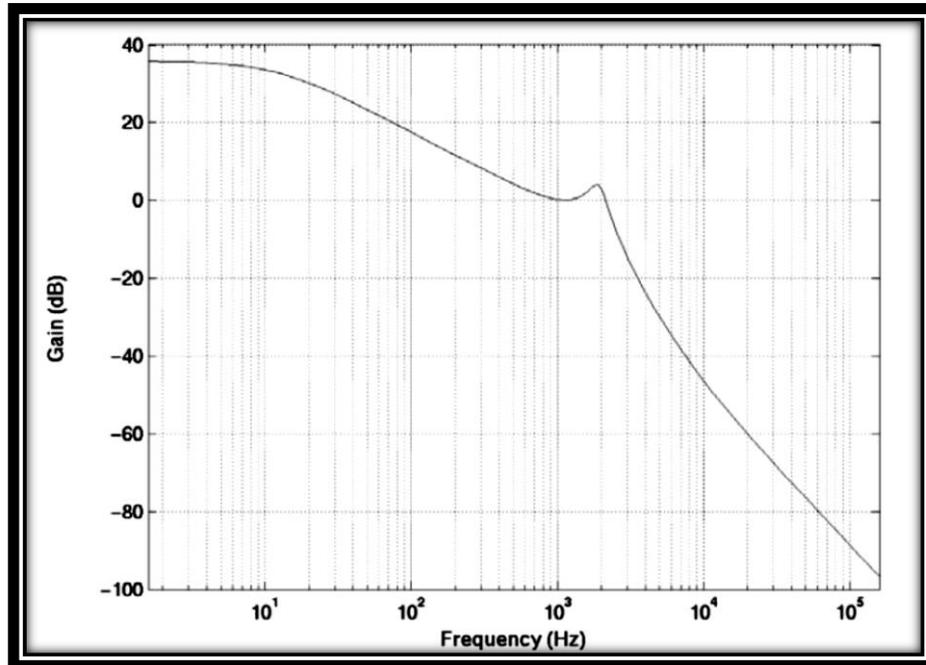


Figure II- 8: Diagramme de Bode de gain du filtre de sortie [48].

Le filtre de sortie en T a été dimensionné pour rejeter les composantes dues à la fréquence de commutation de l'onduleur, lesquelles ont été fixées à 12 kHz pour correspondre à un cas d'application. Ainsi, un rejet de  $-50$  dB est obtenu pour une fréquence de coupure de 1900 Hz. Ce choix a permis de bien atténuer les composantes à hautes fréquences, comme le montre le diagramme du gain du filtre de sortie en fonction de la fréquence de la Figure II-8.

## II.6 Etude de la partie commande

Cette section est consacrée à la partie commande du filtre actif, dont laquelle on présente les stratégies de commande du filtre actif, la commande de l'onduleur et la régulation de la tension du bus continue [13].

### II.6.1 Commande de l'onduleur

L'objectif de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux drivers interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de commande des convertisseurs statiques sont [49]:

- Commande par hystérésis conventionnelle ou modulé.
- Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

### II.6.1.1 Commande conventionnel par hystérésis

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence et le courant produit par l'onduleur, cette erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis, comme le montre la Figure (II-9)[50]. Les schémas(a-b figure II-11) expliquent le principe de la commande par hystérésis pour les deux cas d'onduleur à trois et quatre bras.

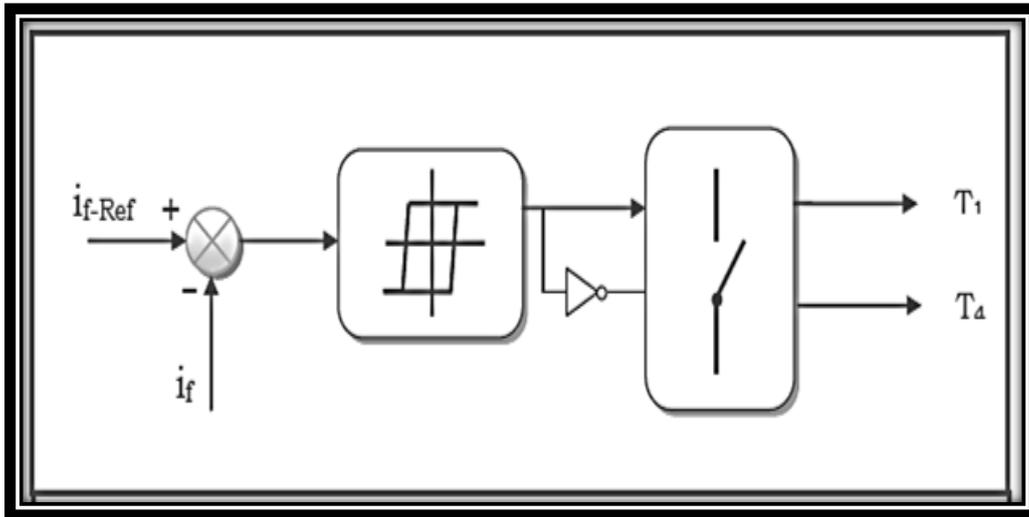


Figure II- 9: Commande par hystérésis [51].

Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure (figure II-10), un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité est le principal avantage de cette technique. En revanche, les commutations évoluant librement à l'intérieur de la bande d'hystérésis, on ne peut pas maîtriser correctement le spectre haut fréquence dû aux fréquences des commutations.

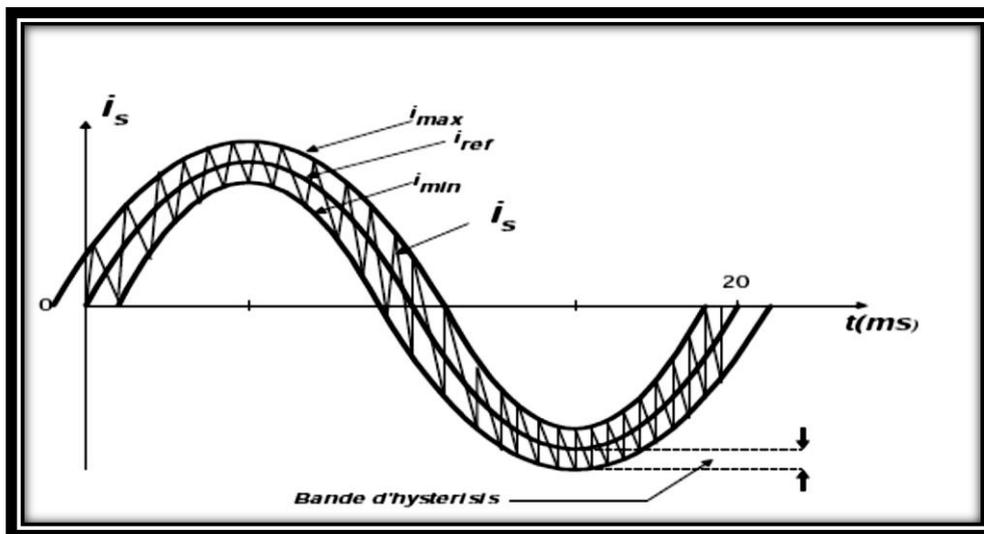


Figure II- 10: Commande montrant la bande d'hystérésis [51].

Malgré sa simplicité de mise en œuvre, sa robustesse et sa bonne dynamique, cette commande présente quelque inconvénient :

- ✓ L'inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.
- ✓ Un des désavantages de cette méthode est que dans certaines configurations les courants sortent de leurs enveloppes et que cette dernière a tendance à induire un fonctionnement à fréquence libre qui peut causer des problèmes de filtrage ou de nuisance sonore.
- ✓ La somme des trois courants n'est pas forcément nulle, ce qui crée un déséquilibre des courants qui dépendent de la bande d'hystérésis.
- ✓ Des composantes harmoniques basses fréquences, voir une composante continu, peuvent apparaître sur le signal de sortie. La composante continue est due au fait que la forme d'alternance positive peut différer de celle de l'alternance négative, au signe près.

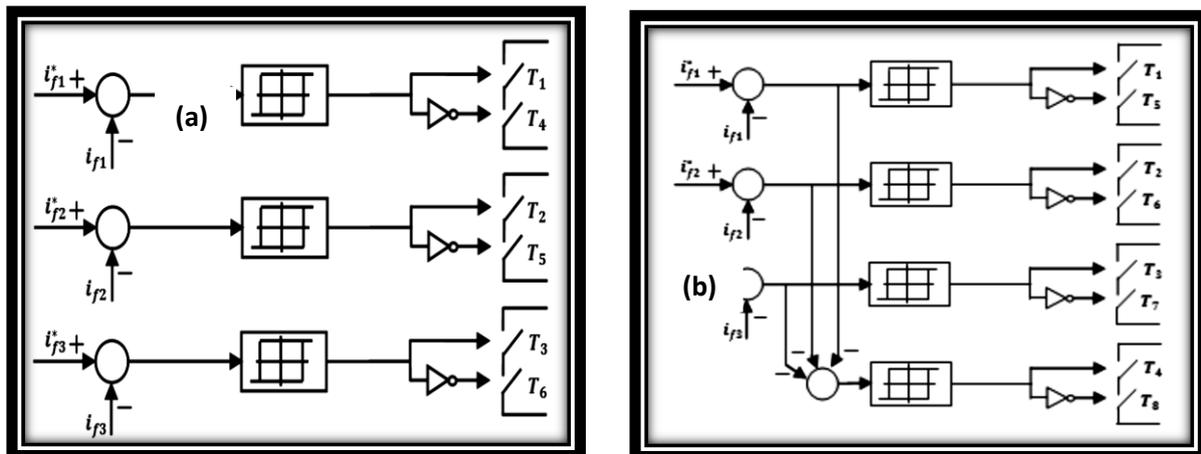


Figure II- 11: Principe de la commande par hystérésis. (a) Cas d'un onduleur à trois bras avec condensateur à point milieu, (b) Cas d'un onduleur à quatre bras [7].

### II.6.1.2 Commande par hystérésis modulée

La commande par hystérésis modulée a pour objectif de résoudre l'inconvénient majeur de la commande par hystérésis conventionnelle en fixant la fréquence de commutation des semi-conducteurs. Cette méthode consiste à ajouter au signal d'erreurs  $\varepsilon$  ( $\varepsilon = i^* - i_f$ ) un signal triangulaire  $S_{tr}$ , de fréquence  $f_{tr}$  et d'amplitude  $A_{tr}$ . La fréquence  $f_{tr}$  doit être choisie égale à la fréquence de commutation que l'on souhaite imposer aux composants de puissance. Le signal ainsi obtenu attaque alors l'entrée d'un régulateur à hystérésis dont la sortie permet de commander les interrupteurs de puissance [36].

Le schéma de cette commande est décrit dans la figure II-12 :

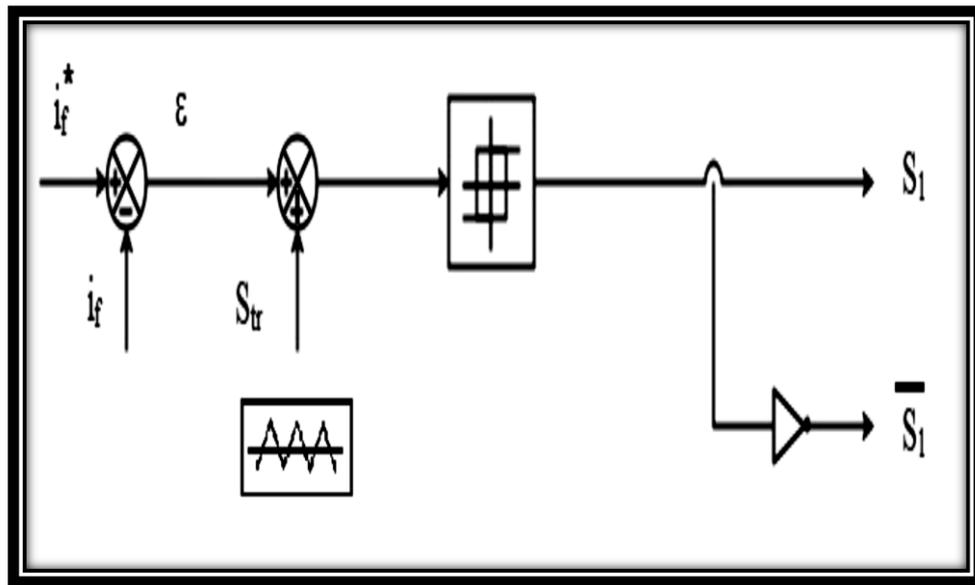


Figure II- 12 : Principe de la commande par hystérésis modulé [51].

### II.6.1.3 Commande par modulation de largeur d’impulsion (MLI)

La figure II-13 décrit le principe de la commande par MLI. En effet, comme la commande d’hystérésis modulée, ce contrôle permet de générer la différence entre le courant de référence  $i_f^*$  et le courant réel  $i_f$ . Ensuite, cette erreur sera appliquée à l’entrée d’un régulateur. Le signal de sortie du régulateur, appelé modulatrice qui sera comparée à un signal triangulaire de fréquence fixe, appelé porteuse, afin de déterminer les ordres de commutation des interrupteurs. Le signal de la porteuse présente une fréquence fixe donc la fréquence de découpage des semi- conducteurs de puissance est aussi fixe [51].

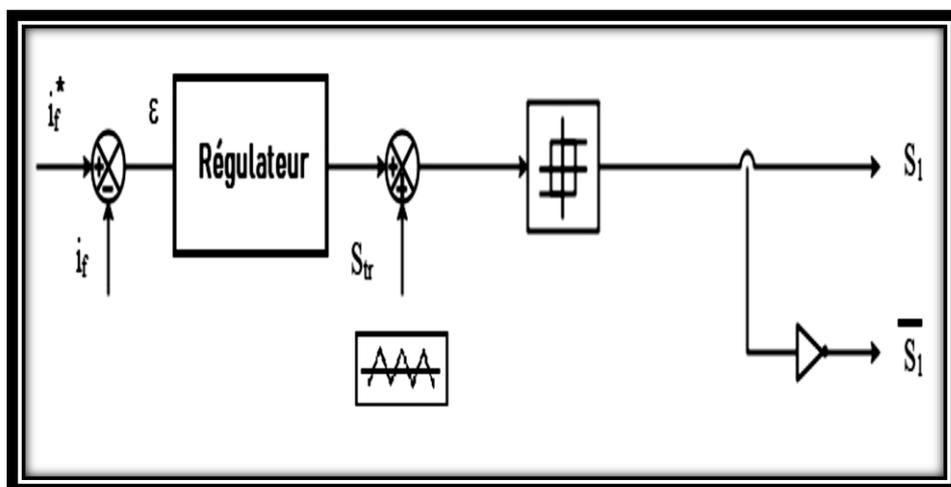


Figure II- 13: Principe de la commande par MLI [51].

L'objectif de la commande MLI est de diminuer les harmoniques supplémentaires et non-souhaités présents dans les courants générés par l'onduleur .La MLI est applicable à des systèmes linéaires, de fréquence de commutation constante. Cette commande présente des avantages et des inconvénients [52]:

**a) Avantages**

- ✓ Robustesse,
- ✓ Faible effort de commande,
- ✓ Grande fiabilité.

**b) Inconvénients**

- ✓ Augmentation des pertes par commutation qui sont dues à la haute fréquence de commutation.
- ✓ Faiblesse pour des systèmes avec bruit et pour des paramètres du système variable.
- ✓ Modèle mathématique exigé.
- ✓ Non contrôle des ondulations de courants.

On distingue deux techniques : la MLI inter sélective et la MLI vectorielle.

**II.6.1.3.1 MLI inter sélective**

C'est la modulation la plus classique, elle consiste à comparer le signal de référence de tension à une porteuse haute fréquence .Le résultat de cette comparaison détermine les instants de commutation des interrupteurs. De nos jours, la plupart des systèmes de contrôle d'onduleurs s'implantent numériquement .Ainsi, une MLI avec échantillonnage régulier est souvent utilisée, ou la référence de la tension reste constante pendant la période d'échantillonnage [52].

**II.6.1.3.2 MLI vectorielle**

Dans la MLI vectorielle les vecteurs à appliquer et leurs temps d'applications (afin d'obtenir en valeur moyenne une tension de référence à partir des états de commutation de l'onduleur) sont calculés analytiquement à travers des équations mathématiques. Chacun des états possibles du convertisseur est représenté par un vecteur de tension. L'ensemble de ces vecteurs forme le diagramme vectoriel des tensions du convertisseur. En général, la valeur moyenne du vecteur de référence peut être calculée en utilisant plus d'un vecteur par cycle de modulation, par l'approximation de la valeur moyenne de la MLI. Si on sélectionne les vecteurs adéquats et si on les applique dans l'ordre correct.il est possible d'obtenir une fréquence de commutation relativement élevée à la sortie avec une fréquence de commutation réduite .La modulation vectorielle diffère des techniques inters sélectives par le fait que les

signaux de commande sont élaborés en tenant compte de l'état des trois bras de l'onduleurs en même temps [52].

### II.6.1.3.3 Principe des onduleurs à MLI

Les semi-conducteurs des onduleurs à MLI sont toujours commandables à l'ouverture et à la fermeture, ils contiennent une diode connectée en antiparallèle [53]. Plus souvent, une technique de commande analogique ou numérique nous permet de déterminer en temps réel ces instants de fermeture et de l'ouverture des interrupteurs. La tension de sortie se compose alors de plusieurs impulsions formées suite à l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de puissance.

La MLI à échantillonnage naturel [54] est la plus adaptée et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion, elle est appelée aussi la MLI inter sélective. Les instants de fermeture et d'ouverture des interrupteurs sont déterminés, pour cette méthode, par l'intersection de l'onde de référence  $U_{ref}$  qui représente la tension de sortie souhaitée de fréquence  $f$  avec une onde de la porteuse, de fréquence  $f_p$  qui doit être très supérieure à  $f$ . Donc c'est la porteuse qui fixe la fréquence de commutation, il s'agit d'une onde triangulaire de fréquence très élevée [55].

La commande des interrupteurs est donc caractérisée par deux indices :

- ✓ Indice de modulation :  $m = \frac{f_p}{f}$
- ✓ Coefficient de réglage :  $r = \frac{U_{refmax}}{U_p}$

Avec  $m \gg 1$ ; et  $0 < r < 1$ ;

$f_p, U_p$ : Représentant respectivement la fréquence et l'amplitude de la porteuse.

$f, U_{refmax}$ : Représentant respectivement la fréquence et l'amplitude maximale de la référence.

## II.7 Régulation de la tension continue

Pour les petites et moyennes puissances, l'élément de stockage de l'énergie le plus adapté est une capacité placée du côté continu de l'onduleur qui a deux tâches essentielles [16] :

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

### II.7.1 Principe de la régulation

Le rôle de la boucle de régulation de la tension du bus continu est de maintenir cette tension à une valeur constante. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne  $v_{dc}$  aux bornes du bus continu sont les suivants [56]:

- ✓ Les pertes dans les interrupteurs.
- ✓ Les pertes dans les filtres de sortie  $L_f$ .
- ✓ L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante.

Sur la Figure II-14, nous remarquons que suite à un écart entre  $v_{dcref}$  et  $v_{dc}$ , la puissance  $p_{dc}$  à la sortie du régulateur de tension s'ajoute, à un signe près à la puissance active harmonique et donne lieu à un courant fondamental actif supplémentaire corrigeant la tension continue.

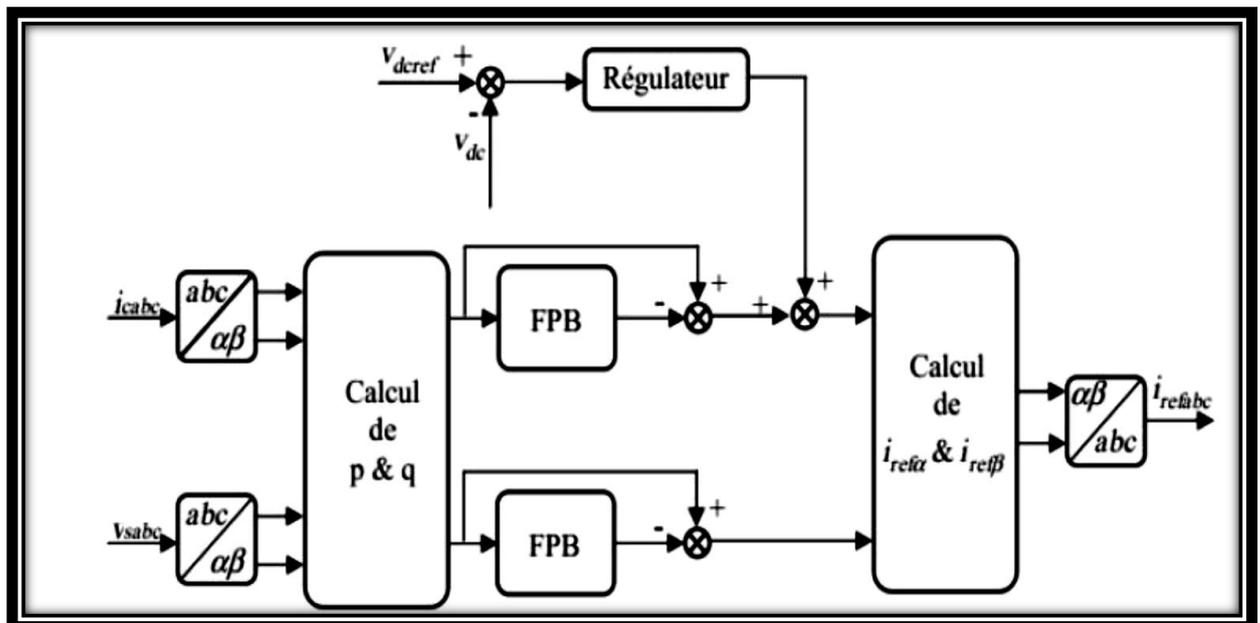


Figure II- 14: Schéma de principe de la méthode d'identification des puissances instantanées [16].

### II.7.2. Synthèse du régulateur de tension

Afin d'obtenir la quantité  $v_{dc}$  représentant la puissance active nécessaire pour maintenir  $v_{dc}$  proche de sa référence  $v_{dcref}$  on peut utiliser un simple régulateur type proportionnel.

En régime permanent les courants de référence ne contiennent pas de composantes fondamentales et la puissance nécessaire pour compenser les pertes est faible. Dans ce cas, un simple gain est suffisant et pour filtrer les fluctuations à 300Hz, nous proposons d'ajouter un

filtre passe-bas du premier ordre en sortie du régulateur, La fonction de transfert du régulateur est donnée par l'équation(II-15) [57]:

$$G(s) = \frac{K_c}{1+\tau_c s} \quad (\text{II-15})$$

Avec :

$K_c$  : Gain du régulateur.

$\tau_c$  : Constant de temps.

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

$$P_{dc} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II-16})$$

Pour des faibles variations  $V_{dc}$  autour de  $V_{dc-ref}$  l'équation (II-16) peut s'écrire:

$$P_{dc} = C_{dc} V_{dc-ref} \frac{d}{dt} (V_{dc}) \Rightarrow V_{dc}(s) = \frac{P_{dc}(s)}{C_{dc} V_{dc-ref} s} \quad (\text{II-17})$$

D'après les équations (II-15) et (II-17), la boucle de régulation de la tension  $V_{dc}$  continue peut être fonctionnellement représentée par la Figure II-15.

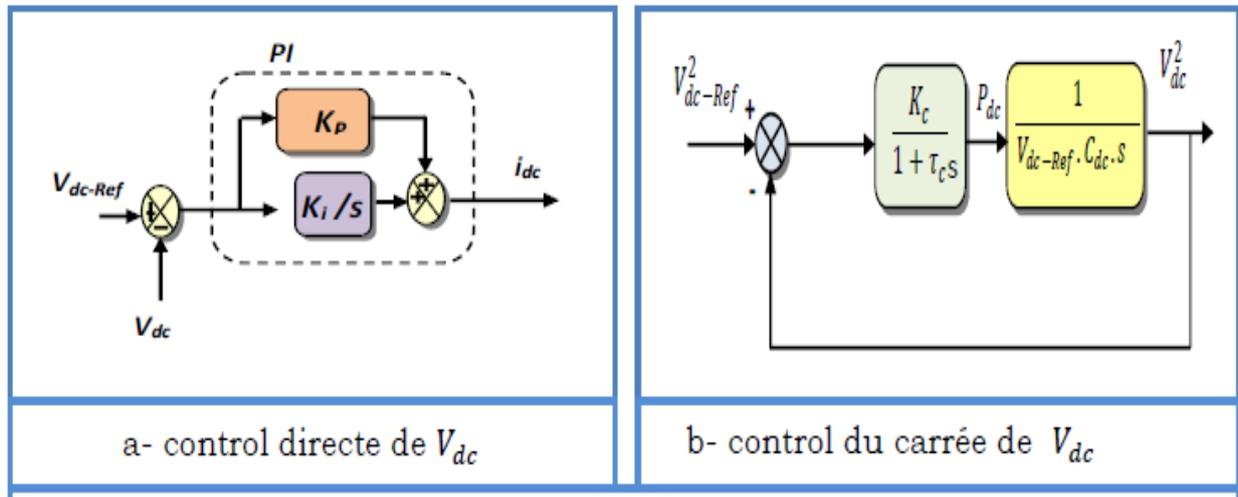


Figure II- 15: Boucle de régulation de la tension continue [30].

La fonction de transfert en boucle fermée est alors:

$$F(s) = \frac{\omega_c^2}{s^2 + 2\varepsilon_c \omega_c s + \omega_c^2} \quad (\text{II-18})$$

Avec :

$$\omega_c = \sqrt{\frac{K_c}{C \cdot V_{dc-ref} \cdot \tau_c}} \quad (\text{II-19})$$

$$\varepsilon_c = \sqrt{\frac{C \cdot V_{dc-ref}}{K_c \tau_c}} \quad (\text{II-20})$$

Afin d'obtenir un amortissement suffisant, le produit  $K_c \tau_c$  doit être limité. Une valeur de  $\varepsilon$  comprise entre 0,5 et 0,707 réalise un bon compromis entre performances dynamique et statique. Le choix du paramètre  $K_c$  a pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif.

## II-8 Dimensionnement du filtre actif

Les trois principaux paramètres qu'il faut estimer, dans la conception du circuit de puissance, afin d'assurer une commande adéquate et une bonne qualité de filtrage, sont [58]:

- ✓ La sélection de la valeur de la tension de référence de la capacité ( $V_{dcref}$ ).
- ✓ La sélection de la valeur de la capacité de stockage ( $C_{dc}$ ).
- ✓ Le choix du type de filtre en sortie de l'onduleur de tension, ainsi que le dimensionnement de ses paramètres.

Notons que l'estimation de ces paramètres est basée sur les hypothèses suivantes :

- a) La source de tension du réseau au point de connexion est supposée sinusoïdale.
- b) Pour la conception du filtre de sortie ou de couplage, un facteur d'atténuation d'oscillations du courant du filtre de 5% est accepté.
- c) L'onduleur commandé en MLI travaille dans la zone de modulation linéaire  $0 \leq m \leq 1$ .
- d) La fréquence de commutation  $f_c$  est sélectionnée en fonction du plus grand rang d'harmoniques à compenser.

Théoriquement, il faut choisir une fréquence  $f_c$  supérieure au double de la fréquence de l'harmonique le plus haut à compenser ( $f_{hmax}$ ).

Par contre, plus la fréquence de commutation est élevée, plus les pertes dans les semi-conducteurs sont importantes. Pour satisfaire ces deux contraintes, il est nécessaire de trouver un compromis.

### II.8.1 Description du fonctionnement de la capacité

Pour les grandes puissances du FAP, on utilise une bobine soumise à des conditions de refroidissement plus complexes tel que l'utilisation des supraconducteurs [58].

En régime permanent, la puissance réelle générée par la source est égale à celle imposée par la charge ajoutée à une petite quantité de puissance pour compenser les pertes dans le filtre actif.

Donc, la tension du bus continu peut être maintenue constante à sa référence.

Lorsque les conditions de fonctionnement de la charge non-linéaire évoluent, l'équilibre en puissance réelle entre celle-ci et la source sera perturbé. La différence en puissance engendrée

doit être compensée par celle du condensateur. En conséquence, la valeur de la tension à ses bornes change en s'éloignant de sa référence. Pour un bon fonctionnement du filtre actif, l'amplitude de la valeur du courant de référence doit être ajustée pour adapter proportionnellement la puissance réelle demandée par la source. Cette puissance réelle, avec un flux positif ou négatif au niveau du condensateur, compense celle consommée par la charge. Si la tension aux bornes du condensateur est rétablie et atteint sa référence, la puissance réelle produite par la source est supposée égale à celle consommée par la charge de nouveau. Alors, de cette manière, l'amplitude du courant de référence peut être effective en régulant la valeur moyenne de la tension du bus continu. Si cette tension  $V_{dc}$  est inférieure à la tension de référence  $V_{dcref}$ , cela se traduit par un manque de puissance réelle produite par la source, donc le courant réseau doit être augmenté. Au contraire, une valeur de tension  $V_{dc}$  supérieure à la référence  $V_{dcref}$  conduit à une diminution du courant de référence de l'alimentation.

### II.8.2 Estimation de la tension de référence du bus continu ( $V_{dcref}$ )

Pour assurer la commandabilité du courant du filtre actif, la tension du bus continu ( $V_{dcref}$ ) doit être supérieure à la valeur maximale (valeur crête) de la tension composée côté alternatif de l'onduleur [58].

Le choix de la référence de la tension du bus continu est en fonction de la puissance de la charge et du rang maximal de l'harmonique compense. En effet, la tension à la sortie de l'onduleur s'écrit :

$$v_f(t) = v_s(t) + L_i \frac{di_f(t)}{dt} \quad (\text{II-21})$$

Avec :

$$i_f(t) = \sqrt{3} \cdot \sum i_{ch} \quad (\text{II-22})$$

Tel que le terme  $\sum i_{ch}$  représente le courant fourni par l'onduleur et correspond à la composante harmonique du courant de la charge constituée d'un pont à diode triphasé.

Donc,  $i_f(t)$  peut être développé par :

$$i_f(t) = \frac{6}{\pi} \cdot I_d \left( -\frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \dots \right) \quad (\text{II-23})$$

$$\Rightarrow \frac{di_f(t)}{dt} = \frac{6}{\pi} \cdot \omega \cdot I_d \left( -\cos(5\omega t) - \cos(7\omega t) + \cos(11\omega t) + \dots \right) \quad (\text{II-24})$$

Grâce aux expressions (II-21) et (II-23) il est possible de déduire :

$$v_f(t) = v_m \sin(\omega t) + \frac{6}{\pi} \cdot L_f \cdot \omega \cdot I_d \left( -\cos(5\omega t) - \cos(7\omega t) + \cos(11\omega t) + \dots \right) \quad (\text{II-25})$$

La puissance apparente de la charge est proportionnelle au courant continu de la charge  $I_d$  :

$$S = 3 \cdot V_s \cdot I_d \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (\text{II-26})$$

Sachant que l'équation de la tension du bus continu est la suivante :

$$V_{dcref} = \frac{V_{fmax}}{r} \quad (\text{II-27})$$

Avec :  $0 \leq r \leq 1$  coefficient de réglage d'amplitude en tension.

Où :

$V_{fmax}$  : Valeur maximale de la tension de phase  $V_f$  à la sortie de l'onduleur.

En se basant sur ce développement, une méthode de calcul peut être déduite :

- ❖ Calcul de  $I_d$  en fonction de la puissance apparente (S) de la charge.
- ❖ Ecriture de  $v_f(t)$ , incluant les termes correspondant aux harmoniques à compenser, Puis détermination de la valeur maximale de la tension  $V_{fmax}$ .
- ❖ Calcul de  $V_{dcref}$  à partir de l'expression (II-27).

Il est à remarquer qu'il est possible de conclure que le calcul de la tension  $V_{dcref}$  par Cette méthode est dépendant de la connaissance de l'inductance  $L_f$ , de la puissance apparente (S) de la charge et exige une simulation afin de déterminer la tension maximale  $V_{fmax}$ .

Cependant, la valeur de la tension  $V_{dcref}$  est bornée par un choix du rang d'harmonique à éliminer, ce qui conduit à une minimisation des pertes de commutation des interrupteurs.

### II.8.3 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage

( $C_{dc}$ )

La détermination de la valeur de la capacité du condensateur de stockage d'énergie électrique ( $C_{dc}$ ) peut être estimée en se basant sur le principe de l'échange instantané de l'énergie nécessaire pour subvenir à une augmentation ou une diminution d'un échelon de puissance imposé par la charge (régime transitoire), en appliquant le concept de l'équilibre de l'énergie [58].

Un autre principe réside dans la mitigation des oscillations de la tension du bus continu  $V_{dc}$  imposées par les harmoniques de la charge non-linéaire ou au déséquilibre de celle-ci en régime permanent, l'aspect déséquilibre s'applique aussi au cas d'une charge linéaire.

Dans ce cadre est exposée des approches afin d'aboutir à une estimation de la valeur de la capacité du condensateur  $C_{dc}$ .

## II.9 Conclusion

La définition et la construction du filtre actif parallèle ont été présentées dans ce chapitre, cette structure comporte deux parties : la partie puissance et la partie commande-contrôle. Les

critères qui ont conduit à la sélection de chaque élément des parties concernées ont été énoncés. En conséquence, nous avons pu déterminer les composants de la partie commande-contrôle, tels que le contrôle de l'onduleur et la régulation de la tension du bus continu, ainsi que les éléments de la partie puissance, tels que l'onduleur, l'élément de stockage et le filtre de sortie.

## *Chapitre III :*

---

### *Méthodes d'identifications des courants de références*

---

### III.1 Introduction

Les filtres actifs de puissance ont pour objectif d'agir d'une manière directe et dynamique afin de compenser les harmoniques ou atténuer leurs effets sur les réseaux d'alimentation.

Pour rendre cet objectif réalisable, la méthode d'identification des grandeurs de références harmoniques devrait répondre en temps réel et avec précision afin de considérer une bonne qualité du filtrage [59].

Les algorithmes d'identification des références harmoniques de courants ou de tensions sont regroupés dans la littérature en deux domaines, le domaine fréquentiel et le domaine temporel.

### III.2 Méthodes d'identification des courants perturbés

Les performances du filtre actif dépendent des semi-conducteurs de puissance utilisés pour réaliser l'onduleur et le choix de la méthode utilisée pour compenser la composante harmonique du courant de charge. Afin de commander le filtre actif parallèle, nous devons d'abord identifier les courants harmoniques de la charge polluante, qui servent en effet comme références du filtre actif parallèle.

Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées:

- a) Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante;
- b) Identification à partir de la détection du courant de la source;
- c) Identification à partir de la détection de la tension de la source.

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. Les différentes méthodes d'identification de courant perturbateur peuvent être regroupées en deux familles [13, 31, 60].

- Stratégies de commande dans le domaine fréquentiel sont basées sur le principe de l'analyse de Fourier et nécessitent la périodicité de l'onde polluante. Parmi ces stratégies, la transformée de Fourier rapide (*FFT*), la transformée de Fourier discrète (*DFT*), la transformée de Fourier discrète récursive (*RDFT*) et le filtre de *Kalman* sont les méthodes usuellement utilisées dans le domaine fréquentiel [35, 52].
- Stratégies de commande temporelle sont basées sur le principe de maintenir la tension ou le courant instantané proche d'un signal sinusoïdal, ce avec une tolérance raisonnable.

### III.2.1 Domaine fréquentiel

Les méthodes du domaine fréquentiel utilisent l'analyse de Fourier (La transformé discrète, la transformé rapide, la transformé discrète récursive, etc.) pour identifier les harmoniques du courant. Ces méthodes sont bien adaptées aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Par ailleurs ils ont l'avantage d'identifier les harmoniques individuellement. Elles permettent donc une compensation sélective. Néanmoins, les inconvénients les plus importants de ces méthodes sont des résultats moyens en régime transitoire et un volume de calcul et une allocation de mémoire très considérables.

### III.2.2 Domaine temporel

De nombreuses méthodes d'identification des courants de référence dans le domaine temporel ont été publiées dans la littérature scientifique [30]. Elles permettent une réponse plus rapide et requièrent moins d'opérations que les méthodes précédentes.

Le principe de ce type de méthode est la séparation du fondamental ou de certains harmoniques par le filtrage.

### III.3 Présentation de la méthode de puissances instantanées pour un FAP

La théorie de la méthode de puissances instantanées dans sa première version a été publiée en langue japonaise en juillet 1982 dans une conférence locale et plus tard dans la revue de l'IEE-Japon. Avec un léger décalage dans le temps, elle a été publiée en 1983 dans une conférence internationale, et, en 1984, dans IEEE sur les applications industrielles, y compris la vérification expérimentale. Le développement de cette théorie s'est appuyé sur divers travaux antérieurs écrits par des spécialistes de l'électronique de puissance intéressés par la compensation de puissance réactive. De la fin des années 1960 au début des années 1970, des articles relatifs à ce qui peut être considéré comme un principe de base de la compensation de puissance réactive et ont présenté quelques idées de base ainsi une première approche de la correction du facteur de puissance. Fukao et al., ont déclaré : « ... en connectant une source de puissance réactive en parallèle avec la charge et en la contrôlant de manière à fournir de la puissance réactive à la charge, le réseau électrique ne fournira que puissance active. Par conséquent, une transmission de puissance idéale serait possible ». Gyugyi et Pelly ont présenté l'idée que la puissance réactive pourrait être compensée par un cyclo-convertisseur naturellement commuté sans éléments de stockage d'énergie. La génération de puissance réactive sans éléments de stockage d'énergie a également été étudiée. Cette idée a été expliquée d'un point de vue physique, mais aucune preuve mathématique spécifique n'a été présentée. En 1976, Harashima et al. ont présenté probablement pour la première fois, le

terme « puissance réactive instantanée » pour un circuit monophasé. La même année, Gyugyi et Strycula ont utilisé pour la première fois le terme « filtres de courant alternatif actifs ». En 1981, Takahashi et al. ont donné un indice sur la théorie p-q. La formulation à laquelle ils sont parvenus est en fait un sous-ensemble de la théorie p-q. Cependant, aucune signification physique des variables introduites dans les deux articles n'a été expliquée [61].

Cette méthode introduite par M.C.BENHABIB [62], exploite la transformation de Concordia des tensions simples et des courants de ligne, afin de calculer les puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanées. Elle permet de transformer la composante fondamentale en une composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. Cette transformation est nécessaire si on veut éliminer facilement la composante continue [7]. Soient respectivement les tensions simples et les courants de ligne d'un système triphasé avec neutre,  $v_{sa}(t), v_{sb}(t), v_{sc}(t), i_{sa}(t), i_{sb}(t), i_{sc}(t)$ . La transformation de Concordia permet de ramener ce système triphasé des axes  $abc$  aux axes  $\alpha\beta 0$ , comme le montre les deux relations (III-1) et (III-2) :

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha} \\ v_{\beta} \\ v_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(III-1)}$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(III-2)}$$

La transformation de Concordia est définie par :

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III-4)}$$

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées  $\overline{v_{\alpha\beta 0}}$  par un PLL, les Puissances réelle, imaginaire et homopolaire instantanés sont données par la matrice suivante:

$$\begin{bmatrix} P \\ q \\ p_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{v_{\alpha}} & \overline{v_{\beta}} & 0 \\ -\overline{v_{\beta}} & \overline{v_{\alpha}} & 0 \\ 0 & 0 & \overline{v_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad \text{(III-5)}$$

Les puissances instantanées peuvent s'écrire de la façon suivante :

$$p = \bar{P} + \tilde{P} \quad \text{(III-6)}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad \text{(III-7)}$$

$$P_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad \text{(III-8)}$$

$\bar{p}$ ,  $\bar{q}$  et  $\bar{p}_0$ : Composantes continues des puissances instantanées.

$\tilde{p}$ ,  $\tilde{q}$  et  $\tilde{p}_0$  : Composantes alternatives des puissances instantanées.

A l'aide d'un filtre passe bas avec une boucle de retour ou d'un filtre passe haut, on peut éliminer de p et de q une (des) partie (s) selon les objectifs de la compensation montrés au tableau III-1 [23, 25].

**Tableau III- 1:** Modes de compensation de la commande des puissances instantanées.

Paramètre à compenser	Paramètre de contrôle
Courant harmonique	$P=\tilde{p}$ et $q = \tilde{q}$
Énergie réactive	$P=0$ et $q= \bar{q}$
Courant harmonique + énergie réactive	$P=\tilde{p}$ et $q= \bar{q}$

Pour la compensation du courant dans le neutre, le courant homopolaire  $i_0$  sera utilisé directement comme référence sans passer par le calcul de la puissance homopolaire et donc l'isolation de la composante fondamentale de la tension homopolaire pour le calcul de la puissance homopolaire n'est pas nécessaire dans cette variante de la méthode des PIRI (Puissances Instantanées Réelle et Imaginaire).

L'objectif de ce travail est de compenser les harmoniques de courant et l'énergie réactive.

Après extraction de  $\tilde{p}$  par un FPB avec un boucle de retour, Les composantes du

Courant  $i_{f\alpha\beta}^*$  sont alors définies par [23, 25]:

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta \\ \bar{v}_\beta & -\bar{v}_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad \text{(III-9)}$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \bar{v}_\alpha & \bar{v}_\beta \\ \bar{v}_\beta & -\bar{v}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad \text{(III-10)}$$

soit :

$$i_{f\alpha}^* = \frac{\bar{v}_\alpha}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} \tilde{p} + \frac{\bar{v}_\beta}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} q \quad \text{(III-11)}$$

$$i_{f\beta}^* = \frac{\bar{v}_\beta}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} \tilde{p} - \frac{\bar{v}_\alpha}{(\bar{v}_\alpha^2 + \bar{v}_\beta^2)} q \quad \text{(III-12)}$$

$i_{f\alpha}^*$  et  $i_{f\beta}^*$  sont les courants de référence dans le repère de Concordia. On remarque dans les expressions de ces derniers l'absence du courant homopolaire. On prend pour l'homopolaire :

$$i_{f0}^* = i_0$$

Maintenant, il est aisé de remonter aux courants de référence par la transformation inverse de Concordia. La figure (III-1) illustre l'algorithme d'identification.

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{fc}^* \end{bmatrix} = C^{-1} \begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \\ i_{f0}^* \end{bmatrix} \quad \text{(III-13)}$$

$$C^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(III-14)}$$

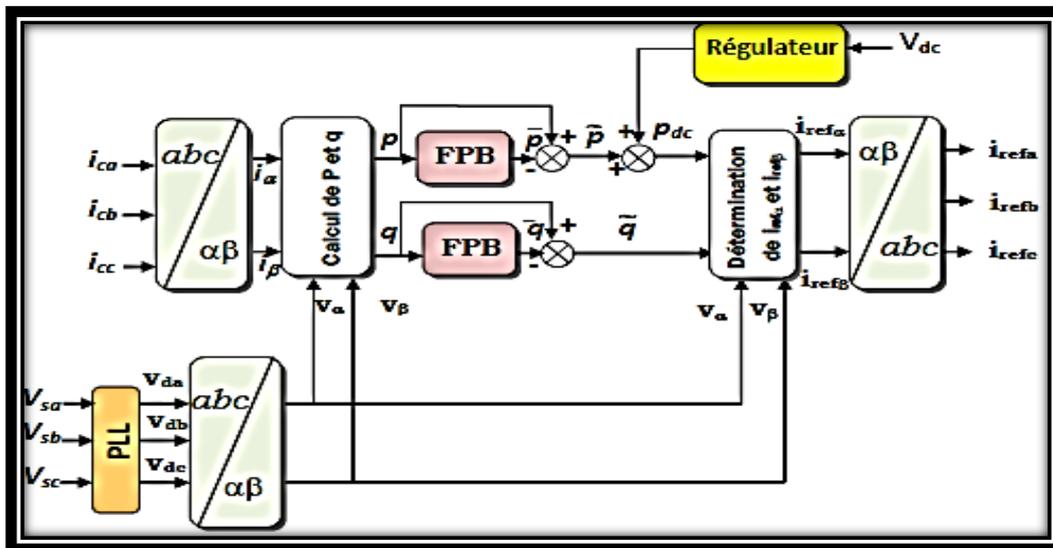


Figure III- 1: Identification par la méthode des puissances [30].

### III.4 Filtrage d'extraction

Les deux types de filtre d'extraction sont présentés à la figure (III-2) [23].

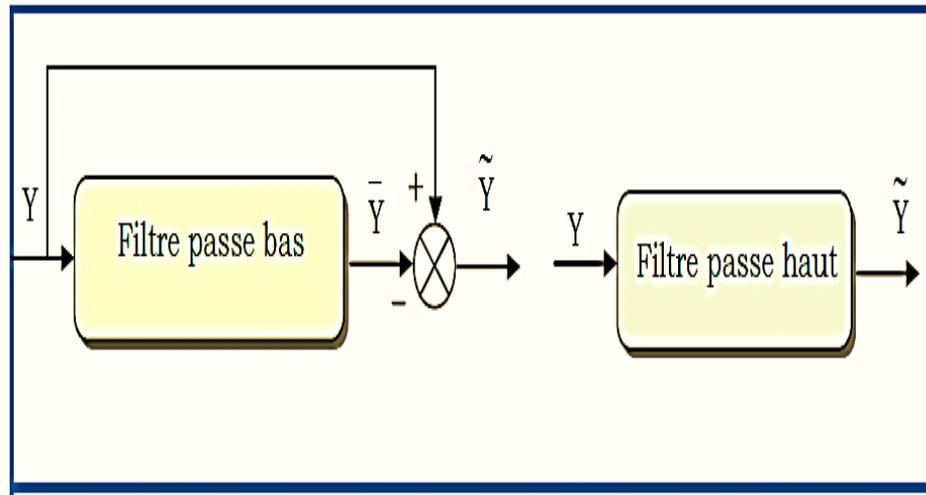


Figure III- 2: Filtres d'extraction [30].

Comme cela est exposé dans la littérature, ces filtres d'extraction permettent d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leurs caractéristiques Concernant le résidu harmonique sont différentes [23]. Ils n'ont pas donné entière satisfaction car:

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En générale, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif lors de variations rapides de la charge.
- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante.

### III.5 Méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées améliorée

#### III.5.1 Principe du FMV

Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok [63]. Il est basé directement sur l'extraction de la composante fondamentale des signaux d'entrée (tension ou courant), suivant les axes  $(\alpha, \beta)$ .

La fonction de transfert de ce filtre est alors la suivante [30] :

$$H(s) = \frac{\hat{X}_{\alpha\beta}(s)}{X_{\alpha\beta}(s)} = K \frac{(s+K)+j\omega_c}{(s+K)^2+\omega_c^2} \quad (\text{III-15})$$

Où  $\omega_c$  est définie par :

$$\omega_c = \varepsilon \cdot n \cdot \omega_f \quad (\text{III-16})$$

Avec :

$\omega_c$  : Pulsation de coupure du filtre ;

$\omega_f$ : Pulsation de la composante fondamentale du signal d'entrée ;

$n$  : Rang de la composante du signal à filtrer ;

$K$  : Constante positive ;

$X_{\alpha\beta}$ : Signaux d'entrées du FMV (tensions ou courants) ;

$\hat{X}_{\alpha\beta}$ : Signaux de sortis du FMV ;

$\epsilon$ : Constante égale à  $\pm 1$  (composante directe ( $\epsilon = 1$ ) ou inverse ( $\epsilon = -1$ )).

A partir de l'équation (III-15) et après un court développement, nous pouvons établir les deux expressions suivantes :

$$\hat{X}_{\alpha}(s) = \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + \omega_c^2} X_{\alpha}(s) - \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} X_{\beta}(s) \quad \text{(III-17)}$$

$$\hat{X}_{\beta}(s) = \frac{k\omega_c}{(s+k)^2 + \omega_c^2} X_{\alpha}(s) + \frac{k(s+k)}{(s+k)^2 + \omega_c^2} X_{\beta}(s) \quad \text{(III-18)}$$

Les équations (III-17) et (III-18) peuvent également être exprimées sous la forme :

$$\hat{X}_{\alpha}(s) = \frac{k}{s} [X_{\alpha}(s) - \hat{X}_{\alpha}(s)] - \frac{\omega_c}{s} \hat{X}_{\beta}(s) \quad \text{(III-19)}$$

$$\hat{X}_{\beta}(s) = \frac{k}{s} [X_{\beta}(s) - \hat{X}_{\beta}(s)] + \frac{\omega_c}{s} \hat{X}_{\alpha}(s) \quad \text{(III-20)}$$

La Figure III.3 présente le schéma bloc du filtre multi-variable.

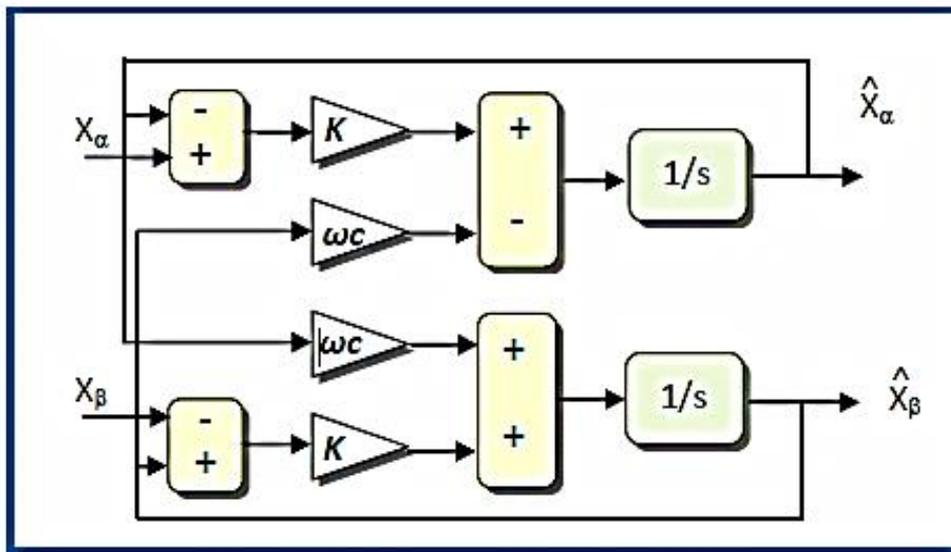


Figure III- 3: Schéma bloc du FMV [30].

Contrairement aux filtres passe bas, les filtres multi-variables offrent la possibilité d'extraire d'une manière précise les courants harmoniques dans le repère  $(\alpha, \beta)$ . La Figure III-4 présente le schéma modifié de l'identification des courants de référence par la méthode des puissances instantanées en employant des FMV.

Quant aux courants déphasés d'axes  $(\alpha, \beta)$ , ils peuvent être définis comme la somme d'une composante fondamentale et d'une composante harmonique:

$$\begin{cases} i_\alpha = \hat{i}_\alpha + i_{h\alpha} \\ i_\beta = \hat{i}_\beta + i_{h\beta} \end{cases} \quad \text{(III-21)}$$

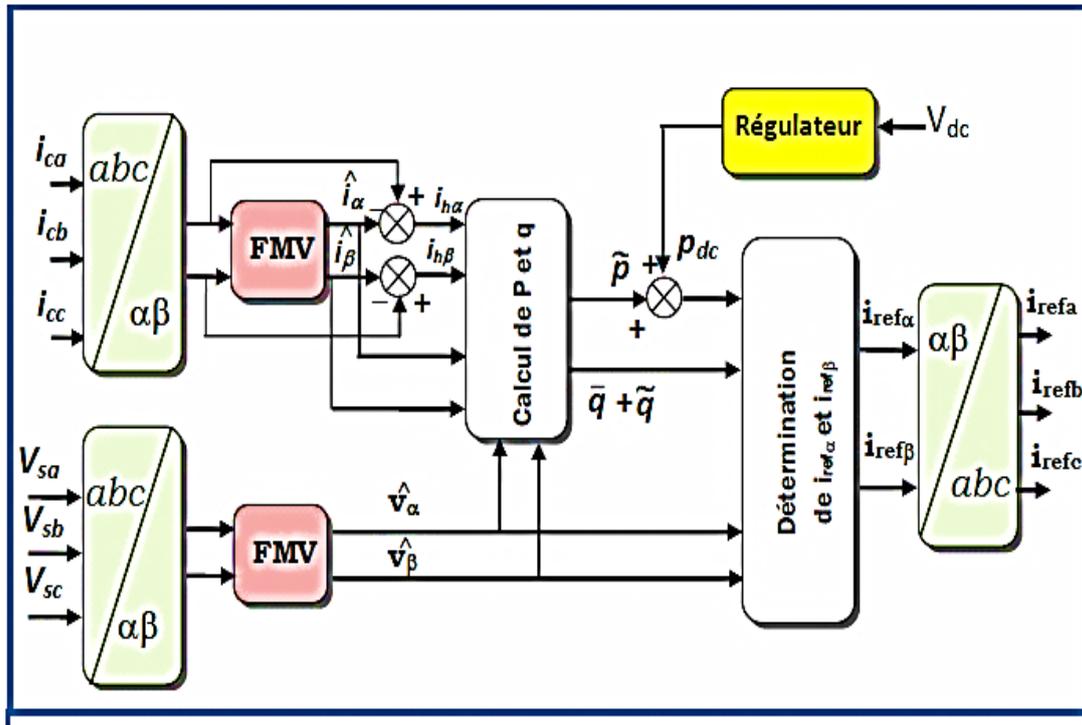


Figure III- 4: Schéma de principe d'identification des harmoniques par la méthode des puissances réelles et imaginaires instantanées améliorée [30].

Après isolation des composantes fondamentales en tension notées  $\hat{V}_{\alpha\beta}$ , et des courants harmoniques  $i_{h\alpha\beta}$  nous pouvons alors calculer les composantes alternatives des puissances réelle  $\tilde{p}$  et imaginaire  $\tilde{q}$  instantanées [30] :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & \hat{V}_\beta \\ -\hat{V}_\beta & \hat{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(III-22)}$$

Avec :

$i_{h\alpha}$  et  $i_{h\beta}$  définis par :

$$i_{h\alpha} = (i_{\alpha d} - \hat{i}_{\alpha d}) + (i_{\alpha inv} - \hat{i}_{\alpha inv}) \quad \text{(III-23)}$$

$$i_{h\beta} = (i_{\beta d} - \hat{i}_{\beta d}) + (i_{\beta inv} - \hat{i}_{\beta inv}) \quad \text{(III-24)}$$

La composante fondamentale de la puissance imaginaire instantanée est définie par :

$$\bar{q} = \hat{V}_\beta \hat{i}_\alpha - \hat{V}_\alpha \hat{i}_\beta \quad \text{(III-25)}$$

Après avoir ajouté à la composante alternative de la puissance active instantanée, la puissance réelle  $P_{dc}$  nécessaire à la régulation de la tension continue  $V_{dc}$ , les courants de référence selon les axes  $(\alpha, \beta)$  sont calculés par :

$$i_{ref\alpha} = \frac{\hat{V}_\alpha}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} (\tilde{p} + P_{dc}) + \frac{\hat{V}_\beta}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} (\tilde{q} + \bar{q}) \quad (\text{III-26})$$

$$i_{ref\beta} = \frac{\hat{V}_\beta}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} (\tilde{p} + P_{dc}) + \frac{\hat{V}_\alpha}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} (\tilde{q} + \bar{q}) \quad (\text{III-27})$$

En substituant les équations (III-22) et (III-25) dans les équations (III-26) et (III-27), nous obtenons :

$$i_{ref\alpha} = i_{h\alpha} + i_{q\alpha} + i_{c\alpha} \quad (\text{III-28})$$

$$i_{ref\beta} = i_{h\beta} + i_{q\beta} + i_{c\beta} \quad (\text{III-29})$$

Où  $i_{q\alpha}, i_{q\beta}, i_{c\alpha}, i_{c\beta}$  sont définis par :

$$\begin{bmatrix} i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} \begin{bmatrix} 0 & -\hat{V}_\beta \\ 0 & \hat{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III-30})$$

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{V}_\alpha^2 + \hat{V}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & 0 \\ \hat{V}_\beta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{dc} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III-31})$$

Les courants de référence obtenus à partir des équations (III-28) et (III-29) contiennent trois termes :

- ❖ Premier terme correspond aux composantes harmoniques, directes et inverses ;
- ❖ Deuxième terme est le courant réactif destiné à compenser la puissance réactive;
- ❖ Troisième terme est le courant actif destiné à maintenir la tension  $V_{dc}$  égale à sa valeur de référence  $V_{dc-ref}$ .

Grâce à la transformation de Concordia inverse, les équations (III-28) et (III-29), permettent de déduire les trois courants de référence.

### III.5.2 Méthode de référentiel lié au synchronisme SRF

La méthode de référentiel lié au synchronisme, est appelée aussi méthode des courants instantanés ( $dq$ ). Les courants de la charge sont transformés dans le repère synchrone afin d'extraire la composante harmonique, elle repose sur le calcul des composantes de *Park* (de courant). Elle permet d'obtenir des meilleures performances même si la tension du réseau est perturbée ou déséquilibrée. On calcule les composantes de *Concordia* et avec une simple rotation de on trouve les composantes de *Park* [49].

Il y a cinq étapes pour calculer les courants de référence pour un filtre actif parallèle:

**Étape 1:** Les composantes de *Concordia* sont:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \quad (\text{III-31})$$

La relation (III-32) des courants:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ch1} \\ i_{ch2} \\ i_{ch3} \end{bmatrix} \quad (\text{III-32})$$

**Etape 2:** Les composantes de *Park* sont :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{III-33})$$

Le schéma vectoriel de passage du repère (*abc*) vers le repère (*dq*) est représenté dans la figure (III-5) :

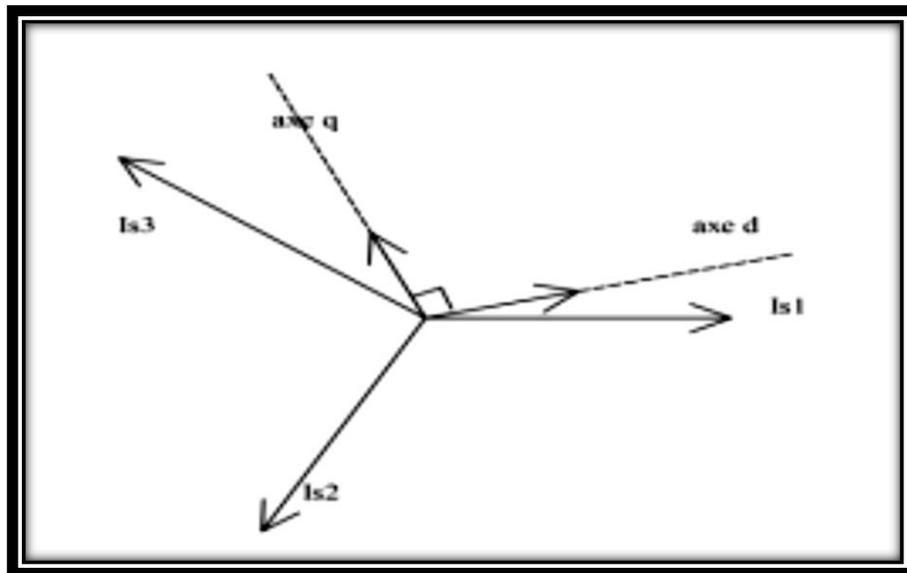


Figure III- 5: Schéma vectoriel de passage du (*abc*) vers (*dq*) [49].

On peut décomposer les courants  $i_d$  et  $i_q$  en deux termes, les composantes fondamentales et harmoniques. Les harmoniques se comportent comme une composante alternative et les termes fondamentaux se comportent comme une composante continue [49], donc on peut écrire :

$$\begin{cases} i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \\ i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \end{cases} \quad (\text{III-34})$$

avec :

$\bar{i}_d, \bar{i}_q$  : Composante continue (fondamentale) de courant de charge dans le repère  $dq$ .

$\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$  : Composante alternative (harmonique) de courant de charge dans le repère  $dq$ .

**Étape 3:** De l'étape 2, il est montré que les courants de charge se composent de deux termes.

Pour cette étape, le filtre passe-bas (**FPB**) est utilisé pour séparer les composantes harmoniques  $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$  comme le montre la Figure (III-2).

**Étape 4:** Le passage des composantes harmoniques ( $\tilde{i}_d, \tilde{i}_q$ ) de repère ( $dq$ ) vers le repère  $\alpha, \beta$  ( $\tilde{i}_\alpha, \tilde{i}_\beta$ ) en utilisant l'équation suivant:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (\text{III-35})$$

**Étape 5 :** Calcul des courants de référence triphasés:

$$\begin{bmatrix} I_{hréf1} \\ I_{hréf2} \\ I_{réf3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III-36})$$

Afin d'échanger une puissance contrôlée, l'onduleur doit toujours être synchronisé avec le réseau. Le but du bloc de synchronisation est d'obtenir la phase de la tension instantanée du réseau. Plusieurs techniques sont utilisées, le choix le plus commun consiste à utiliser une boucle à verrouillage de phase (*PLL: Phase locked loop*) [21].

### III.5.3 Système à base de PLL

Diverses perturbations peuvent survenir sur le réseau électrique (creux de tension, harmoniques, déséquilibre ...). Pour nos applications dans le processus de filtrage actif, le déséquilibre de tension réduit sensiblement la qualité de compensation des harmoniques [64].

La *PLL* est la technique la plus répandue pour l'extraction de la composante fondamentale directe de la tension du réseau, son fonctionnement se base sur la transformation de Park pour passer au repère  $dq$  [21].

En effet, nous venons de voir que l'algorithme de la méthode des puissances  $pq$  (*PIRI*) et celui la méthode ( $pqr$ ) suggèrent des tensions d'entrée (la tension du réseau) saines pour pouvoir identifier correctement les courants harmoniques, ce qui n'est souvent pas le cas pratique. Pour la méthode synchrone, on vu qu'au moins l'identification de la phase est obligatoire. Dans ce cas, nous avons montré comment extraire les composantes directe, inverse et homopolaire de la tension triphasée. Nous présentons la méthode de la boucle à verrouillage de phase ou *PLL*, cette technique la plus utilisée [65, 66].

La méthode *PLL* est proposée pour extraire la composante fondamentale directe de la tension du réseau. C'est un système asservi comprenant un régulateur pour la détection de la pulsation directe de la tension et utilisant une transformation pour passer dans le repère de *Park*. Donc cette méthode détecte les paramètres de la composants fondamentale ( $\hat{\theta}_d, V_m$ ) des tensions de source l'équation (III-37). Ces variable sont nécessaires dans l'étape d'identification des courants harmoniques [13, 14, 58, 65].

La phase instantanée est une grandeur importante et indispensable pour les méthodes d'identification. Certaines méthodes sont très sensibles aux changements de fréquence. Il est donc nécessaire de disposer d'une *PLL* robuste pour améliorer la qualité de la compensation [13].

### III.5.3.a Principe d'un PLL

Le principe de cette méthode est basé les tensions mesurées sur le réseau subissent une transformation de *Concordia* directe dans le repère  $(\alpha, \beta)$  afin de travailler dans un repère à deux dimensions  $v_{s\alpha}$  et  $v_{s\beta}$  (avec  $\theta_d$  la phase instantanée réelle de la tension direct) sont exprimées dans le repère de *Park* par une rotation  $P(-\hat{\theta}_d)$ , où  $\hat{\theta}_d$  est l'intégrale de l'estimation de la pulsation  $\hat{\omega}_d$  déterminée par le régulateur *PID*). Nous obtenons ainsi  $v_{sd}$  et  $v_{sq}$ , les tensions directe et quadratique. L'angle de phase de la tension  $v_{sd}$  donc  $(\theta_d - \hat{\theta}_d)$ .

Pour satisfaire la condition que l'angle de phase réel de la tension directe égal à l'angle de rotation estimé, si cette condition est vérifiée alors la tension sur l'axe  $d$  est nulle, c'est pourquoi la référence  $v_{d-ref}$  doit être nulle. La *PLL* sera verrouillée lorsque cette condition  $\theta_d = \hat{\theta}_d$  sera satisfaite [14, 66].

Dans le cas où la tension du réseau est sinusoïdale et équilibrée, on aura  $\theta_d = \theta_s$ , avec  $\theta_d = \omega_d t + \varphi_d$  où  $\omega_d = \omega_s$  est la pulsation de la tension du réseau et  $\varphi_d$  l'angle de la composante directe de la tension du réseau. Dans ces conditions, les tensions mesurées au point de raccordement du filtre actif parallèle sont données par :

$$\begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_d) \\ \sin(\theta_d - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta_d + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III-37})$$

$V_m$ : Amplitude de la tension directe, alors les tensions obtenues  $v_{s1}$ ,  $v_{s2}$  dans le repère  $(\alpha, \beta)$

Avec :

$\theta_d$  : Phase instantanée réelle de la tension directe, qui n'est autre que la phase instantanée réelle de la tension directe:

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_d) \\ -\cos(\theta_d) \end{bmatrix} \quad \text{(III-38)}$$

Ces tensions sont ensuite transformées dans un repère tournant par la transformation de *Park*, avec comme angle de rotation instantané  $\hat{\theta}_d$ , qui est l'intégrale de la pulsation  $\hat{\omega}_d$  estimée par un correcteur. Ainsi, l'angle de phase de la tension  $v_m$  sera  $\theta_d = \hat{\theta}_d$ . En effet:

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_d) & \sin(\theta_d) \\ -\sin(\hat{\theta}_d) & \cos(\hat{\theta}_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \sin(\theta_d) \\ -\sqrt{\frac{3}{2}} v_m \cos(\theta_d) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} v_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_d - \hat{\theta}_d) \\ -\cos(\theta_d - \hat{\theta}_d) \end{bmatrix} \quad \text{(III-39)}$$

L'asservissement de phase sera réalisé lorsque le rapport  $\theta_d = \hat{\theta}_d = 0$ . Dans ce cas, l'angle de phase de la tension d'alimentation  $\theta_d$  et l'angle estimé  $\hat{\theta}_d$  sont égaux. Les tensions dans le repère de *Park* seront [14, 65, 66]:

$$v_{sd} = 0 \quad \text{(III-40)}$$

$$v_{sq} = -\sqrt{\frac{3}{2}} v_m \quad \text{(III-41)}$$

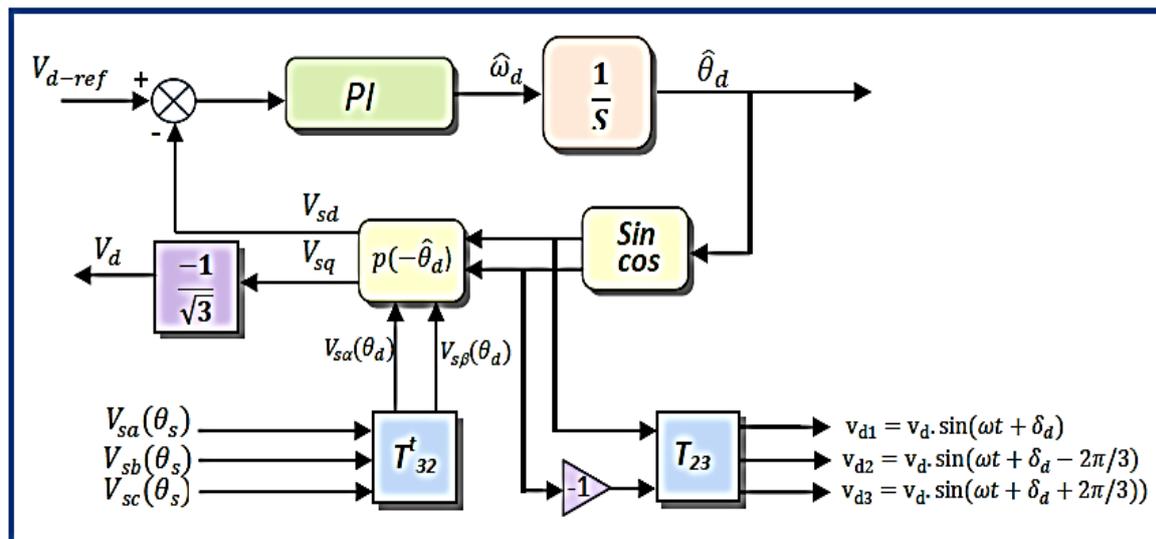


Figure III- 6: Schéma de principe de la PLL [30].

### III.6 Etude du contrôle direct de puissance (DPC)

Le principe du contrôle direct a été proposé et il a été développé plus tard dans de nombreuses applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation et les boucles internes en les remplaçant par un tableau de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de références et les mesures.

La première application développée visait le contrôle d'une machine électrique et la structure de contrôle est connue sous la dénomination de Contrôle Direct de Couple (DTC).

Dans ce cas, le flux statorique et le couple électromagnétique de la machine sont contrôlés sans aucun bloc de modulation. Par la suite, une technique similaire de commande en puissance (DPC) était proposée pour une application de contrôle des redresseurs connectés au réseau. Dans ce cas, les grandeurs contrôlées sont les puissances active et réactive instantanées [67]. Avec la DPC il n'y a pas de boucle de régulation en courant ni d'élément de modulation MLI, car les états de commutation de l'onduleur, pour chaque période d'échantillonnage, sont sélectionnés à partir d'une table de commutations, basée sur l'erreur instantanée entre les valeurs de références et celles mesurées ou estimées des puissances active et réactive, et la position angulaire du vecteur de tension de source.

Généralement avec cette stratégie de commande, la tension du bus continu est régulée pour un contrôle de la puissance active et le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire est obtenu en imposant la puissance réactive à une valeur nulle [5, 68, 69].

### III.7 Etat de l'art du contrôle direct de puissance

Le principe de base de commande directe de puissance a été originalement présenté par Takahashi et *al.* en 1986 et il a été développé plus tard pour plusieurs applications. Le but était d'éliminer le bloc de modulation de largeur d'impulsion et les boucles internes des variables contrôlées en les remplaçant par une table de commutation dont les entrées sont les erreurs entre les valeurs de référence et les mesures. En 1998, Noguchi et *al.*, ont introduit la première application pratique du concept de la commande directe de puissance. Cette application est utilisée pour contrôler les puissances instantanées active et réactive du redresseur à MLI triphasé sans capteurs de tension du réseau. En 2001, Malinowski et *al.* ont introduit une nouvelle configuration de DPC basée sur un estimateur de flux virtuel. Cependant, les deux dernières structures présentent un inconvénient majeur réside dans sa fréquence de commutation variable. Pour surmonter ce problème, dans Malinowski et *al.*, ont présenté un nouveau schéma de commande direct de puissance utilisant une modulation de largeur d'impulsion vectorielle (SVM) afin d'obtenir une fréquence de commutation constante où les régulateurs à hystérésis et la table de commutation sont remplacés par des régulateurs PI et une commande SVM. Par conséquent, les performances de la commande dépendent fortement de l'aptitude de la boucle des régulateurs PI. Récemment, d'autres structures de DPC basées sur des approches prédictives ont fait l'objet de publications internationales. Dans ce sens, en 2008, Cortes et *al.*, ont exposé une structure de DPC basée sur la commande prédictive. Les avantages principaux de cette stratégie consistent dans l'absence de régulateurs PI pour le courant, de transformation de repères et de modulation MLI. Une année

plus tard, une commande basée sur l'application des règles floues a été proposée. Dans ce cas, les erreurs de suivi de référence des puissances active et réactive, converties en variables floues, sont utilisées directement pour la sélection du vecteur de commande adéquat. Plus récemment encore, Portillo et *al*, ont proposé d'appliquer la commande directe de puissance pour le convertisseur triphasé NPC à trois niveaux. Par ailleurs, il est intéressant de mentionner que la majorité des travaux utilisant la commande DPC est appliquée aux redresseurs à MLI et peu s'intéressent aux filtres actifs [5].

### III.8 Principe du DPC classique

La figure III-7 [5, 70] montre la configuration globale de la commande directe de puissance appliquée au SAPF. Elle est analogue à celle du contrôle direct de couple (DTC) des machines à induction.

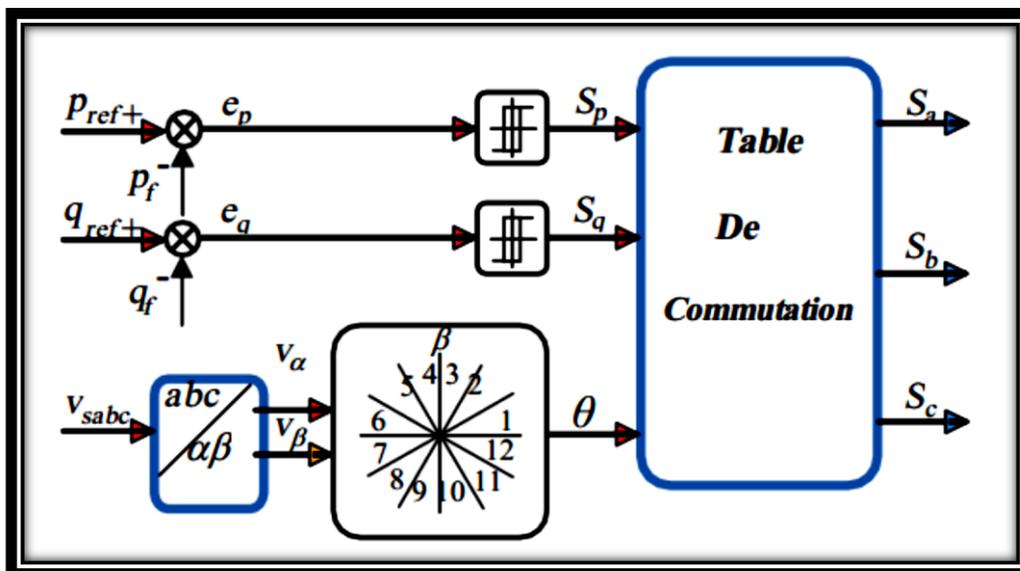


Figure III- 7: Configuration générale de la commande directe de puissance [49].

La DPC consiste à sélectionner un vecteur de commande d'après une table de commutation. Cette dernière est fondée sur l'erreur numérisée  $S_p$ ,  $S_q$  qui sont limitées par une bande d'hystérésis, aussi bien que sur la position angulaire de la tension au point de raccordement de la charge au réseau PCC. Le plan  $(\alpha, \beta)$  est divisé en douze secteurs pour déterminer le secteur de travail [71].

### III.9 Stratégie du contrôle direct de puissance du SAPF

La stratégie de commande DPC appliquée au SAPF est illustrée sur le synoptique de la figure III-8 elle consiste à sélectionner l'état approprié à partir d'une table de commutation basée sur les erreurs, qui sont limitées par une bande d'hystérésis, présentes dans les

puissances active et réactive [58]. Deux aspects importants garantissent un fonctionnement viable du système :

- ❖ Une détermination exacte des états de commutation.
- ❖ Une estimation rapide et précise des puissances active et réactive.

### III.9.1 Calcul des puissances instantanées

Basée sur la mesure des tensions et courants de source, les puissances active et réactive instantanées peuvent être calculées par les expressions :

$$P_s(t) = V_{Sa} \cdot i_{Sa} + V_{Sb} \cdot i_{Sb} + V_{Sc} \cdot i_{Sc} \tag{III-42}$$

$$Q_s(t) = \frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{Sa} - V_{Sb}) \cdot i_{Sc} + (V_{Sb} - V_{Sc}) \cdot i_{Sa} + (V_{Sc} - V_{Sa}) \cdot i_{Sb}] \tag{III-43}$$

Toutefois, le nombre des capteurs requis augmente le coût et réduit la fiabilité du système. Par conséquent, afin d'estimer correctement la puissance et en même temps de réduire le nombre de capteurs de tension, Nogauchi propose l'utilisation d'un estimateur du vecteur de tension [68, 72].

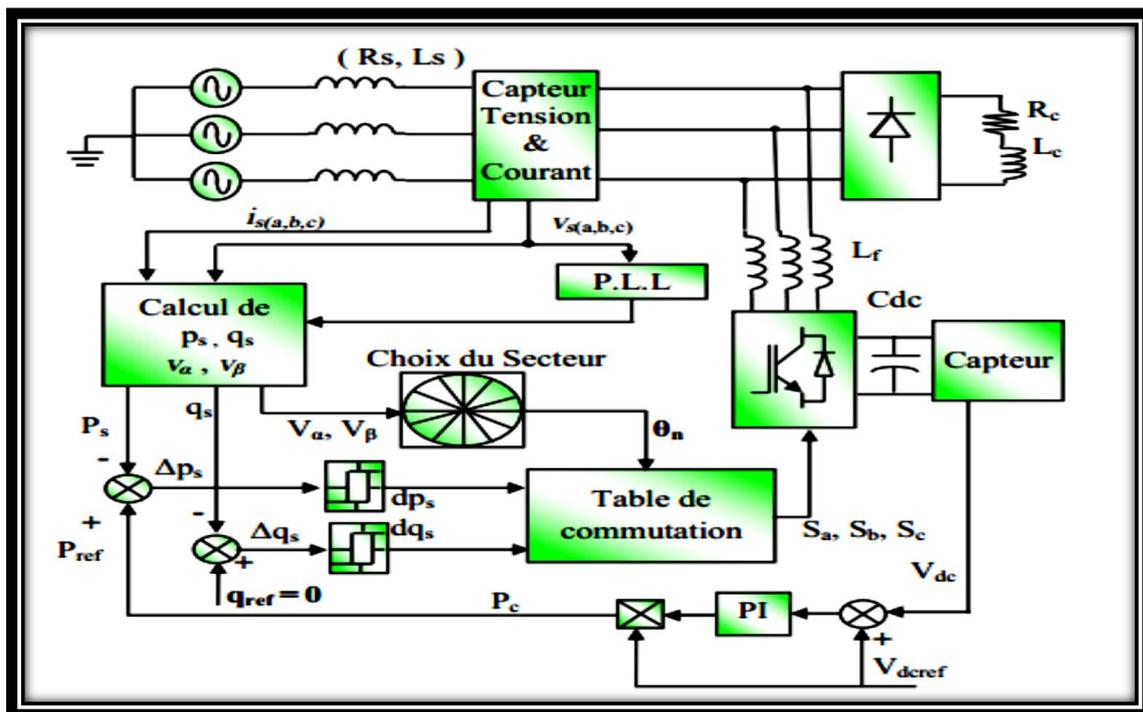


Figure III- 8: Synoptique de contrôle du SAPF avec la commande DPC [49].

### III.9.2 Table de commutation

La table de commutation peut être considérée comme le cœur de la commande directe en puissance. Elle sélectionne un vecteur de tension de l'onduleur approprié pour permettre le déplacement des puissances active et réactive instantanées dans la direction désirée, en se basant aussi sur la position du vecteur de la source et des erreurs des puissances active et réactive [48].

Les régulateurs à hystérésis à deux niveaux pour les puissances active et réactive instantanées peuvent être décrits comme suit :

- Pour la puissance active :

$$\begin{cases} S_i P^* - P \geq HB_p & S_p = 1 \\ S_i P^* - P \leq HB_p & S_p = 0 \end{cases} \quad (\text{III-45})$$

- De même manière pour la puissance réactive :

$$\begin{cases} S_i q^* - q \geq HB_q & S_q = 1 \\ S_i q^* - q \leq HB_q & S_q = 0 \end{cases} \quad (\text{III-46})$$

En utilisant cette table de commutation ; les états de commutation optimales du convertisseur peuvent être sélectionnés de manière unique à chaque instant spécifique selon la combinaison des signaux d'entrée numérisés comme il est montré sur le Tableau III-2.

**Tableau III- 2:** Table de commutation pour la DPC

$d_p$	$d_q$	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$	$\theta_6$	$\theta_7$	$\theta_8$	$\theta_9$	$\theta_{10}$	$\theta_{11}$	$\theta_{12}$
1	0	$V_6$	$V_7$	$V_1$	$V_0$	$V_2$	$V_7$	$V_3$	$V_0$	$V_4$	$V_7$	$V_5$	$V_0$
1	1	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$	$V_7$	$V_7$	$V_0$	$V_0$
0	0	$V_6$	$V_1$	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$
0	1	$V_1$	$V_2$	$V_2$	$V_3$	$V_3$	$V_4$	$V_4$	$V_5$	$V_5$	$V_6$	$V_6$	$V_1$
$V_1(100), V_2(110), V_3(010), V_4(011), V_5(001), V_6(010), V_7(111), V_0(000)$													

### III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes méthodes d'identification des courants harmoniques de référence largement utilisées. Nous avons basé sur l'étude analytique de ces méthodes qui nous permet de voir les performances de chaque méthode dans différentes conditions.

La méthode des puissances instantanées a été présentée pour identifier les courants harmoniques de référence par l'intermédiaire des calculs des puissances réelle et imaginaire instantanées, donne des résultats satisfaisants en vue des performances statique et dynamique. De plus, selon le même principe, certains courants déséquilibrés peuvent être aussi compensés. La méthode du référentiel synchrone reste tributaire en plus des performances du PLL au contraire du cas du FMV.

## *Chapitre IV :*

---

---

### *Simulation d'un FAP à quatre fils et interprétations des résultats*

---

---

## IV.1 Introduction

Un système d'électronique de puissance est un ensemble de composants qui convertissent l'énergie et comprend les éléments suivants :

- Source d'énergie.
- Convertisseur statique.
- Charge réceptrice.
- Dispositif de commande du convertisseur.

Ce système se caractérise par la non-linéarité des semi-conducteurs utilisés dans le convertisseur, ainsi que par la présence de sous-ensembles hétérogènes et fortement interdépendants.

Les études analytiques de ce système sont difficiles et ne peut être réalisées, et seules des hypothèses simplificatrices importantes peuvent être faites pour un point de fonctionnement donné. C'est pour cette raison que les simulations numériques sont devenues un outil indispensable pour l'étude de ces systèmes.

Dans ce chapitre, nous proposons d'étudier la simulation d'un système comprenant un réseau, charge polluante (redresseurs) et un filtre actif parallèle à trois bras en régime équilibré et quatre fils en régime déséquilibré en utilisant l'environnement Matlab-Simulink. Nous présentons et expliquons ensuite les résultats de simulation obtenus.

## IV.2 Logiciel utilisé

La modélisation et la simulation d'un système physique sont une étape essentielle qui précède toute implémentation matérielle. Dans les langages évolués cette tâche est réalisée par l'élaboration de programmes informatiques spécifiques qui décrivent le comportement du système aussi bien à l'état dynamique (régime transitoire) qu'à l'état statique (régime permanent). Cette opération devient plus complexe dès qu'il s'agit des systèmes physiques d'ordre élevé, ou ayant des non linéarités[73].

La dernière décennie a été surtout marquée par le développement de nombreux logiciels appelés solveurs, pour l'aide à la modélisation et la simulation numérique des systèmes dynamiques, parmi ces logiciels on trouve : MATLAB/SIMULINK, ce logiciel est destiné à la modélisation et à la simulation des systèmes continus et discrets.

Compte tenu des possibilités offertes en matière de modélisation et de simulation pour des systèmes mixtes (continus et discrets) et la simplicité d'implantation des modèle (linéaires et non linéaires) grâce à son interface graphique, ainsi que la possibilité d'échange de données entre Simulink et l'espace de travail Matlab, dans lequel le système modélisé

sous Simulink peut recevoir des données de l'espace de travail ou y envoyer des données de sortie.

Simulink est donc un programme additionnel à Matlab pour la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques continus et discrets. Il offre d'innombrables outils, spécifiques aux systèmes dynamiques, tout en conservant la puissance et les fonctionnalités de Matlab.

### IV.3 Paramètres de simulation

La simulation du système global (réseau électrique, charge non linéaire, FAP) est réalisée sous environnement Matlab / SimPowerSystems. Différentes formes d'onde ont été simulées telles que celles des courants de compensation, de charge, et de source ainsi que la tension aux bornes du bus continu, une analyse spectrale de ces signaux a été conduite. Les paramètres du système simulé sont récapitulés sur le tableau (IV-1).

*Tableau IV- 1 : Tableau des paramètres de simulations.*

Réseau électrique	
Tension	220 V
Fréquence	50 Hz
Résistance et inductance ( $R_s, L_s$ )	0.2m $\Omega$ et 0.015mH
Charge non linéaire	
Résistance ( $R_{ch1}$ et $R_{ch2}$ )	75 $\Omega$ et 90 $\Omega$
Résistance et inductance ( $R_1, L_1$ )	0.1 $\Omega$ et 0.3mH
Filtre Actif parallèle	
Résistance et inductance ( $R_f, L_f$ )	30m $\Omega$ , 3mH
Condensateur de stockage $C_{dc}$	5600 $\mu$ F
Tension de référence $V_{dc-ref}$	620V

### IV.4 Structure générale de simulation d'un filtre actif parallèle FAP

La figure (IV-1) présente la structure globale du FAP et son environnement fonctionnel, qui contient les parties suivantes :

- Source de tension triphasée.

- Charge non linéaire : pont redresseur triphasé à diode.
- Filtre actif, le quel est composé d'un onduleur de tension à trois bras à interrupteur réversible en courant et bi-commandables (IGBT avec des diodes antiparallèles).
- Élément de stockage de l'énergie continue est une capacité  $C_{dc}$  qui joue le rôle d'une source de tension  $V_{dc}$ .
- Filtre de sortie du premier ordre représenté par ( $R_f$  et  $L_f$ ).
- Commande de FAP, qui génère les signaux de commande de l'onduleur.

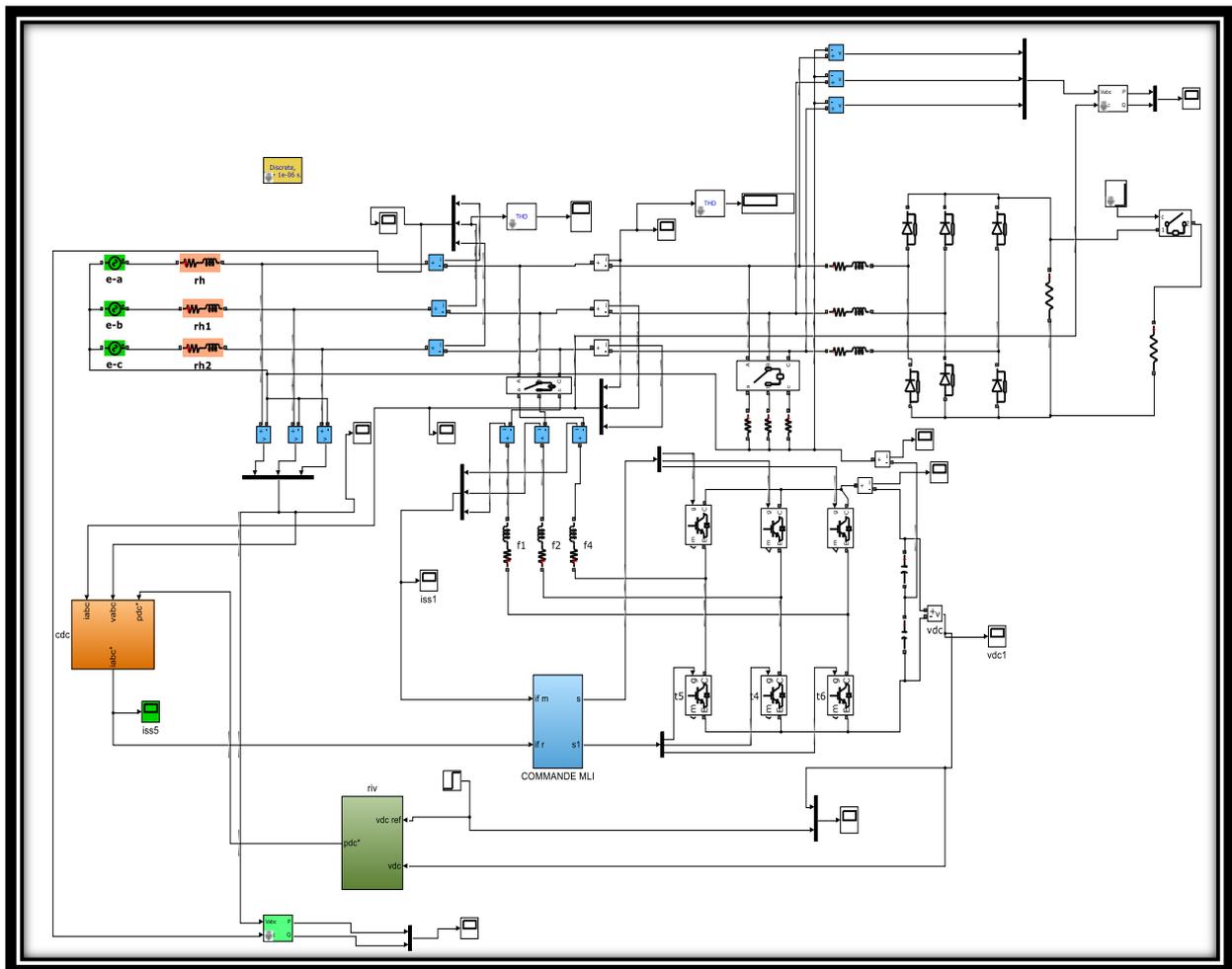


Figure IV- 1: Structure générale du FAP sous Matlab/SimPowerSystems.

#### IV.4.1 Source de tension triphasée à quatre fils

La figure (IV-2) présente le schéma bloc de la source de tension triphasée à quatre fils.

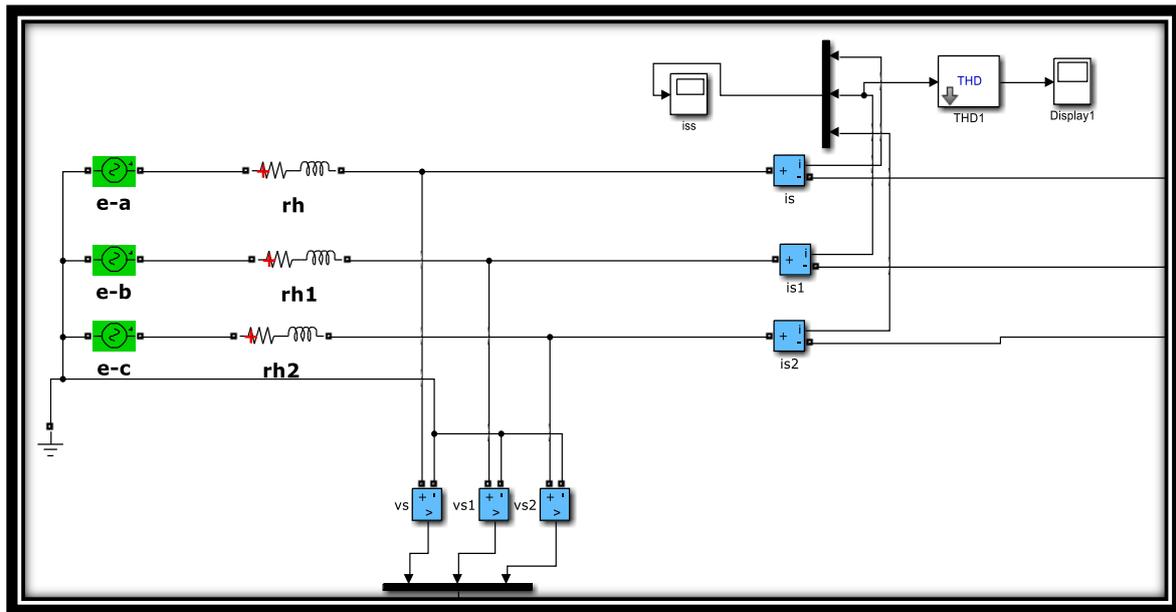


Figure IV- 2: Source de tension triphasée.

#### IV.4.2 Charge non linéaire

La figure suivante présente la charge non linéaire : pont redresseur triphasé à diode.

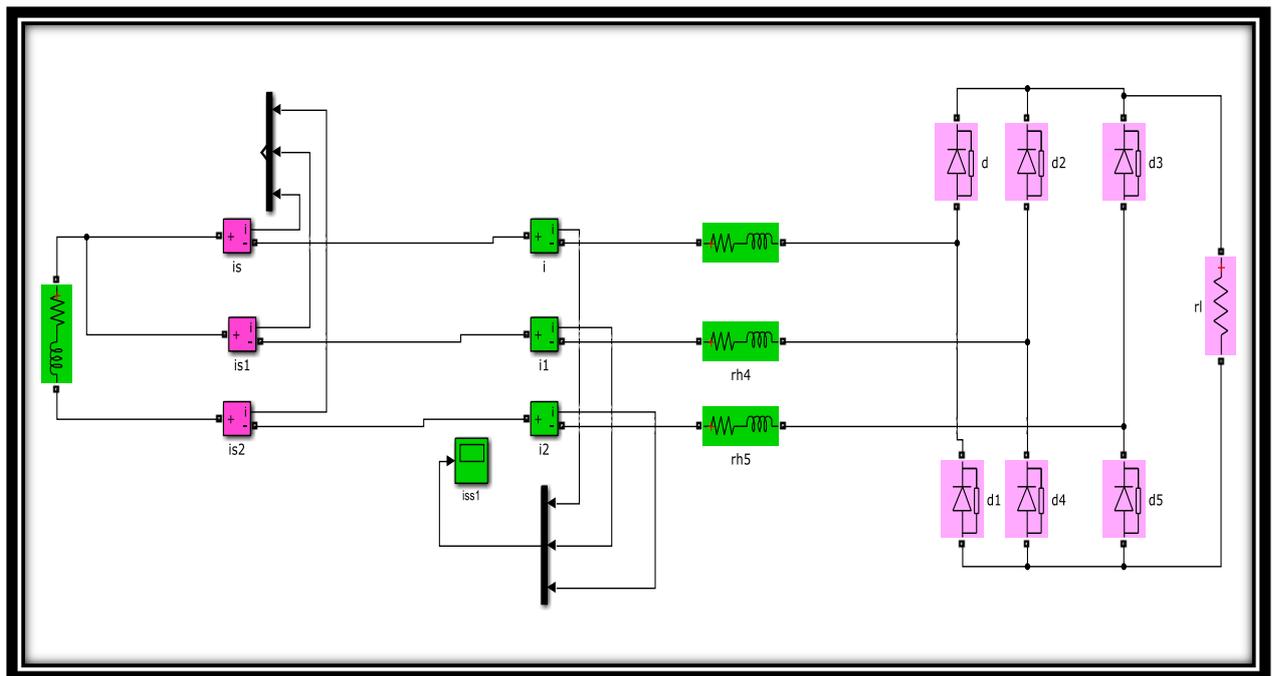


Figure IV- 3: Charge non linéaire.

#### IV.4.3 Structure sans FAP (réseau triphasé/charge non linéaire)

La figure (IV-4) présente le schéma bloc d'un réseau triphasé avec une charge non linéaire sans FAP.

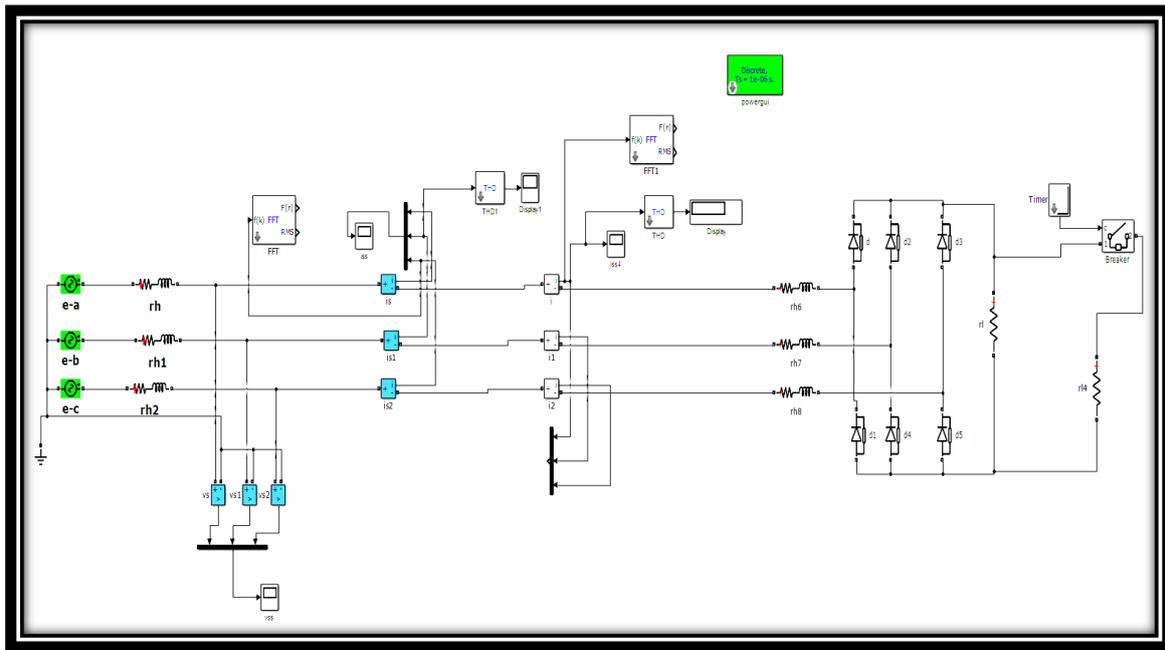


Figure IV- 4 : Structure sans FAP (réseau triphasé/charge non linéaire).

### IV.5 Simulation de FAP à quatre-fils

Nous avons pris un système de charges déséquilibré d'un FAP trois bras (un onduleur triphasé à trois bras avec condensateur à point milieu), dont le déséquilibre est illustré par une charge résistive triphasé déséquilibrée connectée en parallèle avec notre charge non linéaire. Nous considérons que notre système de tension est sinusoïdal et équilibré. Pour déterminer le courant de référence, nous avons utilisé un algorithmes basé sur la méthode de puissance instantanée p-q.

#### IV.5.1 Simulation de FAP trois-bras à quatre-fils

La figure (IV-5) présente la structure de la simulation d'un FAP à quatre fils (un onduleur triphasé à trois bras avec condensateurs à point milieu) dans un système déséquilibré :

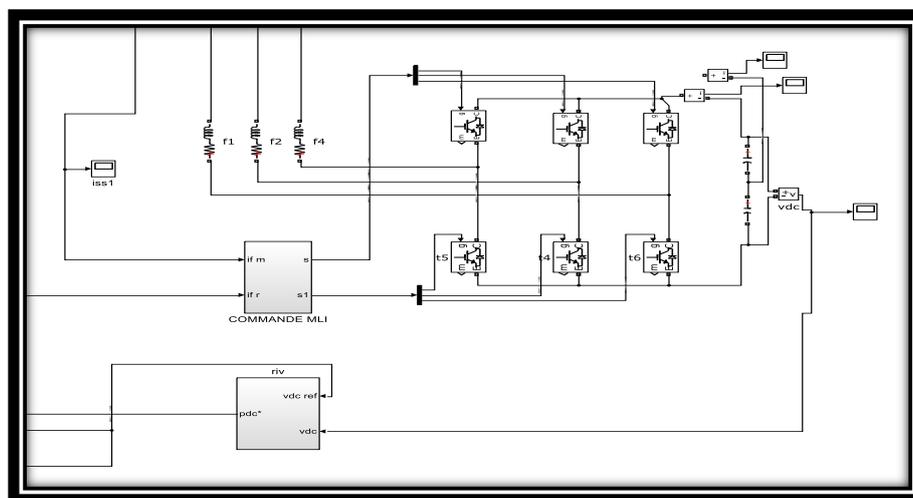


Figure IV- 5: Structure générale du FAP à quatre fils sous Matlab/SimPowerSystems.

**IV.5.1.1 Commande d'un FAP par la méthode des puissances instantanées p-q**

Les figures (IV-6 et IV-7) montrent la structure de simulation de la méthode de puissances instantanées  $pq$  utilisée dans notre simulation.

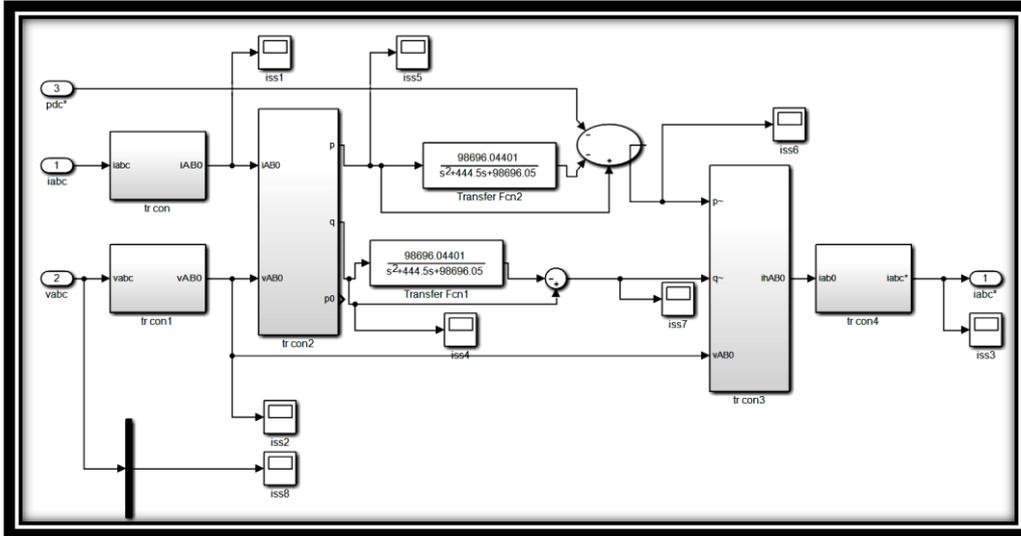


Figure IV- 6: Schéma de principe de la méthode des puissances instantanées  $p-q$ .

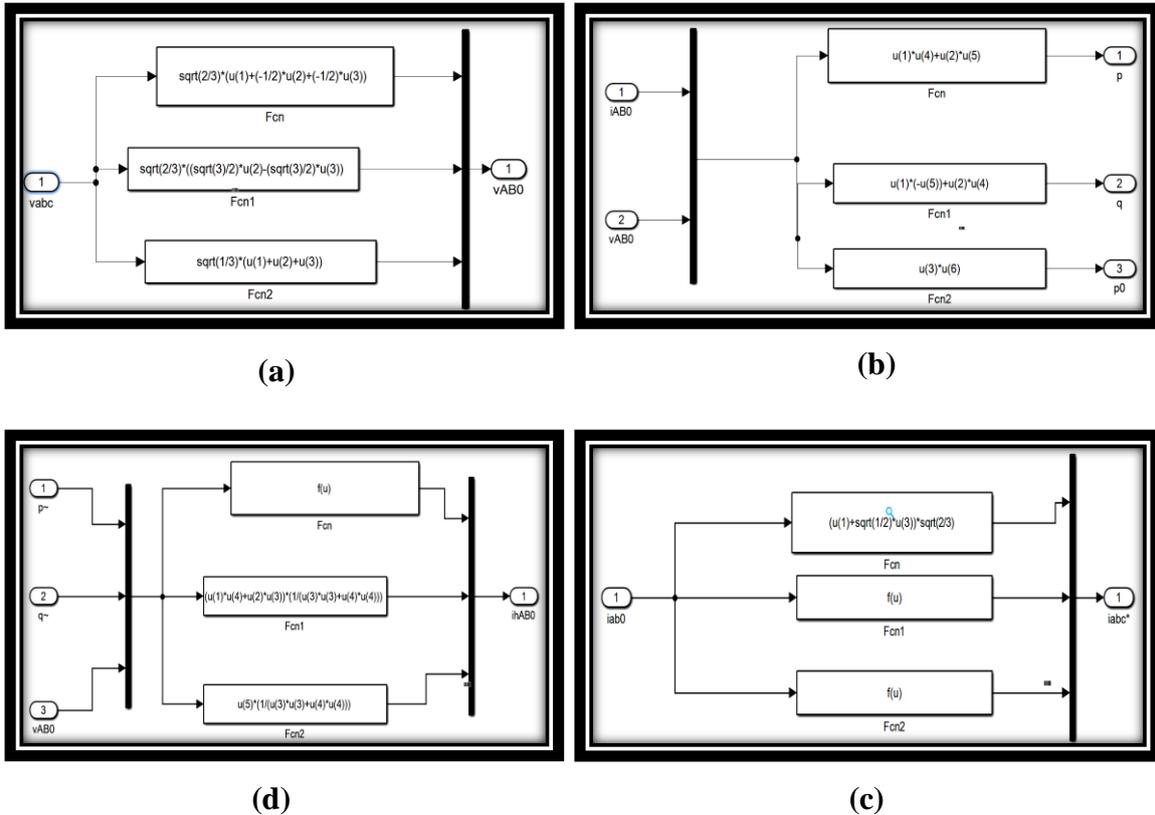


Figure IV- 7: Schéma de transformations :a) Repère  $abc$  vers  $\alpha\beta$ , b) Calcul de puissances  $p-q$ , c) Calcul des courants de références dans le repère  $\alpha\beta$ , d) Calcul des courants de références dans le repère  $abc$ .

### IV.5.1.2 Commande du FAP par MLI

La commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la technique de commande la plus utilisée, elle résout le problème de la maîtrise la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

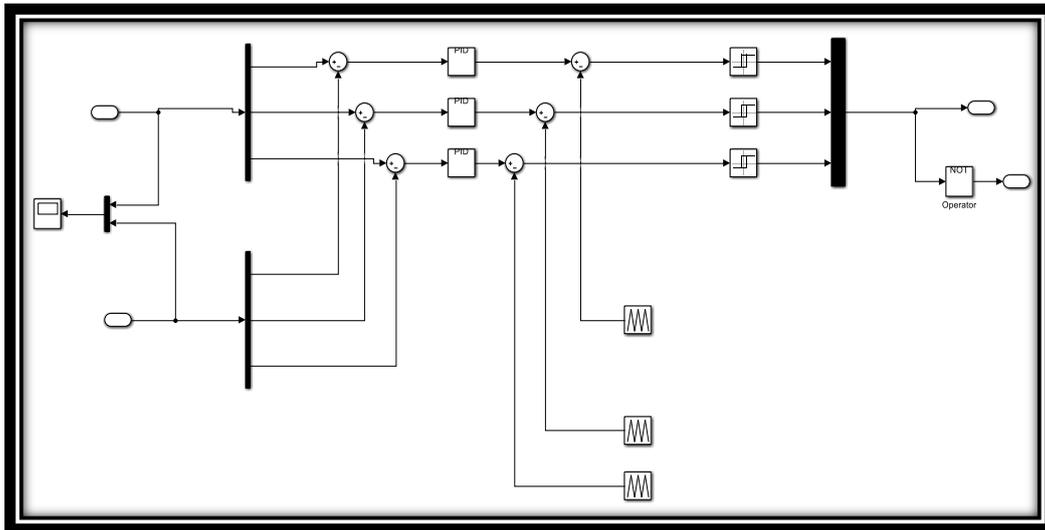


Figure IV- 8: Schéma de principe de la commande du FAP par MLI.

### IV.5.1.3 Régulateur PI de bus continu

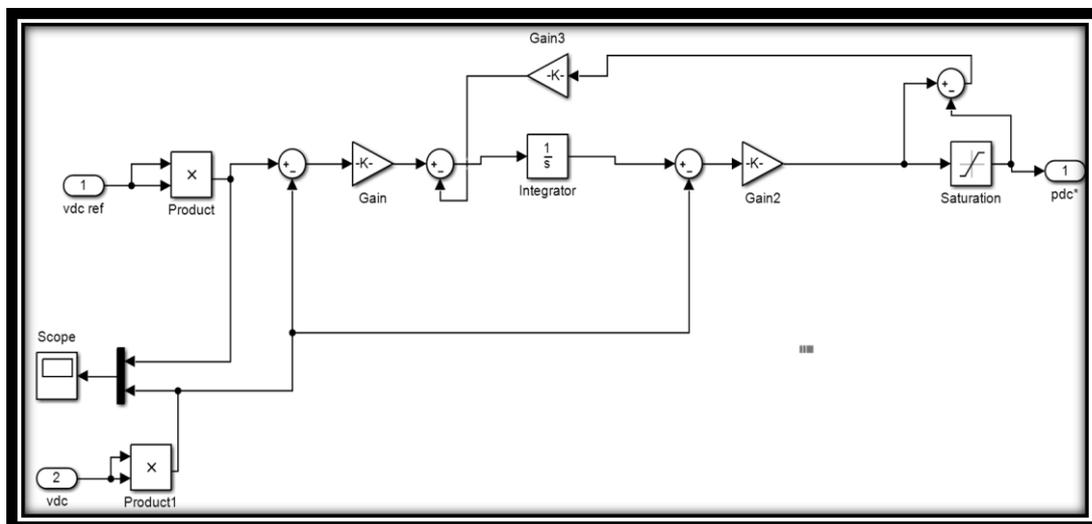


Figure IV- 9: Schémas de régulation de la tension du bus continu par un PI.

### IV.5.1.3 Résultats de simulation et interprétations

Dans cette partie, nous avons présenté les résultats de simulation obtenus pour un réseau triphasé à quatre fils équilibré et déséquilibré. Les résultats représentent la réponse du filtre actif commandé par MLI, dans le repère triphasé et basée sur la méthode de puissance instantané. Pour

étudier les performances du FAP, les figures (IV-8 à IV-17) schématisent les différentes formes d'onde avant et après la mise en service du FAP.

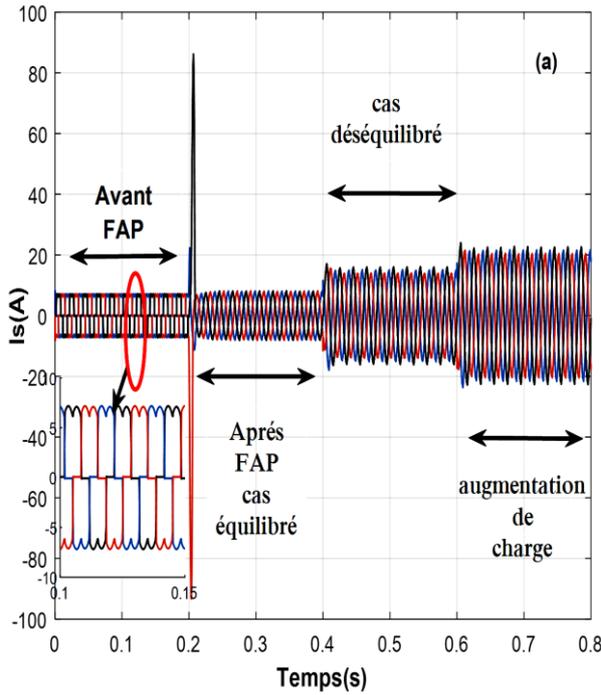


Figure IV- 10: Courant de source

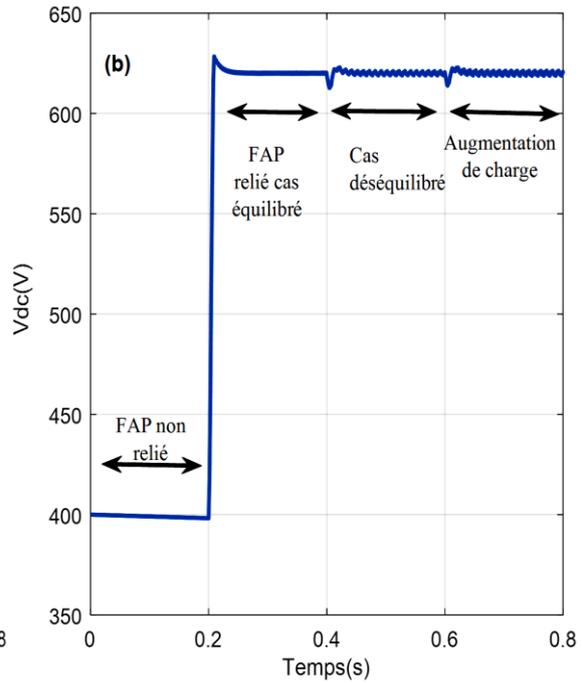


Figure IV- 11: Tension  $V_{dc}$  de bus continu

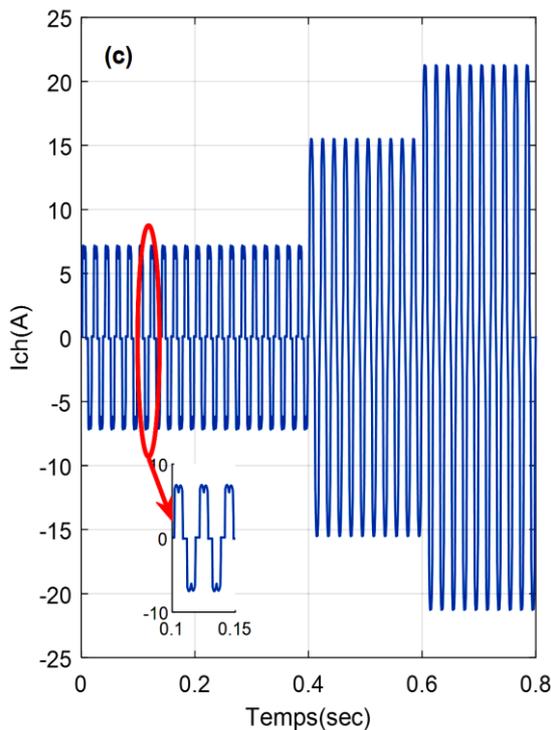


Figure IV- 12: Courant de charge

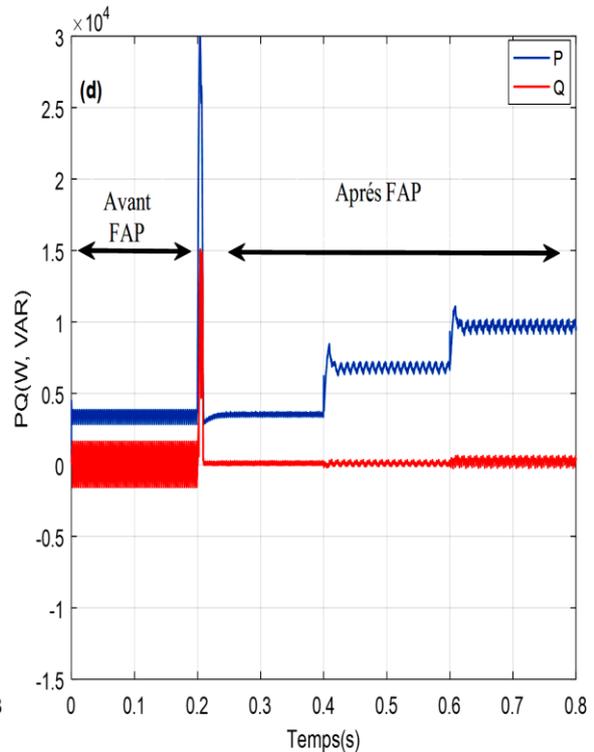


Figure IV- 13: Puissance active et réactive

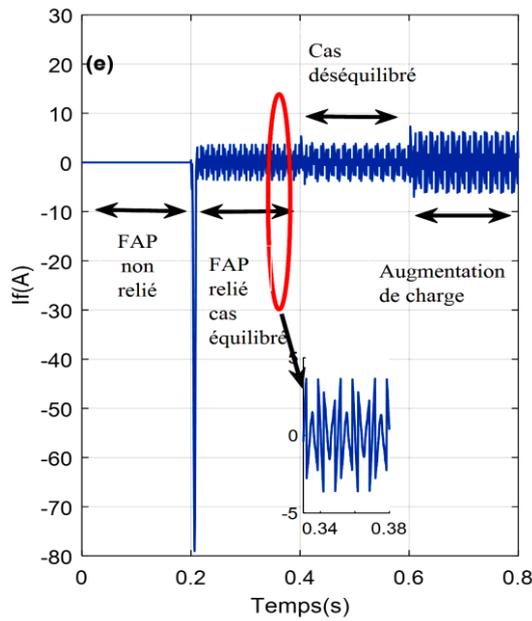


Figure IV-14: Courant de filtre

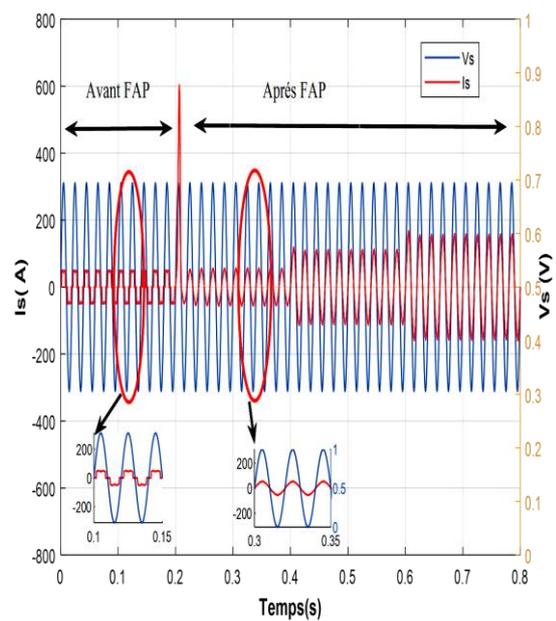


Figure IV-15: Courant et tension de source

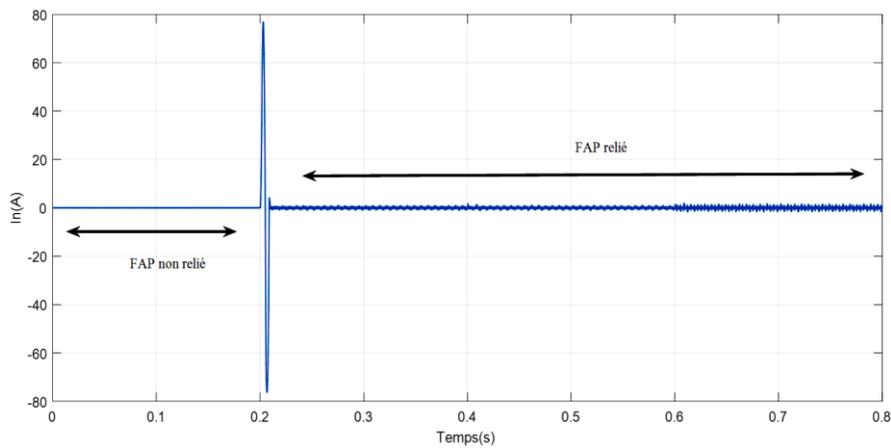


Figure IV-16: Courant du neutre avant et après le filtrage.

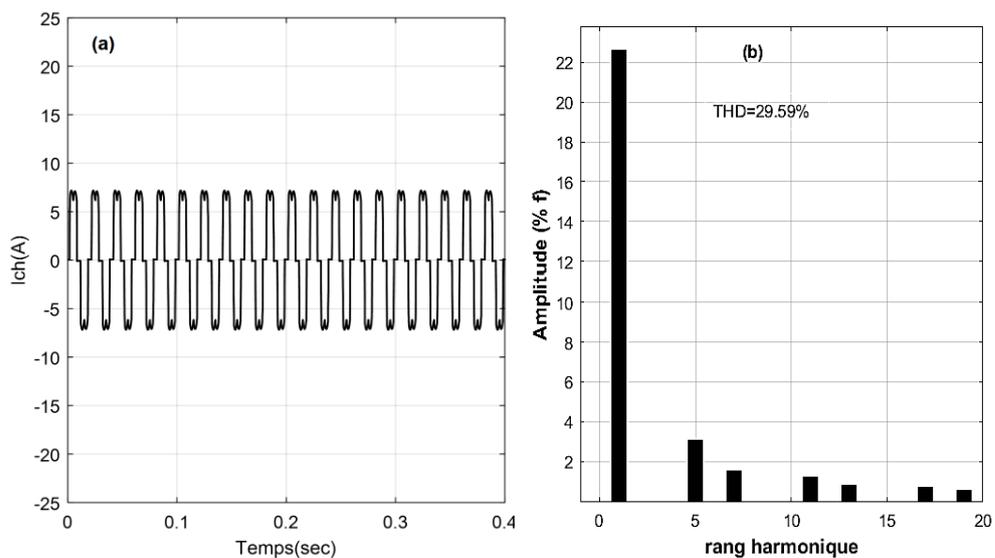


Figure IV-17: Courant de charge  $I_{ch}$ . a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique.

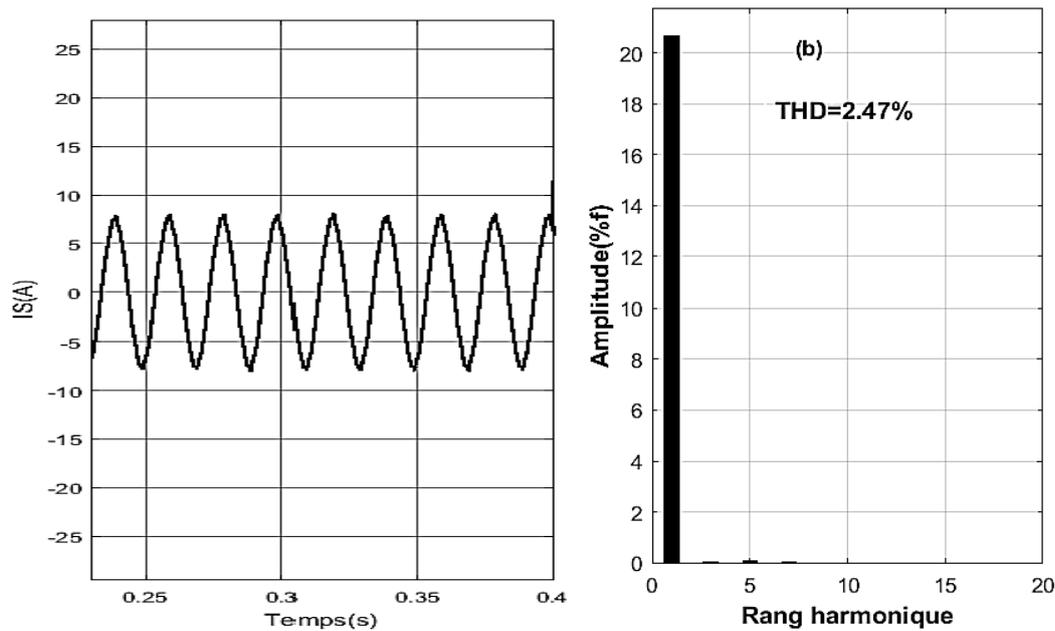


Figure IV- 18: Courant de source  $I_s$  après le filtrage. a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique sans déséquilibre.

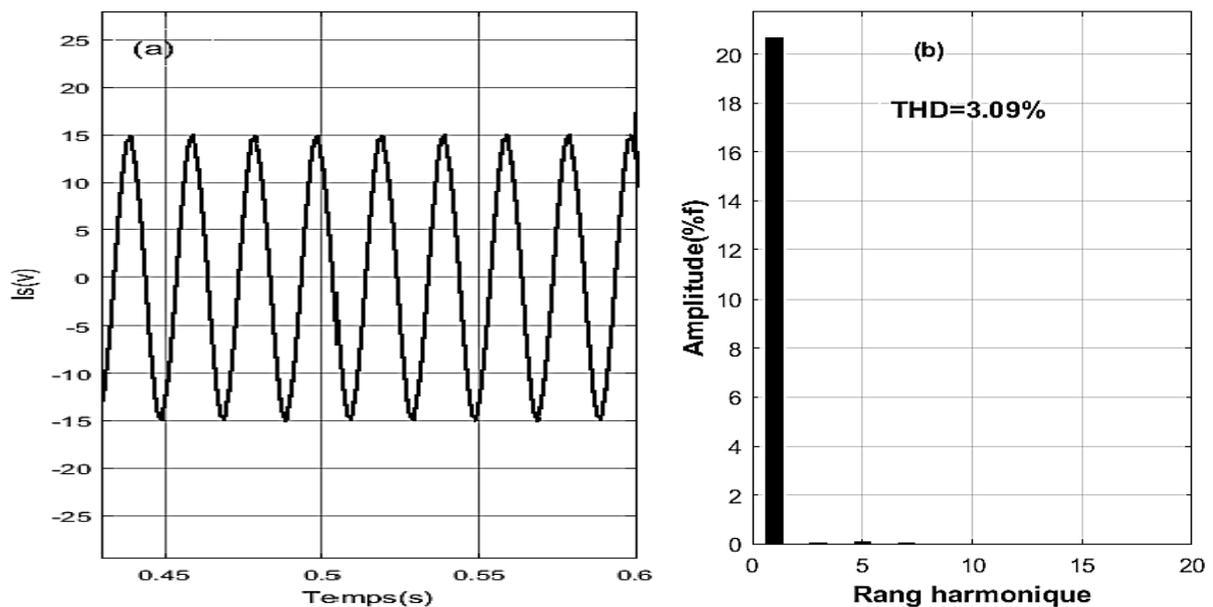


Figure IV- 19 : Courant de source  $I_s$  a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique avec déséquilibre.

#### ❖ Interprétations des résultats

D'après les résultats de simulation obtenus, nous observons clairement que notre objectif de simulation est bien vérifié. Les signaux des courants triphasés après filtrage sont équilibrés, quasiment sinusoïdaux et en phase avec la tension de source (ce qui permet la compensation de la puissance réactive). Le facteur de puissance est presque unitaire. De plus, Le contenu harmonique du courant de la source est considérablement réduit grâce à l'utilisation du filtre



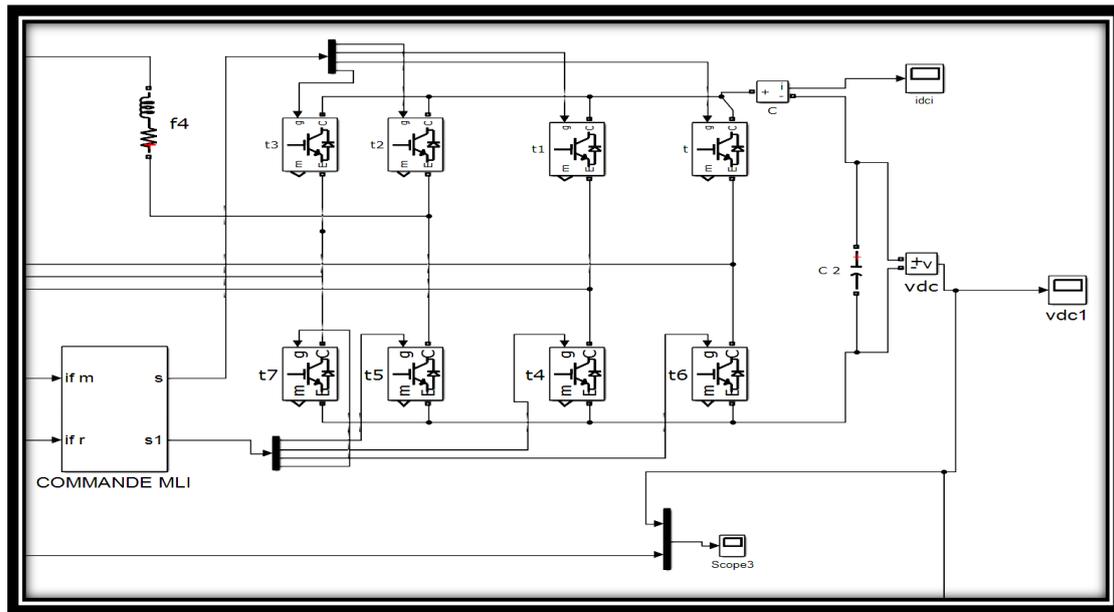


Figure IV- 21: Schéma de principe d'un onduleur à quatre bras sous Matlab/SimPowerSystems.

### IV.5.2.1 Résultats de simulation et interprétations

Les résultats de simulation avec la commande MLI lors d'un déséquilibre de la charge nous ont permis d'obtenir les résultats de simulation suivants, en conservant les mêmes conditions précédentes :

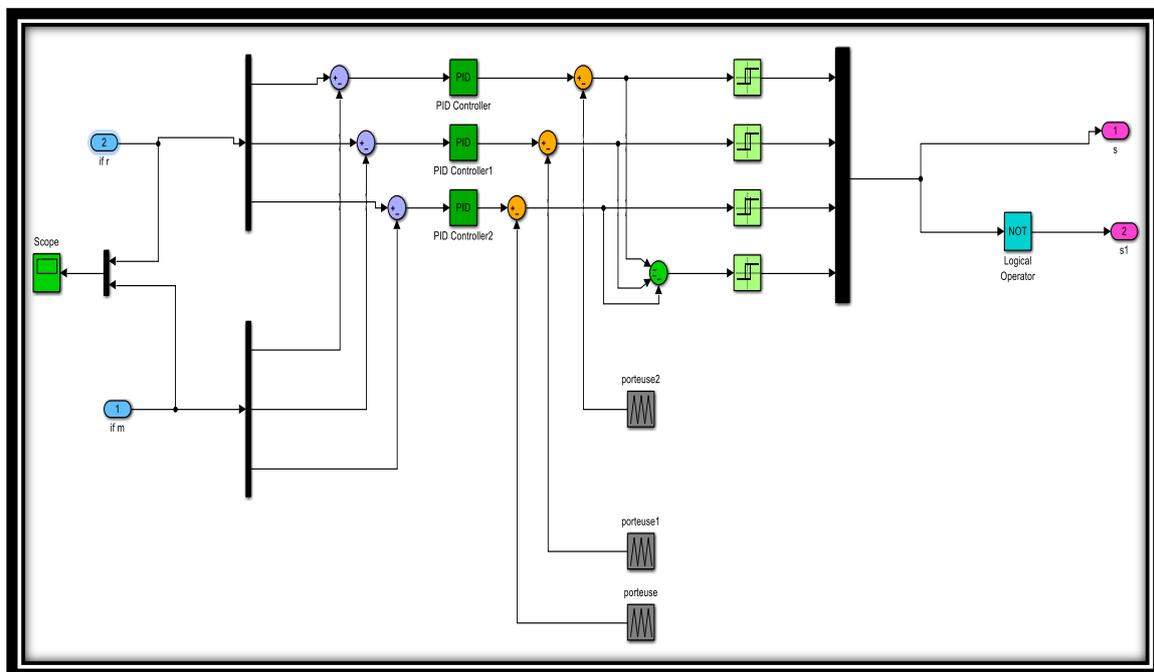


Figure IV- 22: Schéma de principe de la commande par MLI.

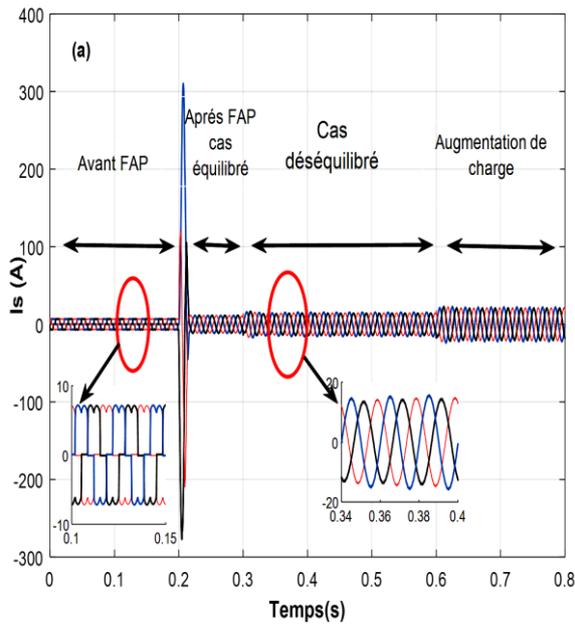


Figure IV- 23: Courant de source

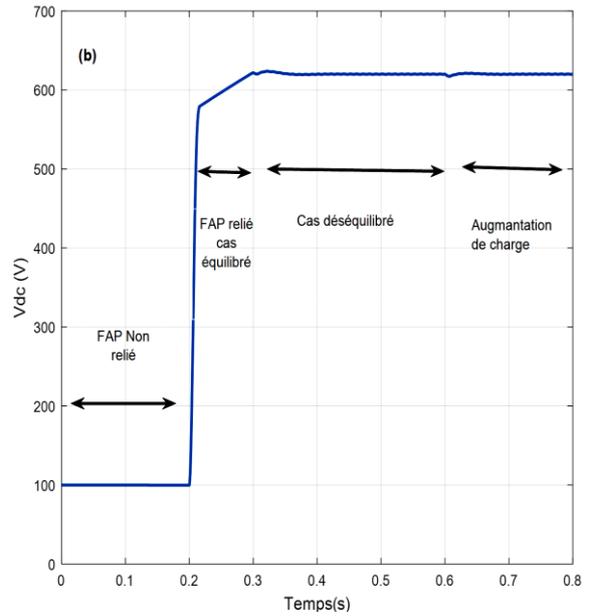


Figure IV- 24: Tension  $V_{dc}$  de bus continu

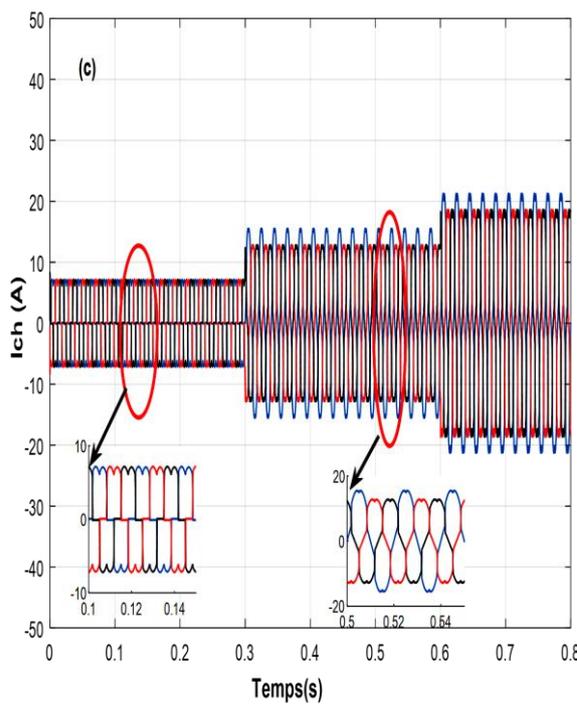


Figure IV- 25: Courant de charge

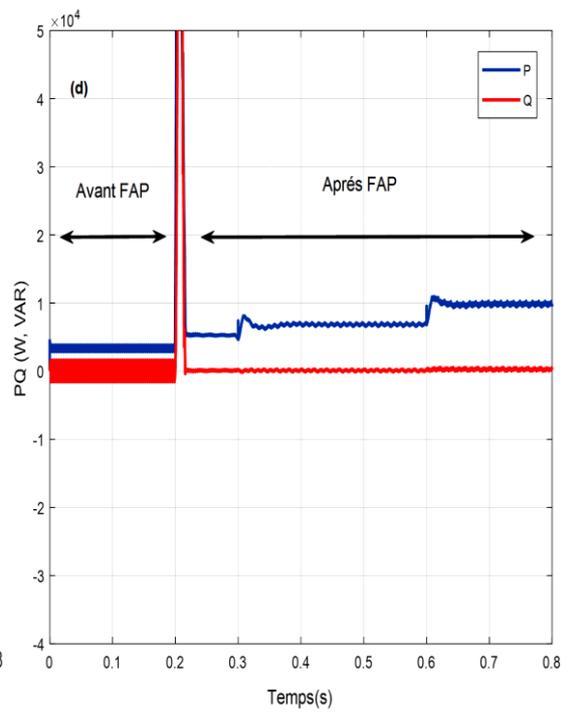


Figure IV- 26: puissance active et réactive

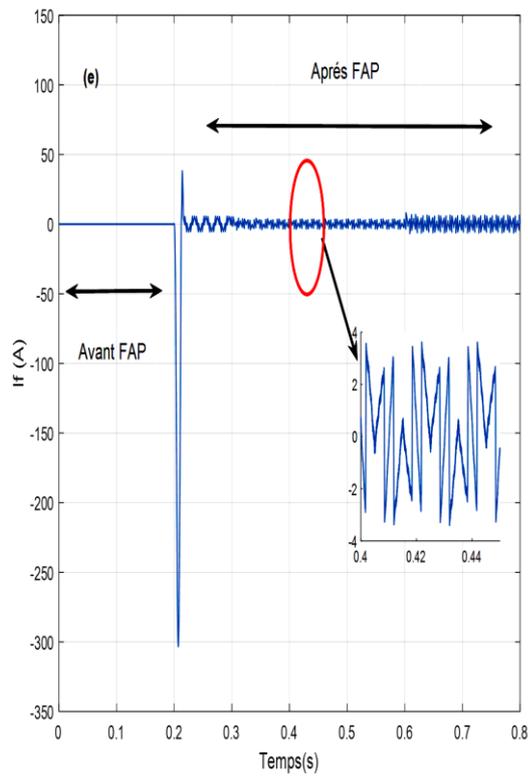


Figure IV- 27: Courant de filtre

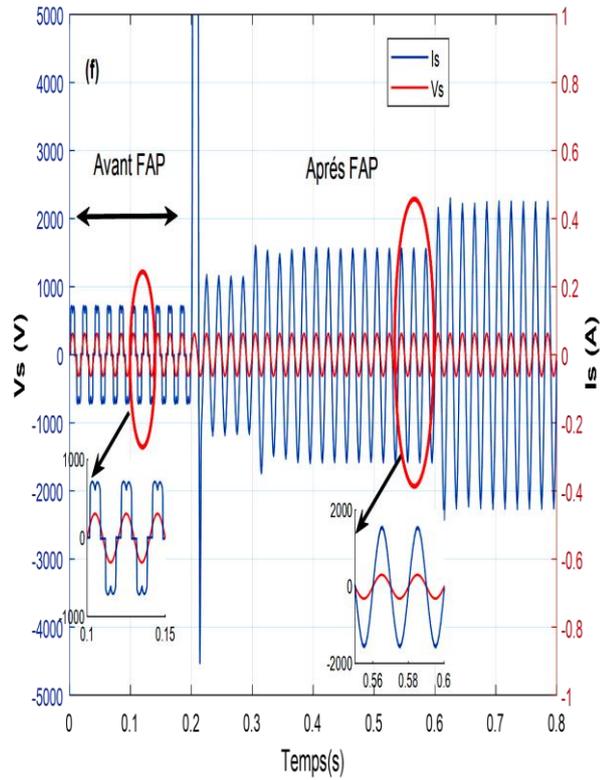


Figure IV- 28: Courant et tension de source

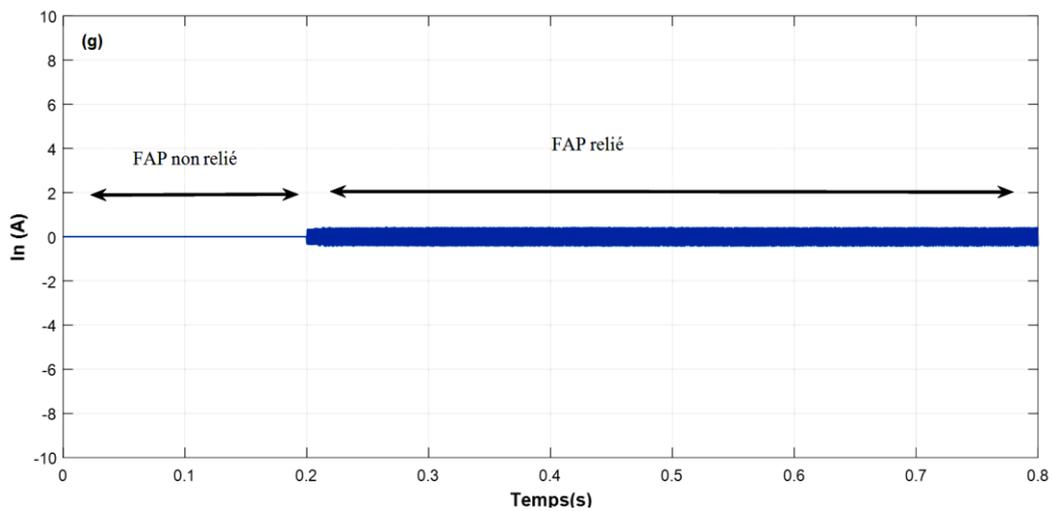


Figure IV- 29: Courant du neutre avant et après le filtrage

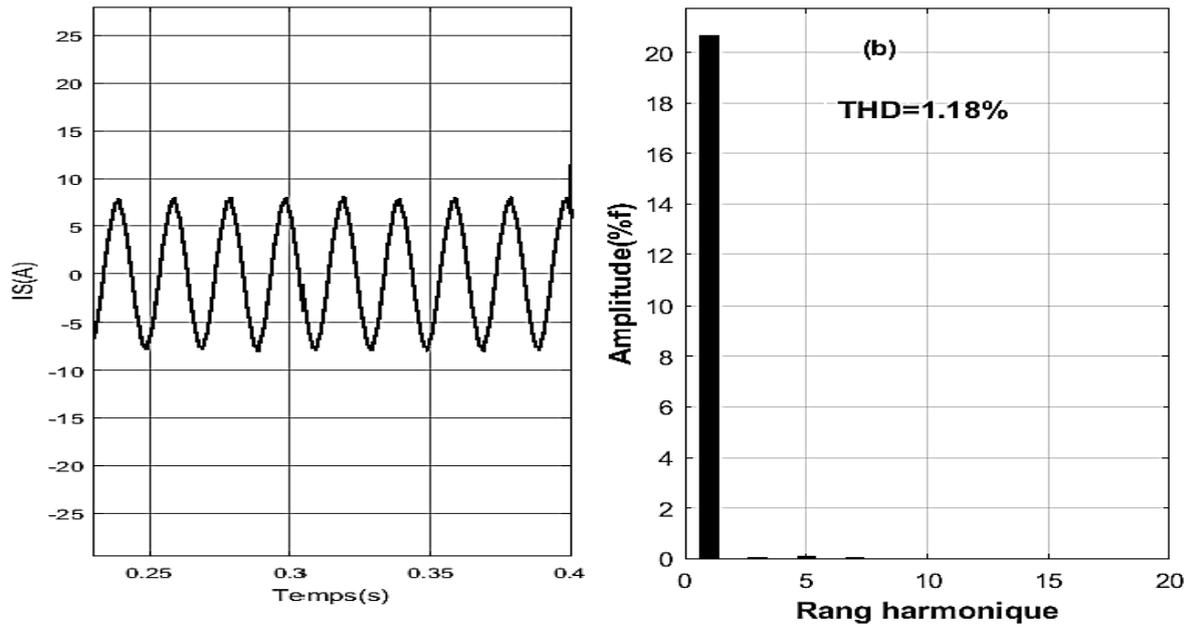


Figure IV- 30 : Courant de source  $I_s$ . a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique sans déséquilibre.

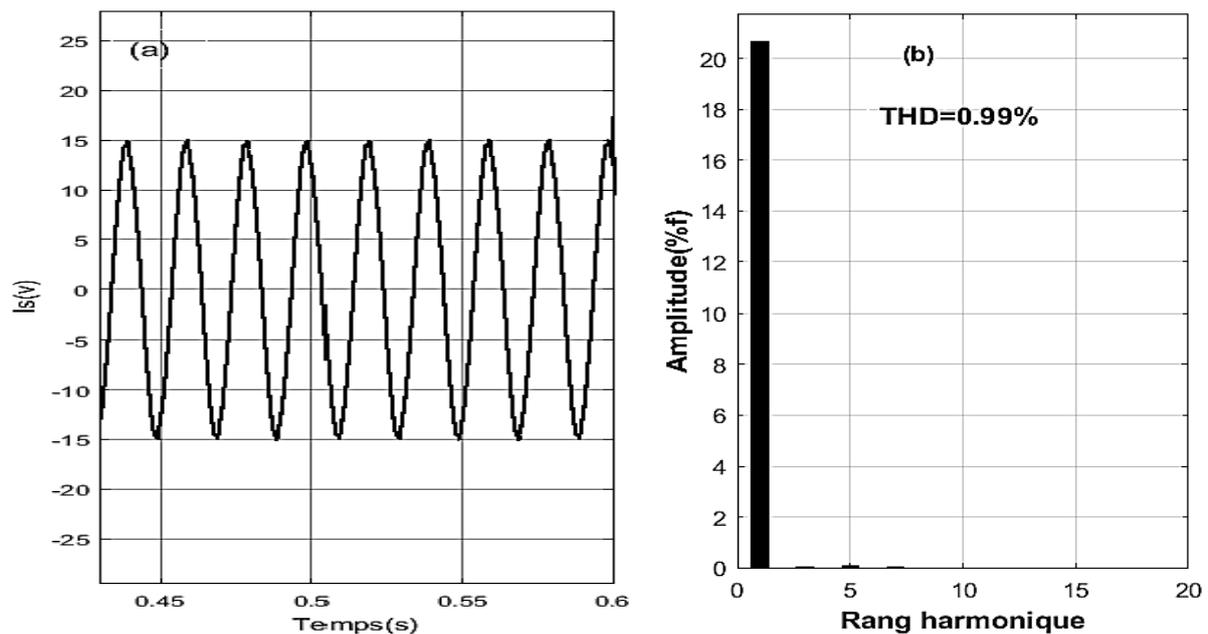


Figure IV- 31 : Courant de source  $I_s$ . a) Forme d'onde, b) Spectre d'harmonique avec déséquilibre.

### ❖ Interprétations des résultats

Après avoir obtenu les résultats des figures (IV-21 à IV-29), nous remarquons que les courants triphasés côté alimentation sont presque sinusoïdaux et en phase avec la tension d'alimentation ( $\cos \varphi=1$ ) dès que le FAP est mis en service à l'instant  $t=0.2s$ .

Afin d'évaluer les performances de la méthode d'extraction des courants de référence appliquée à notre système dans le cas déséquilibré, nous nous sommes intéressés aux caractéristiques de la FFT de notre courant de source après filtrage, pour les deux régimes équilibré et déséquilibré, ce qui donne respectivement  $THD = 1.18 \%$  et  $THD = 0.99 \%$ .

En ce qui concerne la régulation de la tension aux bornes du condensateur, notre système a présenté de bonnes performances puisqu'il a pu suivre la consigne souhaitée.

#### **IV.6 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté et commentée les résultats de simulation du FAP à quatre fils, qui montrent bien le bon fonctionnement, l'efficacité et la robustesse du FAP ainsi confirment la bonne réponse dynamique de la stratégie de commande appliquée (p-q). Dans les différents cas examinés, la topologie à quatre bras lorsqu'elle est utilisée dans un FAP donne des meilleurs résultats car l'onduleur à quatre bras pilote les trois courants de phase et celui du neutre.

*Chapitre V :*

---

*STATCOM : Structure, principe de  
fonctionnement, modélisation,  
Commande et simulation*

---

## **V.1 Introduction**

Les moyens classiques de contrôle où l'amélioration du comportement d'un réseaux électrique (transformateur à prises réglables en charge, transformateurs déphaseurs, compensateurs série ou parallèle commutés par disjoncteurs, modification des consignes de production, changement de topologie du réseau et action sur l'excitation des générateurs) pourraient dans l'avenir s'avérer trop lents et insuffisants pour répondre efficacement aux perturbations du réseau, compte tenu notamment des nouvelles contraintes [74].

Il faudra vraisemblablement, dans l'avenir, compléter leur action en mettant en œuvre des dispositifs électroniques de puissance à grande vitesse de réponse, récemment développés et connus sous l'appellation FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) pour le contrôle des réseaux. Le développement récent des dispositifs FACTS ouvre de nouvelles perspectives pour une exploitation plus efficace des réseaux par action continue et rapide sur les différents paramètres du réseau (déphasage, tension, impédance). Ainsi, les transits de puissance seront mieux contrôlés et les tensions mieux tenues, ce qui permettra d'augmenter les marges de stabilité ou de tendre vers les limites thermiques des lignes.

Le réseau électrique est exposé aux différentes perturbations telle que : l'augmentation de la charge, l'augmentation ou diminution de la tension,...

Le « STATCOM » est utilisé pour rendre l'équilibre de tension au réseau, où compenser la puissance réactive.

Dans ce chapitre, on va étudier le comportement dynamique du « STATCOM » via à vis des perturbations de tension et de puissance réactive .Le comportement du « STATCOM » sera vérifié par des simulations en utilisant MATLAB/SimPowerSystemes. Les simulations seront déroulées comme suit :

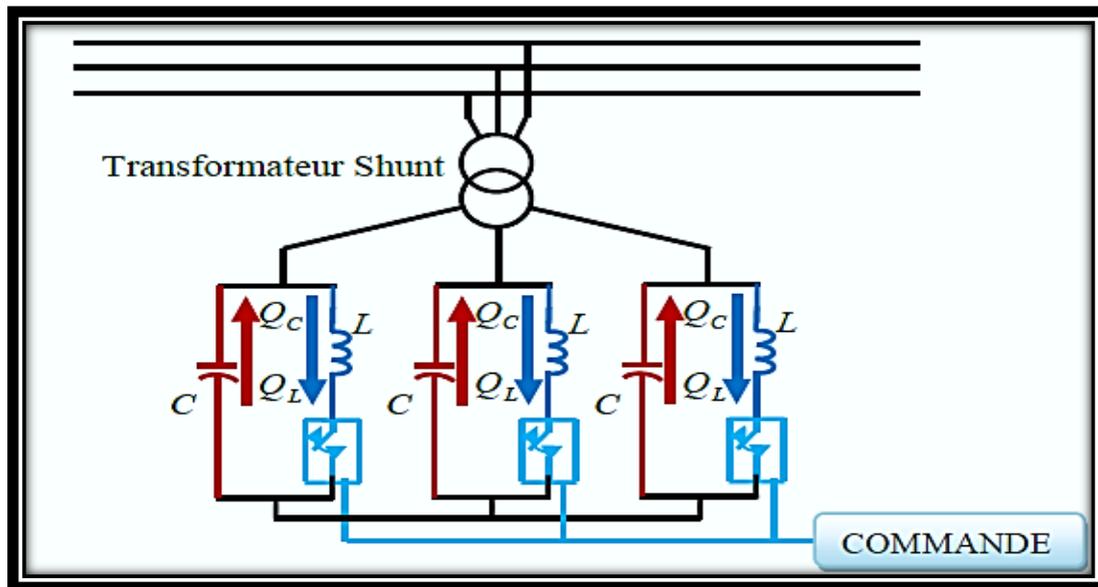
- Fonctionnement du STATCOM en mode flottant ;
- Fonctionnement du STATCOM en mode capacitif ;
- Fonctionnement du STATCOM en mode inductif

## **V .2 Les systèmes de transmission flexibles en courant**

Avec le développement rapide de l'électronique de puissance, les Systèmes Flexibles de Transport AC ont été créés et implémentés dans les réseaux électriques [75, 76]. Les FACTS peuvent être utilisés pour contrôler l'écoulement de puissance et améliorer la stabilité du système. Particulièrement, avec le nouveau système de dérégulation du marché de l'énergie, il y a une augmentation de l'intérêt accordé aux FACTS dans l'exploitation et le contrôle des

réseaux électriques et ceci est dû aux nouvelles contraintes de charge et aux nouvelles contingences.

L'installation des FACTS est devenue indispensable pour augmenter la capacité et la contrôlabilité d'un réseau électrique.



*Figure V-1 : Schéma de principe d'un FACTS [74].*

### **V .2.1 Définition**

Les systèmes de dispositifs FACTS sont employés pour le contrôle dynamique de tension, impédance et angle de phase de tension afin d'améliorer le comportement dynamique des réseaux ainsi que la répartition et l'écoulement des puissances dans les réseaux. Selon **IEEE**, les FACTS, sont définis comme suit [77] :

Ce sont des systèmes à courant alternatif incorporant des éléments d'électronique de puissance et d'autres contrôleurs statiques pour l'amélioration de la contrôlabilité et la capacité du transit de la puissance.

### **V .2.2 Différents types des systèmes FACTS**

La technologie FACTS n'est pas limitée par un seul dispositif mais elle regroupe une collection de dispositifs à base de l'électronique de puissance implantés dans les réseaux électriques afin de mieux contrôler le flux de puissance et augmenter la capacité de transit de leurs lignes. Par action de contrôle rapide de ces systèmes sur l'ensemble de paramètres du réseau: tension, impédance, déphasage ...etc. Ils permettent d'améliorer les marges de stabilité et assurer une meilleure flexibilité du transfert d'énergie. La figure (V -2) représente la classification des dispositifs de compensation FACTS [78].

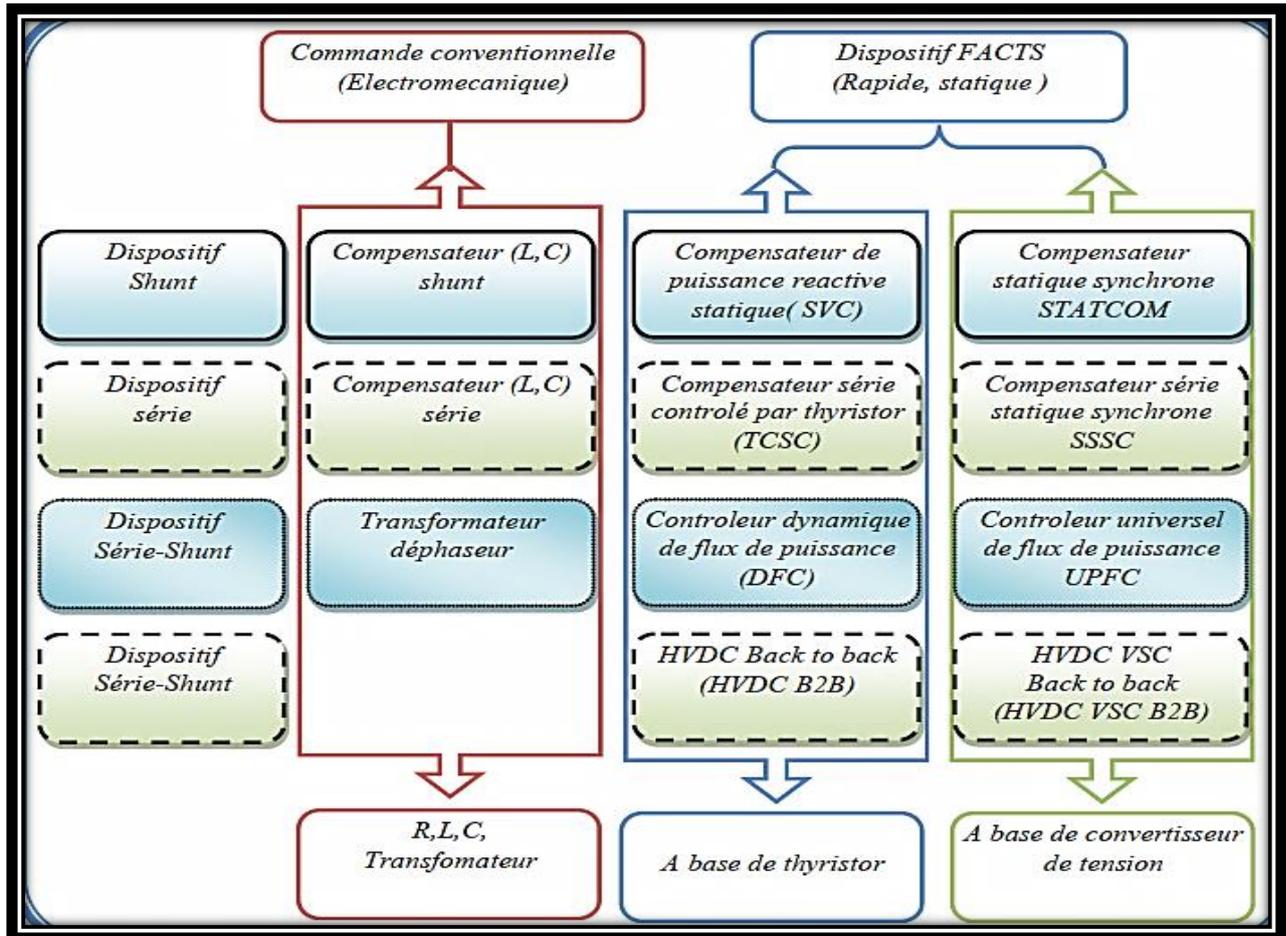


Figure V- 2: Classification des dispositifs de compensation FACTS [74].

### V .2.3 Avantages de la technologie des dispositifs FACTS

Les avantages des dispositifs FACTS sont [78] :

- Contrôle de l'écoulement de puissance : c'est la fonction principale des FACTS. L'utilisation du contrôle de l'écoulement de puissance peut satisfaire les demandes de charge, atteindre un fonctionnement optimal, et surmonter les conditions d'urgence.
- Amélioration de la stabilité dynamique. Cette fonction supplémentaire des FACTS comprend l'amélioration de la stabilité transitoire, l'amortissement des oscillations de puissance et le contrôle de stabilité de la tension.
- Augmenter la capacité de transport de lignes à leurs capacités thermiques, y compris les demandes à court terme et saisonnière.
- Fournir des connections sécurisées entre les compagnies de production et les régions par la diminution de la réserve de la puissance à générer requise par les deux zones.
- Réduction de l'écoulement de la puissance réactive, ce qui permettra ainsi à la ligne de transporter plus de puissance active.

- Contrôle de la boucle de l'écoulement de puissance

### V.3 Structure des Principaux Dispositifs FACTS

#### V.3.1 Dispositifs de compensation dynamique shunts

Vers la fin des années 60 plusieurs équipements utilisant l'électronique de puissance ont fait leurs apparitions. Ces derniers avaient l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court. Ces équipements étaient constitués essentiellement d'une inductance en série avec un gradateur. Le retard à l'amorçage des thyristors permet de régler l'énergie réactive absorbée par le dispositif [79].

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 réactive qui transitent dans la ligne.

##### V.3.1.1 Compensateur statique de puissance réactive (SVC)

###### V.3.1.1.1 Définition

Compensateur statique de puissance réactive (SVC) est un dispositif de compensation shunts de la famille flexible de systèmes de transmission à courant alternatif (FACTS). Il peut fournir en continu la puissance réactive nécessaire pour contrôler les fluctuations dynamiques de la tension sous différents régimes de fonctionnement et ainsi améliorer les performances de réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. L'installation de SVC en un ou plusieurs points spécifiques du réseau peut accroître la capacité de transit et réduire les pertes tout en maintenant un profil de tension régulier sous différents régimes. De surcroît, un compensateur statique sa puissance réactive peut atténuer les oscillations des amplitudes de tension[80, 81].

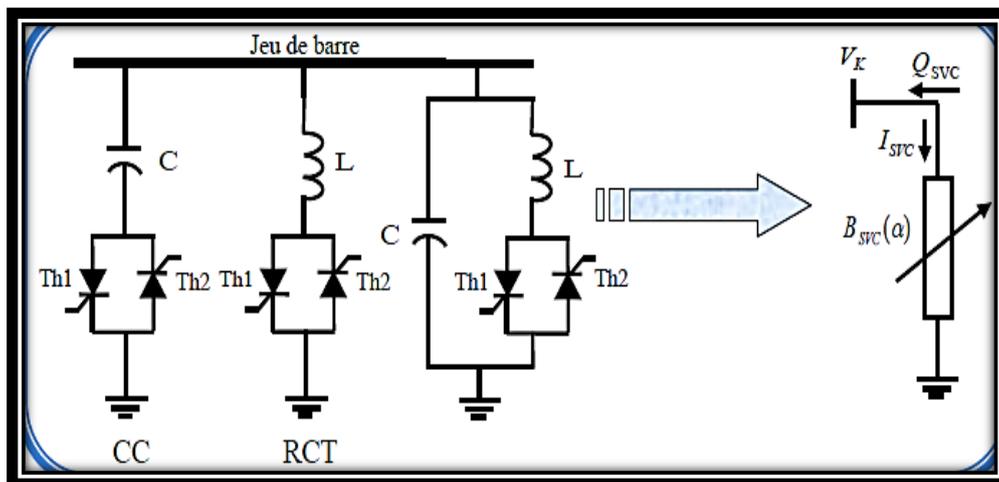


Figure V- 3: Modèle mathématique de SVC [74].

### **V.3.1.1.2 Principe de fonctionnement**

La figure V-3 donne une représentation schématique monophasée d'un compensateur statique. Il est composé d'un condensateur avec une réactance capacitive  $X_C$  et d'une bobine d'inductance avec la réactance  $X_L$ . Ce système utilise l'angle d'amorçage  $\alpha$  des thyristors pour contrôler le courant dans la réactance alors que le contrôle de la puissance réactive par cette méthode est rapide et d'une façon continue. Le RCT ne peut absorber que de l'énergie réactive, puisque il est constitué d'éléments inductifs. C'est pour cela que l'on associe ses dispositifs avec des bancs de condensateur commandé par thyristor (CCT) qui fournit de l'énergie réactive au réseau. Des thyristors fonctionnent cette fois en pleine conduction (une période complète de la pulsation du réseau). Le réglage de l'énergie absorbée par RCT, le bilan global est la somme de deux énergies [74].

Ce dispositif est associé à des filtres LC accordés pour éliminer les harmoniques de ces dispositifs RCT, CCT, bancs des capacités fixes et filtres d'harmoniques constitue le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC dont le premier dispositif a été installé en 1979 en Afrique du Sud.

### **V.3.1.2 STATCOM (Static Compensator)**

#### **V.3.1.2.1 Définition**

Le STATCOM (Statique Compensateur) a connu jusqu'à maintenant différentes appellations, CSERA (Compensateur statique d'énergie réactive de type avancé). ASVC (Advanced Static Var Compensator). SVG (Static Var Generator) et STATCON (Static Condenser) [74].

Un STATCOM est un système d'électronique de puissance connecté en parallèle, qui injecte dans le réseau un courant alternatif contrôlé en phase et en amplitude. Leur topologie est basée sur des convertisseurs de tension. Le schéma de STATCOM est donné par la figure (V-4).

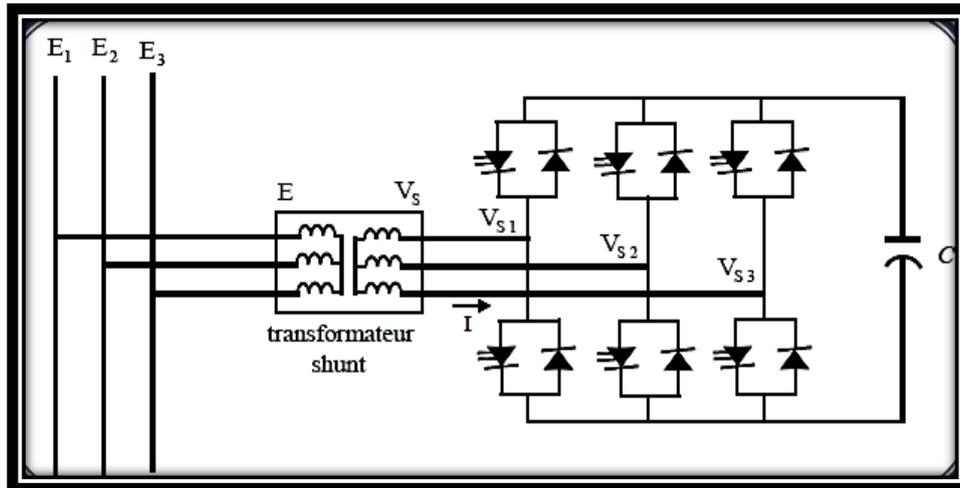


Figure V- 4: Schéma de base du STATCOM [74].

### V.3.1.2.2 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de STATCOM est similaire à celui du compensateur synchrone. Les tensions de sortie sont générées par un onduleur au lieu d'avoir été créées par un groupe tournant.

Ce principe a pu être mis en œuvre grâce à l'évolution des composants de l'électronique de puissance, et surtout grâce à l'apparition des GTO de forte puissance. Les cellules de commutation sont bidirectionnelles, c'est à dire formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger l'énergie réactive avec le réseau électrique. [79, 82, 83] L'échange d'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur  $V_s$ , laquelle est en phase avec la tension du réseau  $E$ .

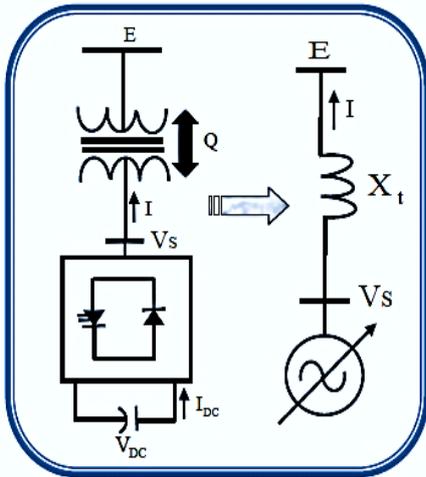


Figure V- 5 : Présentation d'un compensateur

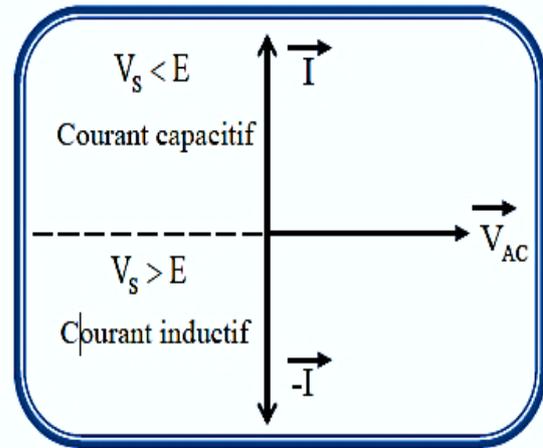


Figure V- 6 : Présentation d'un compensateur

Le fonctionnement peut être décrit de façon suivante :

- ❖ Si  $V_s < E$  le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $\frac{+\pi}{2}$  par rapport à la tension  $E$  ou le courant est capacitif.
- ❖ Si  $V_s > E$  le courant circulant dans l'inductance est déphasé de  $\frac{-\pi}{2}$  par rapport à la tension  $E$  ou le courant est inductif.
- ❖ Si  $V_s = E$  le courant circulant dans l'inductance est nul, il n'y a pas d'échange d'énergie. On considère dans ce fonctionnement que les tensions sont triphasées et équilibrées. Par ailleurs, l'amplitude de la tension de sortie  $V_s$  est proportionnelle à la tension continue aux bornes du condensateur.

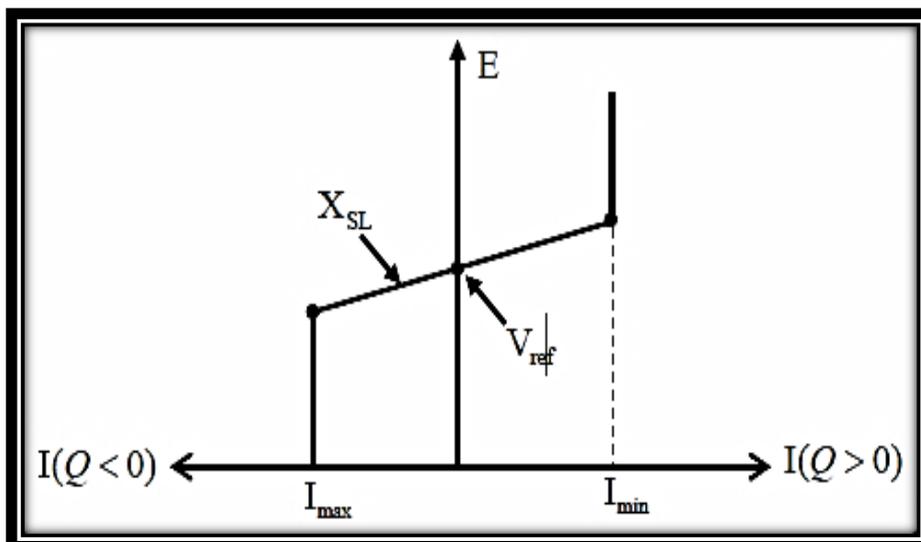


Figure V- 7: Caractéristique statique du STATCOM [74].

Le STATCOM présente plusieurs avantages [74] :

- ✓ Bonne réponse à faible tension : le STATCOM est capable de fournir son courant nominal, même lorsque la tension est presque nulle.
- ✓ Bonne réponse dynamique : Le système répond instantanément.
- ✓ L'étendue de la plage de l'opération est plus large qu'avec un SVC classique.
- ✓ Pour un contrôle optimal de la tension, les phases sont contrôlées séparément pendant les perturbations du système.
- ✓ Un design modulaire du convertisseur permet une adaptation pour une grande plage de puissances nominales.

### **V.3.2 Dispositifs de compensation dynamique série**

Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductive, capacitive) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport en insérant des éléments en série avec celles-ci.

#### **V.3.2.1 Commande de Condensateur série par thyristor (TCSC)**

##### **V.3.2.1.1 Définition**

Commande de Condensateur série par thyristor (TCSC: Thyristors Controller Séries Compensator) est un dispositif de compensation série, elle utilise l'électronique de puissance comme élément de base. Elle connecte en série avec le réseau pour contrôler le transit de puissance, l'amortissement de résonance synchrones et des oscillations de puissance. Ce type de compensateur est apparu au milieu des années 80 [84].

##### **V.3.2.1.2 Principe de fonctionnement**

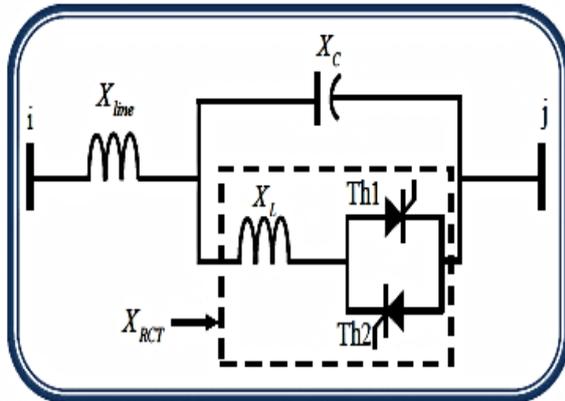
Le TCSC est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur. Le TCSC est inséré sur la ligne de transmission (Figure V-8).

Où

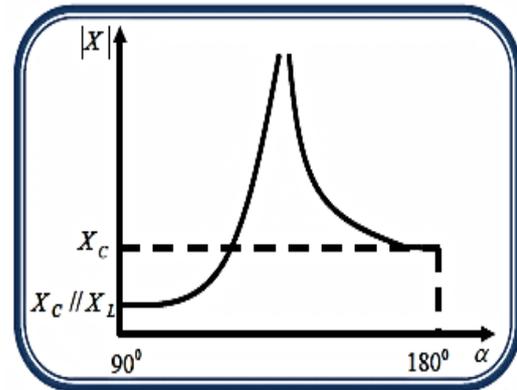
$X_c$  : Impédance du condensateur du TCSC.

$X_L$  : Impédance de l'inductance du TCSC.

$X_{line}$  : Impédance de la ligne.



**Figure V- 8:** Insertion d'un TCSC sur une ligne



**Figure V- 9:** Impédance du TCSC en fonction de l'angle

A la réactance variable tel qu'un RCT (Réactances Commandées par Thyristor) et relié à travers un condensateur en série. Quand l'angle d'amorçage de RCT est de 180 degrés, le réacteur devient non conduisant et le condensateur en série à sa impédance normale. Pendant que l'angle est avancé de 180 degrés, l'impédance capacitive augmentée. A l'autre extrémité, quand l'angle d'amorçage de RCT est de 90 degrés, le réacteur devient entièrement conduisant, et toute impédance devienne inductive, par ce que l'impédance du réacteur est conçue pour être beaucoup inférieure au condensateur en série impédance. Avec 90 degré, le TCSC aide en limitant le courant de défaut.

Quand l'angle d'amorçage du RCT est de 180 degrés, lui des arrêts conduisant, et les actes non contrôlés du réacteur comme limiteur de courant de défaut.

Le dispositif peut opérer en trois modes différents :

- Mode hors circuit : les thyristors sont en pleine conduction.
- Mode bloqué : les thyristors sont bloqués.
- Mode variable : la conduction des thyristors est contrôlée par un signal d'amorçage et donc le TCSC à une réactance contrôlables dans les régions inductives et capacitives.

Ce dernier cas a un grand intérêt. Les angles d'amorçage des thyristors peuvent changer de 90° jusqu'à une valeur maximale dans une plage de fonctionnement inductif et de fonctionnement capacitif.

Les principaux avantages de l'insertion de TCSC dans un réseau électrique sont :

- ◆ Compensation du déséquilibre des courants de charge.
- ◆ Amélioration de la stabilité dynamique, par l'amortissement des oscillations de puissance et de la stabilité de tension.
- ◆ Réduction des risques de résonance hypo-synchrone.

### V.3.2.2 Compensateur statique série synchrone (SSSC)

#### V.3.2.2.1 Définition

Le SSSC est un système d'électronique de puissance connecté en série qui injecte une tension en série avec la ligne de transmission à travers un transformateur série. Le SSSC, a une fonction comparable au TCSC [82, 84]. Mais contrairement à ce dernier qui présente une zone morte à la résonance parallèle, le réglage est continu. De plus, l'introduction d'un stockage d'énergie est possible du fait de la structure des convertisseurs de tension (VSC).

#### V.3.2.2.2 Principe de compensation par SSSC

Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur (Figure V-10).

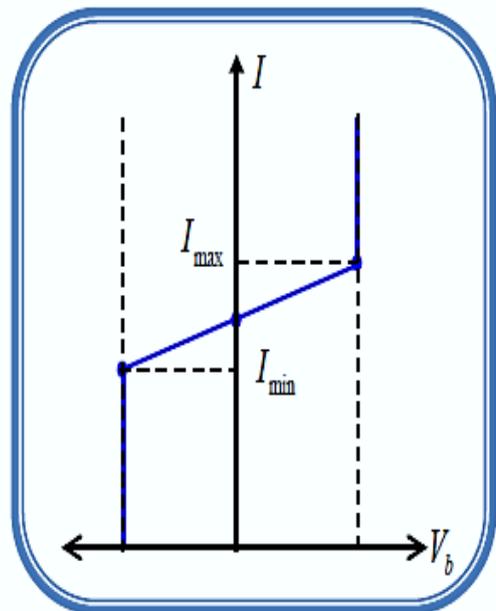
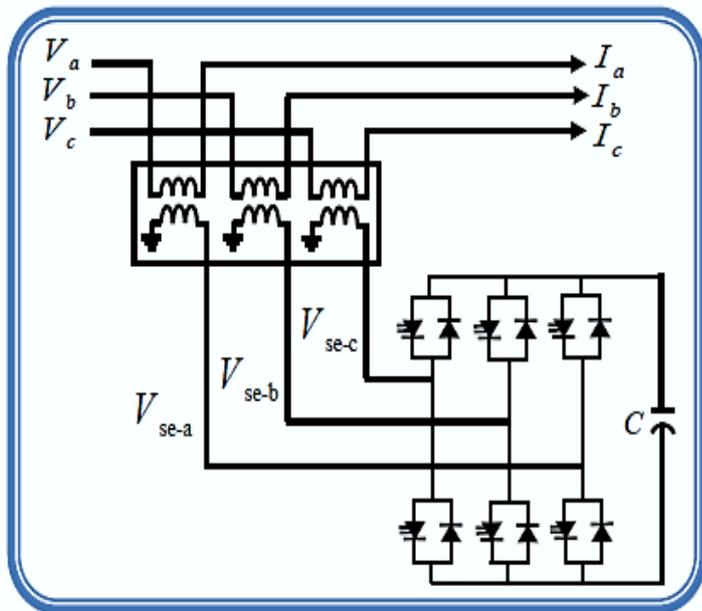


Figure V- 10: Schéma de base du SSSC

Figure V- 11: Statique du SSSC

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de ligne.

Nous pouvons, dans ce cas, régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne. L'avantage de ce compensateur est de ne pas introduire physiquement un condensateur ou une inductance, mais de simuler leurs fonctions. Cela évite l'apparition des oscillations dues à la résonance avec les éléments inductifs du réseau.

La caractéristique statique d'un Compensateur Synchrone Statique Série est donnée sur la figure (V-11).

## V.4 Dispositifs de compensation dynamique hybrides "série - parallèle "

### V.4.1 Compensateur universel

#### V.4.1.1 Définition

L'UPFC (Unified Power Flow Contrôler), appelé aussi Déphaseur Régulateur Universel (DRU) ou variateur de charge universel, est l'un des plus performants des composants FACTS [74]. Il est capable de contrôler, simultanément et indépendamment, la puissance active et la puissance réactive de la ligne. L'originalité de ce compensateur est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique : la tension, l'impédance de la ligne, le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne.

En principe, l'UPFC est capable d'accomplir les fonctions des autres dispositifs FACTS à savoir le réglage de la tension, la répartition de flux d'énergie, l'amélioration de la stabilité et l'atténuation des oscillations de puissance.

#### V.4.1.2 Principe de fonctionnement

Le dispositif UPFC est constitué de deux onduleurs triphasés de tension à thyristors GTO, l'un connecté en parallèle au réseau par l'intermédiaire d'un transformateur triphasé, l'autre connecté en série avec le réseau via trois transformateurs monophasés dont les primaires sont reliés, entre eux, en étoile [85].

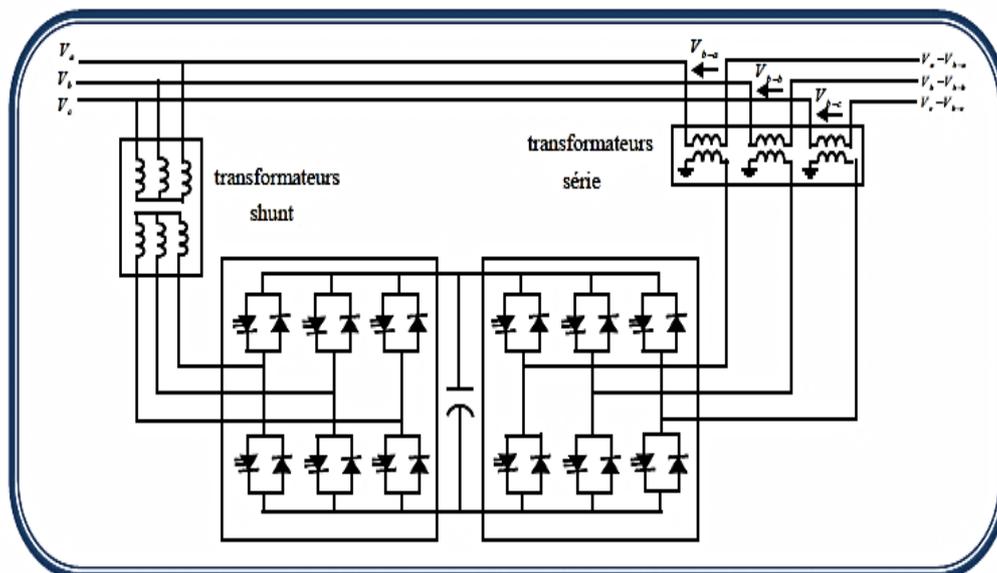


Figure V- 12: Schéma simplifié d'un UPFC connecté au réseau électrique

Les deux onduleurs sont interconnectés par un bus continu et par un condensateur de filtrage comme indiqué sur la Figure (V-12).

L'onduleur série injecte une tension à la même fréquence que celle du réseau et dont l'amplitude et la phase est ajustable. Ce réglage d'amplitude et de phase permet d'obtenir trois modes de fonctionnement de la partie série :

- Contrôle de tension : la tension injectée est en phase avec celle du coté shunt.
- Contrôle de l'impédance de ligne : la tension injectée est en quadrature avec le courant de ligne. Ce mode permet de faire varier l'impédance de la ligne comme un compensateur série.
- Contrôle de phase : l'amplitude et la phase de la tension injectée sont calculées de manière à obtenir le même module de la tension avant et après l'UPFC.

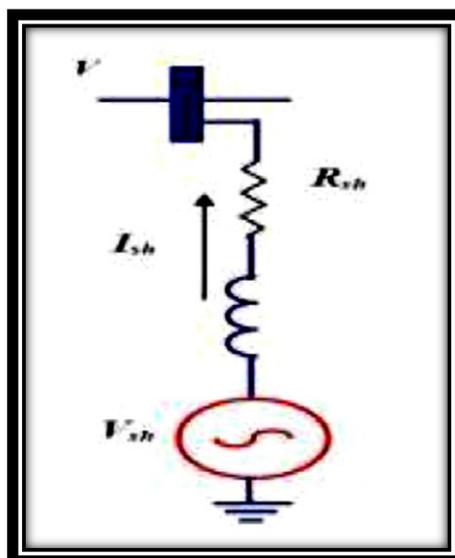
Le but principal de ces trois modes de fonctionnement est le contrôle des puissances actives et réactive qui transitent dans la ligne. De plus, l'UPFC est capable de combiner les différentes compensations et de basculer d'un mode de fonctionnement à un autre.

La partie shunt peut être utilisée afin de compenser la puissance réactive pour le maintien du plan de la tension au nœud S et éventuellement fournir de la puissance active injectée dans le réseau par la partie série.

## **V.5 Modélisation du STATCOM**

### **V.5.1 Modèle Mathématique Simplifié**

Le STATCOM comme il était déjà décrit précédemment, peut être représenté par le schéma équivalent qu'on reproduit sur la figure (V-13) en tenant compte uniquement du jeu [2].



*Figure V- 13: Schéma équivalent d'un STATCOM connecté au réseau [2].*

Pour le modèle simplifié du STATCOM on suppose que le circuit continu consiste en une source de tension constante, et le circuit DC ne sera pas inclus dans ce modèle. Le schéma

équivalent de ce dispositif est donc une source de tension sinusoïdale connectée à un nœud du réseau par l'inductance  $L_{sh}$  figure (V-13) 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.

Le courant du STATCOM dépend de la différence entre la tension du système  $V$  (tension au nœud) et la tension ajustable du STATCOM.

On appliquant la loi d'ohm on a :

$$\bar{V} - \bar{V}_{sh} = R_{sh}\bar{I}_{sh} + L_{sh} \frac{d\bar{I}_{sh}}{dt} \quad (V-1)$$

Où les grandeurs en triphasé sont :

$$\bar{V} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}; \bar{V}_{sh} = \begin{bmatrix} V_{ash} \\ V_{bsh} \\ V_{csh} \end{bmatrix} \text{ et } \bar{I}_{sh} = \begin{bmatrix} I_{ash} \\ I_{bsh} \\ I_{csh} \end{bmatrix} \quad (V-2)$$

Pour simplifier ces équations on passe au repère orthogonal fixe ( $\alpha, \beta$ ) on multipliant l'équation (V-1) par la matrice de la transformation de Clarke suivante:

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

On passe au repère tournant (d, q), le référentiel du synchronisme, en multipliant tous les grandeurs par le phaseur  $-j\gamma$  avec  $\frac{d\gamma}{dt} = \omega$  la pulsation des grandeurs en question voir la figure (V-14).

Donc :

$$\bar{U}_{(d,q)} = \bar{U}_{(\alpha,\beta)} \cdot e^{-j\gamma} \quad (V-4)$$

Et inversement :

$$\bar{U}_{(\alpha,\beta)} = \bar{U}_{(d,q)} \cdot e^{-j\gamma} \quad (V-5)$$

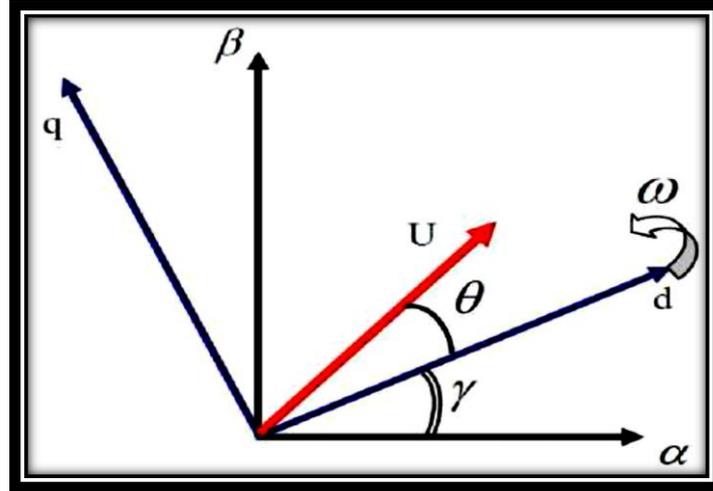


Figure V- 14: Passage du repère  $(\alpha, \beta)$  vers le repère  $(d, q)$  [2].

En appliquant cette écriture sur l'équation (V-1) on aura:

$$\bar{V}^{(d,q)} \cdot e^{-j\gamma} - \bar{V}_{sh}^{(d,q)} \cdot e^{-j\gamma} = R_{sh} \bar{I}^{(d,q)} \cdot e^{-j\gamma} + L_{sh} \frac{d}{dt} (\bar{I}^{(d,q)} \cdot e^{-j\gamma}) \quad (V-6)$$

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

$$V_d - V_{shd} = R_{sh} I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (V-7)$$

$$V_q - V_{shq} = R_{sh} I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (V-8)$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} & \omega \\ -\omega & \frac{-R_{sh}}{L_{sh}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shq} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_{sh}} \cdot \begin{bmatrix} V_d & -V_{shd} \\ V_q & -V_{shq} \end{bmatrix} \quad (V-9)$$

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

### V.5.2 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 petites échanges de l'énergie active entre le réseau et la source DC.

Lorsque la capacité de la source DC est relativement petite, le modèle mathématique doit être amélioré par l'équation du circuit continu.[2]

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 (V-15).

On suppose que :

$$V_{sh}^{(d,q)} = V_{shd} + jV_{shq} = V \cos\theta + j V \sin\theta \quad (V-9)$$

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

$$V = m \times U_{dc}$$

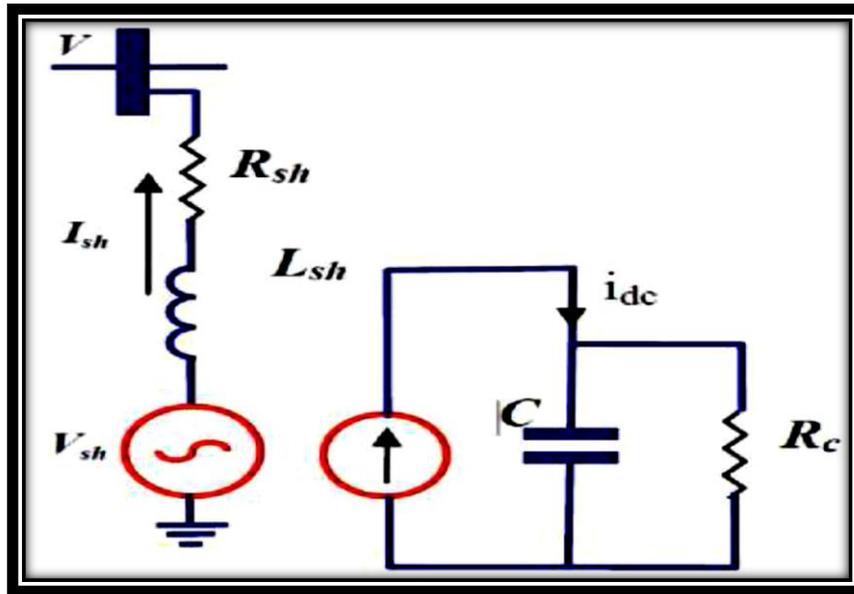


Figure V- 15: Schéma équivalent du STATCOM avec circuit DC [2].

En substituant les équations (V-10) et (V-11) dans les équations (V-7) et (V-8) on aboutit aux équations:

$$V_d - mU_{dc} \cos\theta = R_{sh}I_{shd} + L_{sh} \frac{dI_{shd}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shq} \quad (V-10)$$

$$V_q - mU_{dc} \sin\theta = R_{sh}I_{shq} + L_{sh} \frac{dI_{shq}}{dt} - L_{sh} \cdot \omega I_{shd} \quad (V-11)$$

La puissance circulant entre le condensateur et l'onduleur de tension peut être décrite par l'équation (V-14) et en même temps vérifie l'égalité qui suit (V-15):

$$P_{sh} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (V-12)$$

$$U_{dc} I_{dc} = \frac{3}{2} (V_{shd} I_{shd} + V_{shq} I_{shq}) \quad (V-13)$$

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  $R_{dc}$ .

$$I_{dc} = C \frac{dU_{dc}}{dt} + \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (V-14)$$

De ces équations (IV-10), (IV-11), (IV-15) et (IV-16) on peut tirer l'équation dynamique du coté continue du STATCOM suivante:

$$C \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} m (I_{shd} \cos\theta - I_{shq} \sin\theta) - \frac{U_{dc}}{R_{dc}} \quad (V-15)$$

Les équations (V-12) (V-13) (V-17) forme le système d'équation d'état du STATCOM en tenant compte des variations de la tension du circuit continu qu'on écrit sous forme matricielle suivante:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shd} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos\theta \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin\theta \\ \frac{3}{2} \frac{m}{C} \cos\theta & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} \cos\theta & \frac{-1}{R_{dc}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ U_{shd} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_{sh}} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (V-16)$$

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

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ I_{shd} \\ U_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R}{L_{sh}} & \omega & \frac{-m}{L_{sh}} \cos\theta_0 \\ -\omega & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} \sin\theta_0 \\ \frac{3}{2} \frac{m}{C} \cos\theta & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} \sin\theta_0 & \frac{-1}{R_{dc}C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{shd} \\ U_{shd} \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_{sh}} & 0 & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin\theta_0 \\ 0 & \frac{-R}{L_{sh}} & \frac{m}{L_{sh}} U_{dc0} \sin\theta_0 \\ 0 & 0 & -\frac{3}{2} \frac{m}{C} (I_{shd} \sin\theta + I_{shq} \cos\theta_0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ \theta \end{bmatrix} \quad (V-17)$$

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.

## V.6 Contrôle du STATCOM

Dans la totalité des applications pratiques le STATCOM est utilisé principalement pour compenser la puissance réactive au jeu de barre de connexion et par conséquence maintenir la tension de ce dernier. Pour cet objectif ce dispositif injecte ou absorbe un courant  $I_{sh}$ , qui est ( $I_{shd}^*$ ,  $I_{shq}^*$ ) sont donc les grandeurs de références du STATOM qu'on déterminera à partir des puissances à injectées [2].

### V.6.1 Détermination des Références

Les puissances injectées par le 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.

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

$$\begin{bmatrix} I_{shd}^* \\ I_{shq}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_d^2 + V_q^2} \begin{bmatrix} V_d & -V_q \\ V_q & V_d \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{shd}^* \\ Q_{shd}^* \end{bmatrix} \quad (V-18)$$

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 (V-16).

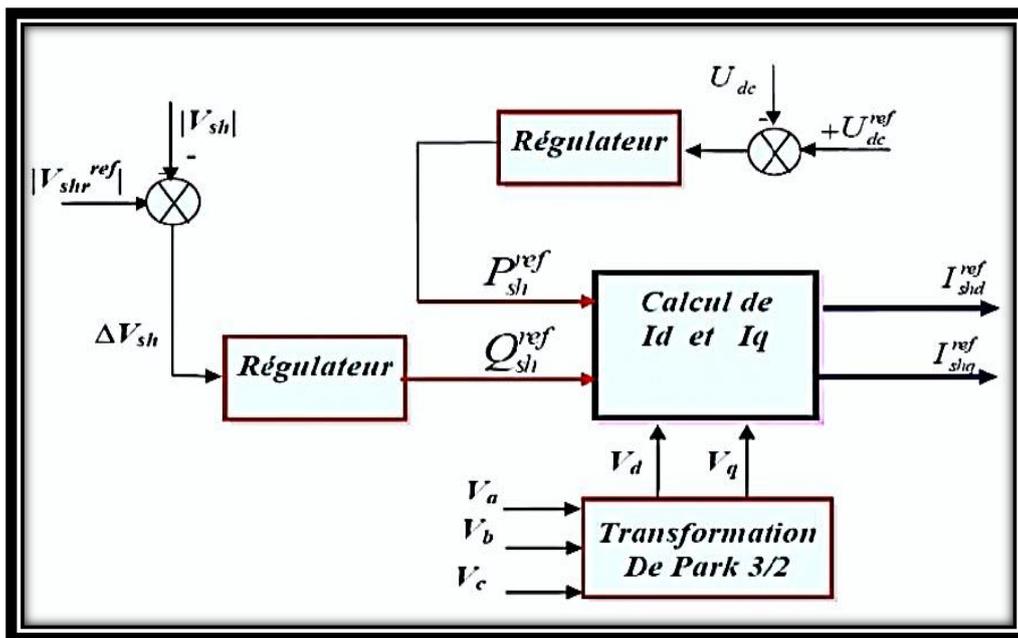


Figure V- 16: Identification des Courants de Référence [2].

### V.6.2 Régulateur PI avec compensation de pôles

Nous avons utilisé pour la régulation des courants du STATCOM des régulateurs proportionnels intégraux (PI) comme le montre le schéma de la figure (V-17) :

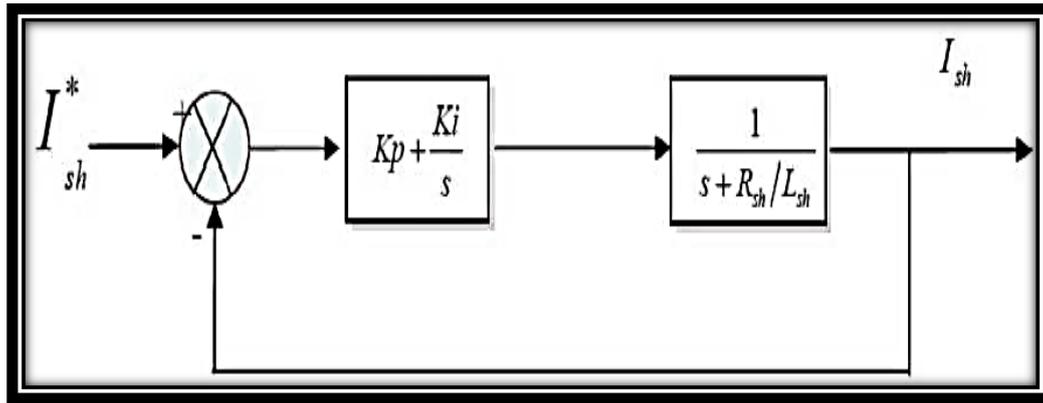


Figure V- 17: Schéma bloc de la Régulation PI des courants du STATCOM [2].

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

$$G(s) = p \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left( \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) = K_p \left( \frac{s + \frac{K_i}{K_p}}{s} \right) \left( \frac{1}{s + \frac{R_{sh}}{L_{sh}}} \right) \quad (V-19)$$

et par compensation du pôle on doit avoir :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{R_{sh}}{L_{sh}} = \frac{1}{T_{BO}} \quad (V-20)$$

$$G(s) = K_p (1/s) \quad (V-21)$$

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

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

$$F(s) = \frac{G(s)}{s + G(s)} = \frac{K_p}{s + K_p} = \frac{1}{T_{BF}(s) + 1} \quad (V-22)$$

$$T_{BF} = \frac{1}{K_p} \quad (V-23)$$

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 (V-20) et (V-21) les gains du contrôleur PI.

$$K_p = \frac{1}{3} T_{BO} = \frac{1}{3} \frac{L_{sh}}{R_{sh}} \text{ Et } K_i = K_p \times \frac{R_{sh}}{L_{sh}} \quad (V-24)$$

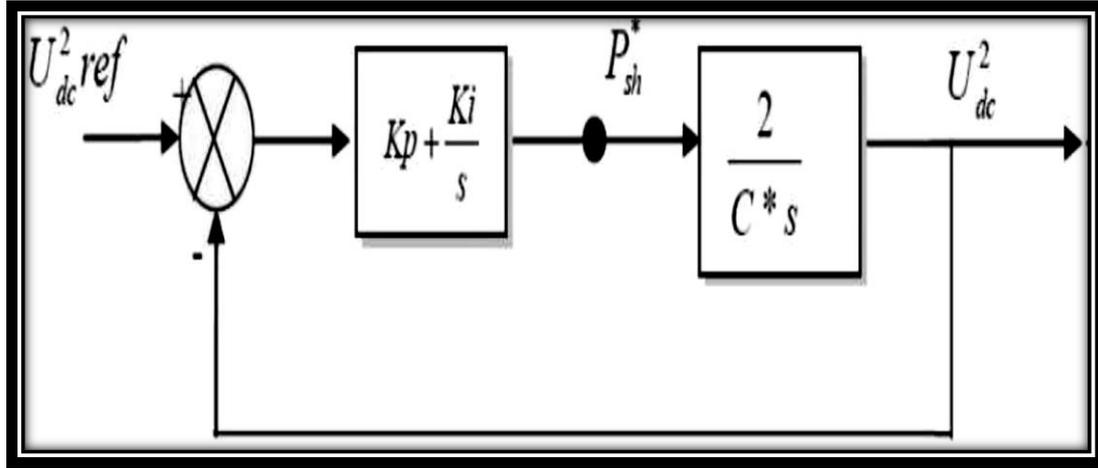
### V.6.3 Régulation de la tension continue $U_{dc}$

La tension continue aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur constante. La correction de cette tension doit se faire par la jonction d'un courant actif au courant de référence du 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 (V-25).

$$P_{dc} = P_{sh} = \frac{1}{2} C \frac{dU_{dc}^2}{dt} = \frac{2P_{sh}}{C} \quad (V-25)$$

Pour obtenir le signal  $P_{sh}$  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 V-18 : Régulation de la tension continue  $U_{dc}$  [2].*

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

$$F(s) = \frac{U_{dc}^2}{U_{dc}^2_{ref}} = \frac{\frac{2.K_p}{C}s + \frac{2.K_i}{C}}{s^2 + \frac{2.K_p}{C}s + \frac{2.K_i}{C}} \quad (V-26)$$

Avec :

$$\omega_n^2 = \frac{2.K_i}{C} \cdot \varepsilon = K_p \cdot \sqrt{\frac{1}{2.C.K_i}} \quad (V-27)$$

Pour avoir un bon coefficient d'amortissement du système en boucle fermée nous avons choisi  $\xi = 0.7$ . Et à fin d'atténuer les fluctuations à 300 Hz, et pour avoir un bon filtrage on va choisir  $\omega_n = \frac{2\pi.300}{10} \text{ rad/sec}$ . Finalement on détermine partir des équations (V-27) les valeurs des gains  $K_p$  et  $K_i$ .

## **V.7 Résultats de simulation et discussions**

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation d'un STATCOM relié en parallèle avec une charge connectée au réseau électrique de 380V/50Hz sous Matlab/SimPowerSystems. Le STATCOM est contrôlé pour compenser l'énergie réactive de

la charge afin d'imposer un facteur de puissance unitaire au réseau d'alimentation. On a étudiés :

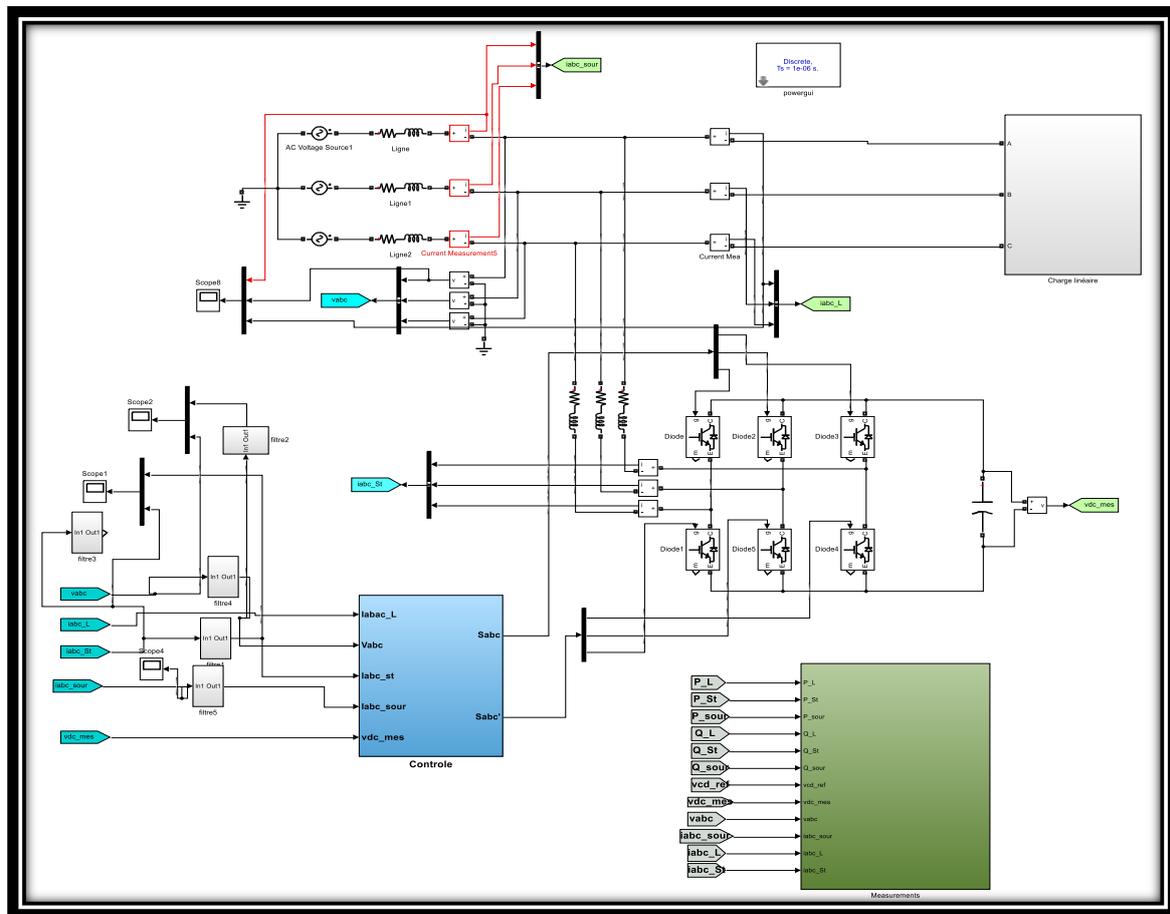
Pour la commande et le contrôle des courants du STATCOM nous avons utilisé la méthode de puissances instantanées dans le repère de Park .

On a deux modes de fonctionnement sont simulés :

- 1<sup>er</sup> mode correspond à une charge à caractère inductif de 1000 W et 1000 VAR est appliqués à l'instant 0.2s jusqu'à 0.5s,
- 2<sup>ème</sup> mode correspond à une charge à caractère capacitif, de 1000 W et 1000 VAR est appliqués à l'instant 0.6s jusqu'à 0.9s.
- entre les 2 modes, un fonctionnement à caractère résistif de valeur 1000W.

### V.7.1 Description du modèle

La structure du modèle sous MATLAB est présentée par la figure (V-19). Les paramètres du STATCOM, les paramètres de réglage ainsi que les paramètres de simulation sont présentés respectivement par les tableaux (V-1) et (V-2).



**Figure V- 19: Structure générale du STATCOM.**

**Tableau V- 1: Paramètres du STATCOM**

Tension de la source	$V_s = 220\sqrt{2}V$
Fréquence de la tension de source	$f_s = 50 \text{ Hz}$
Résistance et inductance de source	$R_s = 0.2m\Omega$ , $L_s = 0.015 \text{ mH}$
Résistance et inductance du filtre du STATCOM	$R_{st} = 30 \text{ m}\Omega$ , $L_{st} = 30 \text{ mH}$
Capacité du condensateur de bus continu	$C_{dc} = 2000\mu F$
Tension de bus continu	$V_{dc} = 700V$

**Tableau V- 2: Paramètres de régulation et du contrôle.**

Limites de la bande hystérésis des régulateurs du Courant	$\pm\Delta I = \pm 0.01 \text{ A}$
Gain proportionnel du régulateur IP de $V_{dc}$	0.55
Gain Intégral du régulateur IP de $V_{dc}$	177

D'après les résultats de la figure (V-20), Nous constatons que la puissance réactive transitée par le réseau est nulle, le STATCOM fournit exactement la puissance réactive de la charge en présentant un mode capacitif si celui de la charge est inductif. Il présente un mode inductif quand celui de la charge est capacitif. Pour la puissance active, le réseau fournit la puissance nécessaire à la charge. Celle du STATCOM est presque nulle à l'exception des régimes transitoires ou il demande une puissance du réseau pour contrôler la tension du bus continu.

La figure V-21, montre que la régulation de la tension du bus continu de notre système a présenté de bonne performance du fait qu'il a pu suivre la consigne en régime permanent.

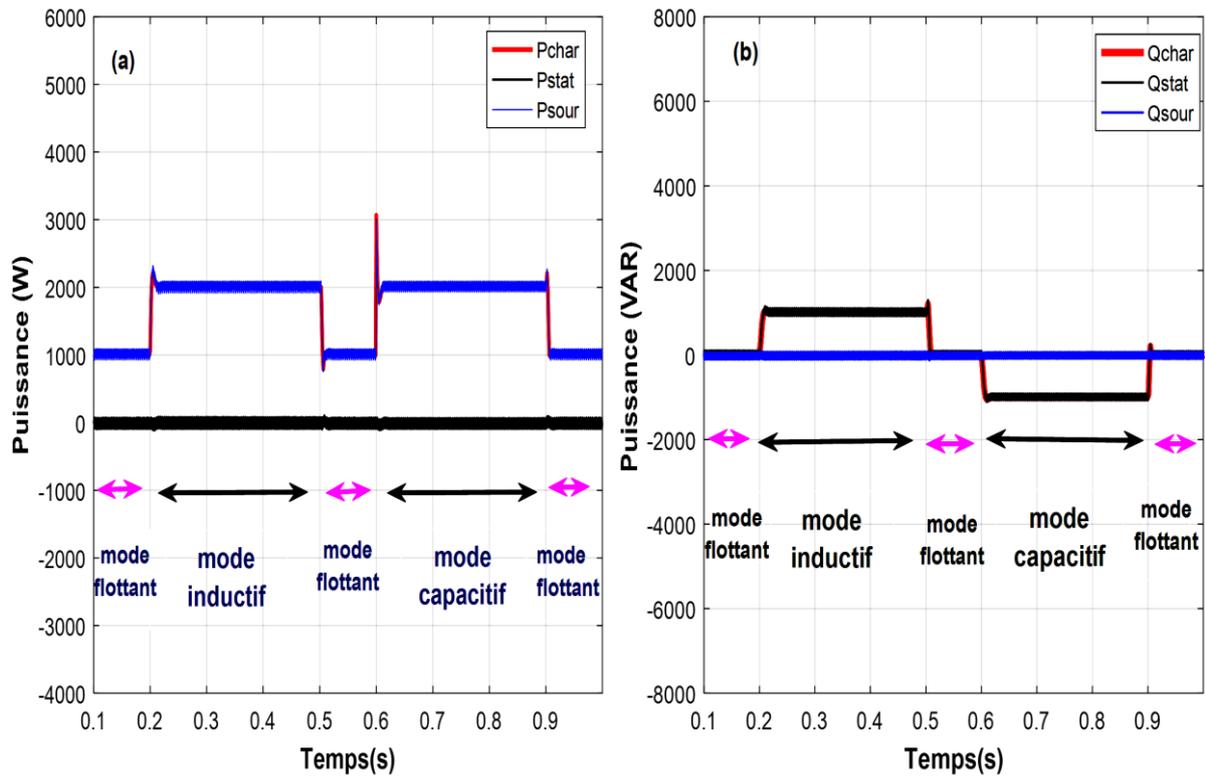


Figure V- 20: Puissances de la source, de charge et du STATCOM. a) Puissances actives et Réactives

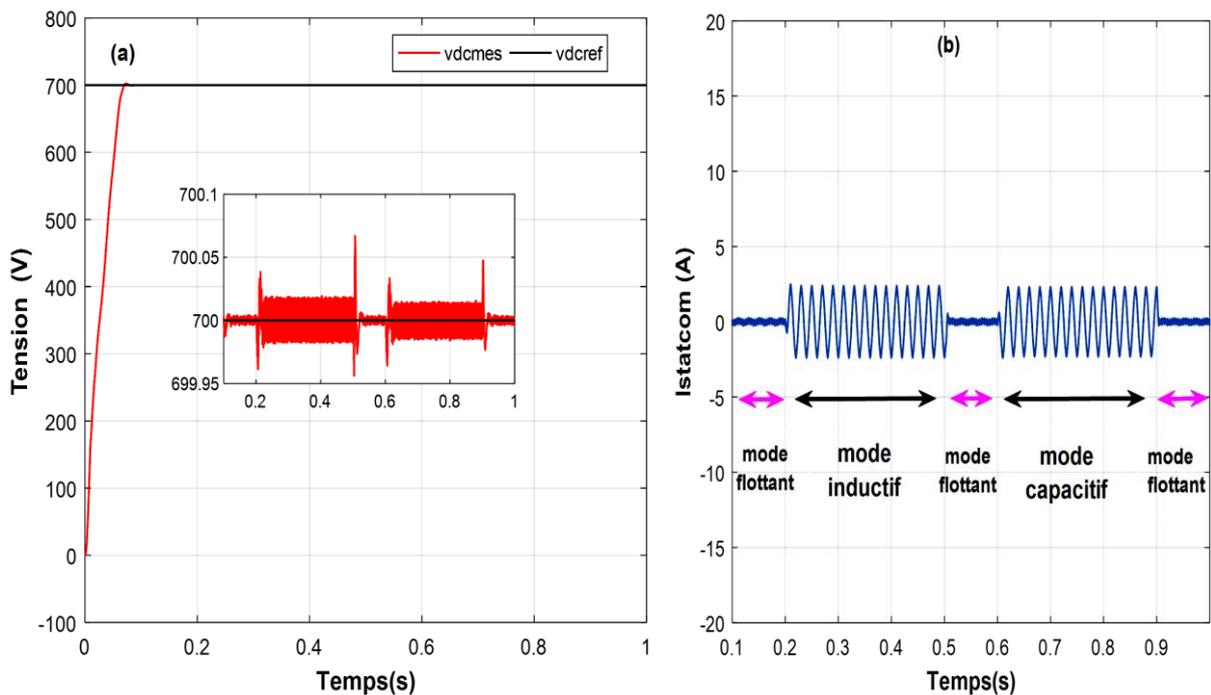
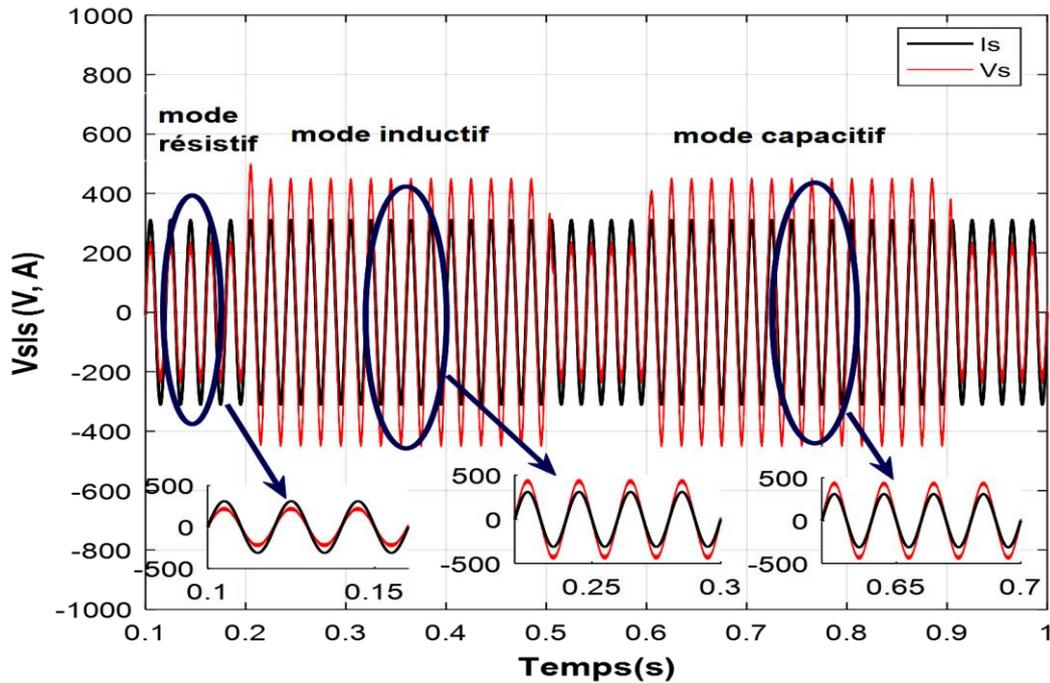


Figure V- 21: Tension et courant : a) Tension du bus continu et b) Courant du STATCOM

Selon la figure (V-22) on peut constater que la tension et le courant du réseau sont en phase durant tous les modes de fonctionnement correspondant.



*Figure V- 22: Tension et courant de source.*

Après avoir les résultats illustrées dans la figure (V-23) nous notons que pendant les périodes (0.1-0.2s), (0.5-0.6s) et (0.9-1s) le STATCOM est hors service (courant de STATCOM est nul) en mode flottant (mode résistif) de la charge.

Pour le mode inductive de la charge (0.2-0.5s) le courant du STATCOM est en quadrature avance, fournissant ainsi l'énergie réactive demandée par la charge. Dans ce mode le STATCOM présente un mode capacitif (compensation capacitive).

Pour le mode capacitive de la charge (0.6-0.9s), il est en quadrature retard, consommant donc la puissance réactive produite par la charge (compensation inductive).

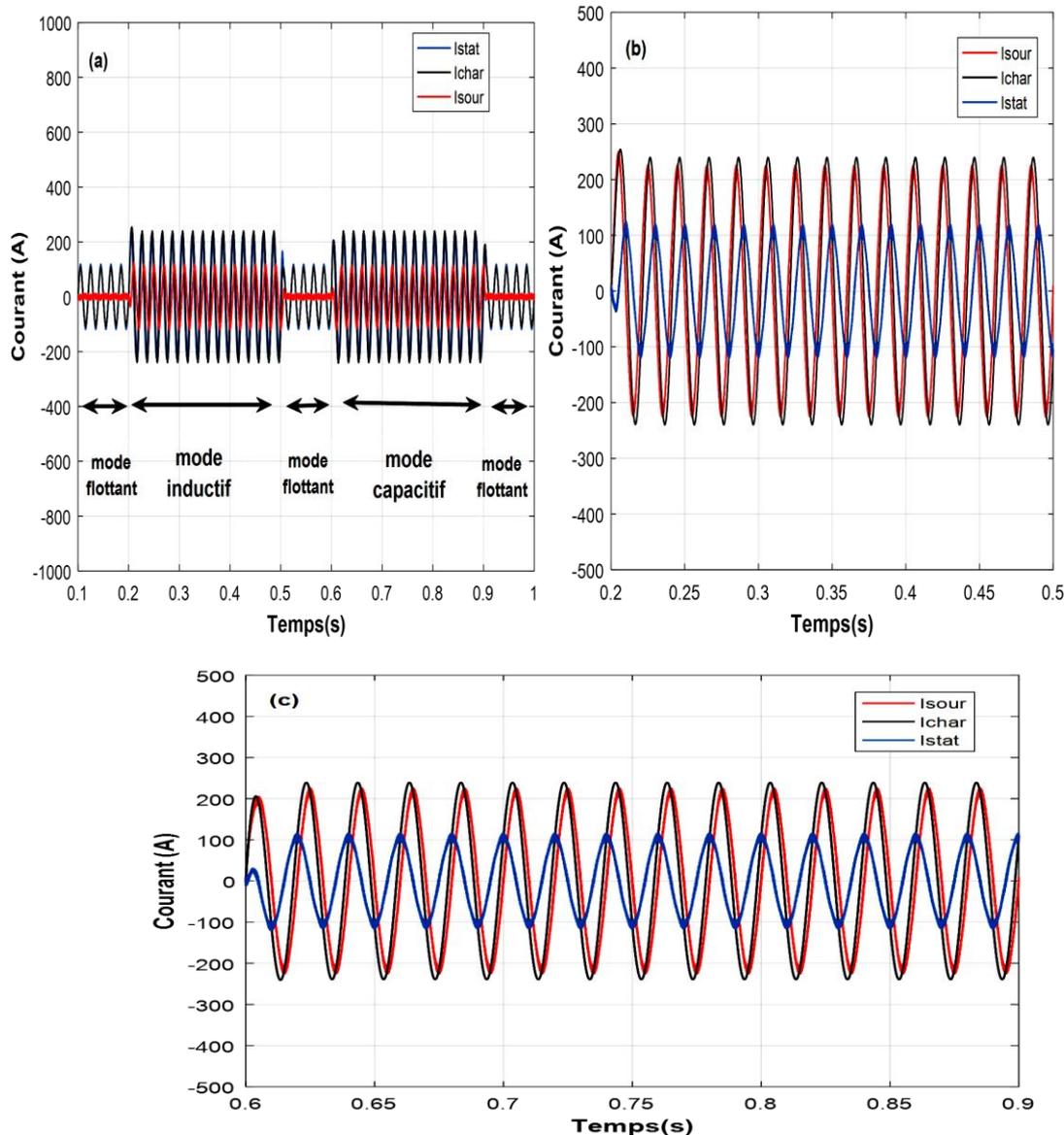


Figure V- 23: Courant de source, de la charge et du STATCOM pour les différents modes de Fonctionnement c) Mode inductif, c) Mode capacitif.

## V.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté d'une manière générale une introduction sur les techniques de compensation conventionnelles (série et shunt), au même temps une vue globale sur les nouveaux dispositifs de contrôle et de commande des systèmes énergétiques FACTS. Aujourd'hui cette technologie "FACTS" occupe une place privilégiée pour la gestion de systèmes énergétiques vis-à-vis ces atouts qu'elle offre tout en augmentant la capacité de transport, renforcement de stabilité de tension et le maintien d'une qualité meilleure de l'énergie produite tous ces avantages ne peut être prend lieu que par un réglage adéquat des paramètres de ces dispositifs.

Les résultats de simulations sous l'environnement MATLAB/SimPwerSystems du dispositif STATCOM nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement de ce dispositif FACTS dans les différents modes de fonctionnement.

Le STATCOM est un moyen très efficace pour maintenir la tension stable aux jeux de barre auquel il est connecté. Quelque soit le mode ; capacitif ou inductif, il réagit d'une manière instantané soit par la génération de la puissance réactive, c'est son mode est capacitif. Soit par l'absorption de la puissance réactive, c'est son mode est inductif.

---

---

## *Conclusion générale*

---

---

## *Conclusion générale*

Plusieurs problèmes sont envisagés au réseau électrique dans le point PCC (point of common coupling) tels que : la variation de l'amplitude de la tension du réseau au niveau de PCC, les ondulations due à la charge non équilibrée et/ou les harmoniques. Tous ces problèmes causés par l'exploitation d'énergie et la majorité de ces problèmes sont des conséquences de la consommation de la puissance réactive. L'augmentation de la consommation de cette énergie crée des perturbations sur la ligne de transmission.

Ce mémoire est dédié à la dépollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution déséquilibrés et distordus en vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique, pour ce faire on se doit de rechercher des solutions qui permettent aux charges non linéaires une absorption sinusoïdale avec facteur de puissance proche de l'unité.

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

Nous avons observé que la qualité du filtrage dépend essentiellement de la régulation du bus continu  $V_{dc}$  alimentant la capacité d'entrée de l'onduleur. D'autre part il est essentielle de fabriquer des courants de référence de bonne qualité afin de rendre le filtrage plus efficace.

Il existe plusieurs techniques de constitution des courants de référence. Dans ce mémoire nous avons choisi la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaires (p-q).

La méthode d'identification des courants harmoniques par l'intermédiaire des calculs des puissances réelle et imaginaire instantanées est la plus performante, et facile à réaliser et surtout la plus adaptée à identifier d'autre types de perturbation (déséquilibre du courant, puissance réactive).

Le filtre actif parallèle triphasé facilite la réduction du courant d'harmoniques du système de distribution. Le processus de filtrage emploie une méthode de contrôle appropriée pour extraire le courant de référence ainsi que la régulation de la tension du condensateur du bus continu de l'onduleur. Le filtre actif parallèle est mis en application avec un onduleur triphasé à source de tension à quatre bras et les commutations des interrupteurs de puissance de l'onduleur sont générées par la modulation de largeur d'impulsion.

Grace au nouveau concept appelé Systèmes Flexible de transmission à courant alternatif (FACTS), nous a permet de contrôler le flux de puissance active et réactive ainsi que l'augmentation des capacités de charge de lignes cela peut atteindre et même performé par

l'injection des tensions (ou courant). La dernière partie de ce mémoire se porte sur la compensation shunt de l'énergie réactive avec un dispositif nommé STATCOM.

Les résultats de simulation obtenu nous ont permis une compréhension approfondie du fonctionnement du filtre actif et le STATCOM on vue de l'amélioration de la qualité de l'énergie.

En résumé, tous ces résultats de simulations obtenues sont très satisfaisants et montrent bien le bon fonctionnement, l'efficacité et la robustesse du FAP et confirment la bonne réponse dynamique des stratégies de commande appliquées et ont montrés une bonne dynamique du filtre actif shunt à quatre fils devant les charges non linéaires déséquilibrées. Le STATCOM est un moyen très efficace pour maintenir la tension stable aux jeux de barre auquel il est connecté, il réagit d'une manière instantané soit par la génération de la puissance réactive, c'est son mode capacitif. Soit par l'absorption de la puissance réactive, c'est son mode inductif.

Enfin, le présent travail nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer combien la problématique est riche en interrogations et problèmes ouverts comme :

- Utilisation des topologies combinées (filtre actif universel parallèle-série) et hybrides (filtres actifs-passifs) vue les nombreux avantages qu'elles offrent.
- amélioration des réponses dynamiques en utilisant les commandes avancées comme mode glissant ou les commandes intelligents comme la logique floue, réseau de neurone ou bien l'hybridation.

## Références Bibliographiques

- [1] K. BELALIA, "Etude et amélioration de la qualité énergétique dans les réseaux intelligents," Thèse de doctorat, Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie-Mohamed Boudiaf ..., 2021/2022.
- [2] Y. LANSARI, A. MOUSSAOUI, and B. Khechab, "Amélioration de la qualité d'énergie dans un réseau électrique par le dispositif STATCOM," Université Ahmed Draia-ADRAR, 2017.
- [3] S. Hafsia, "Commande d'un Filtre actif parallèle à quatre bras par des techniques avancées," mémoire de master, Faculté des sciences et de la technologie UMKBiskra, 2015.
- [4] S. Nurcan, J. Barrios, and C. Rolland, "Une méthode pour la définition de l'impact organisationnel du changement," *INGENIERIE DES SYSTEMS D INFORMATION*, vol. 7, pp. 107-134, 2002.
- [5] L. Heguig and K. Zeghdi "Commande Directe de Puissance d'un Filtre Actif Parallèle en Conditions non Idéales," mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued, 2019.
- [6] S. Merzouk and S. Mourad, "Étude et simulation d'un filtre actif série," mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, 2018.
- [7] T. El-Bachir and R. M. El-Bachir, "Amélioration de qualité d'énergie électrique par un filtre actif parallèle à quatre fils," mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued, 2022.
- [8] S. BERNARD and G. TROCHAIN, "Deuxième Génération de Compensateur Actif d'Harmoniques Forte Capacité Basé sur le Mode d'Injection du Courant," *MGE UPS SYSTEMS MGE0121UKI*, p. 3, 1998.
- [9] G. Ismail, "Commande d'un filtre actif triphasé parallèle par différents régulateurs," *Mémoire de Magistère, Université Mohamed Kheider-Biskra*, vol. 24, 2011.
- [10] L. Zellouma, "Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide de filtre actif," thèse de doctorat, Université badji mokhtar Annaba, 2010.
- [11] A. E. H. Gheraissa, M. e. a. Rehouma, and Y. E. Baci, "Amélioration de la qualité d'énergie électrique par un filtre actif parallèle à trois fils," mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2022.
- [12] N. E. NECIB and A. A. HADJ "Amélioration de la qualité d'énergie électrique dans un réseau basse tension par un filtre actif parallèle," mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2018.

- [13] T. Mahni, "Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé à Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle," thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [14] M. A. E. Alali, "Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension," Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, ULP-Strasbourg 1, France, Septembre 2002.
- [15] S. Bouguerra, "Filtrage Actifs Parallèles des Réseaux Electriques avec Compensation de l'Energie Réactive," Mémoire d'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Université de m'sila, 2007.
- [16] M. Harhouz and H. Nebbache, "Amélioration de la qualité d'énergie par filtrage actif utilisant la commande ZDPC," mémoire de master, university of M'sila, 2021.
- [17] G. G. CHAMPIOT, "Les perturbations électriques et électromagnétiques: Conception et amélioration des installations et tertiaires," *Collection Electra, Dopee Diffusion*, pp. 791-796, 1991.
- [18] L.Moran and J.Dixon, « *Power Electronics Handbook* », *Academic Press, Chapter 39pp.1-36* 2007.
- [19] G. Ismail, "etude et réalisation d'un filtre actif parallèle en utilisant différentes stratégies de contrôle," thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, Département: Electrotechnique, 2016.
- [20] H. Hadfi, "Etude et commande d'un filtre actif parallèle à quatre bras," mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2019.
- [21] C. Zoubir, "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique," Université Badji Mokhtar, 2015.
- [22] T. Mahni, "Stratégies de commande d'un filtre actif parallèle à quatre fils," El Oued, UnEl Oued, Centre Universitaire. Institut des Sciences et de ..., 2012.
- [23] S. ALI and S. Bouhanak, "Etude et Simulation d'un Filtre Active Parallèle à Quatre Fils," *Mémoire de magister, Université echahid hama lakhder d'el-oued*, 2015.
- [24] A. Chauvin, "Les Harmoniques », Fiche d'application, Ed 1, Service Communication, France," mai 2008.
- [25] L. BILAL and O. ABANA, "Stratégies de Commande d'un Filtre Active Parallèle Triphasé," *Mémoire de master, Université echahid hama lakhder d'el-oued*, 2012.
- [26] Y. Zerrouki, "Amélioration de la qualité d'énergie électrique en utilisant un onduleur de tension multiniveaux," mémoire de master, Université MOHAMED BOUDIAF DE M'SILA, 2015.
- [27] D. Nekkar, "Contribution à l'étude des Stratégies de commande des filtres actifs triphasés " Mémoire de Magister, Université de Souk-Ahra, 2013/2014.

- [28] H. Fujita and T. Yamasaki, "A hybrid active filter for damping of harmonic resonance in industrial power systems," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 15, pp. 215-222, 2000.
- [29] L. ZELLOUMA, "Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant génères par un pont redresseur triphasé non Commandé," mémoire de magister, Université de BadjiMokhtar, Annaba,, 2006.
- [30] N. ALLOUI, "Contribution à l'amélioration de la qualité de l'énergie dans les réseaux électriques en utilisant les Filtres Hybrides," thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2017.
- [31] B. Abdelouahab, "Techniques de commande predictive et floue pour les systemes d'électronique depuissance: application aux redresseurs a mli," thèse de doctorat, université Farhat Abbas-Sétif 2010.
- [32] N. Merzougui, "Gestion de congestion dans les réseaux électriques," mémoire de magister, 2014.
- [33] A. L. YAHIAOUI, "Détection de défaut des convertisseurs de puissance «Application au filtre actif parallèle»,»," mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila, 2014.
- [34] M. M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales," 29 thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France, 2008.
- [35] S. Beaulieu, *Etude et mise au point d'un filtre actif d'harmoniques en vue d'améliorer la qualité de l'alimentation électrique*: Université du Québec à Chicoutimi, 2007.
- [36] A. Lounes, "Etude et simulation d'un filtre actif parallèle," mémoire de master, Université Mouloud Mammeri, 2014.
- [37] S. Mouttou, "Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant," Thèse de doctorat, Université du Québec à Trois-Rivières, 2002.
- [38] o. B, "Contribution à l'analyse des Onduleurs Multiniveaux " mémoire de magister, université de batna, 2005.
- [39] D. O. Abdeslam, P. Wira, J. Mercklé, Y.-A. Chapuis, and D. Flieller, "Stratégie neuromimétique d'identification et de commande d'un filtre actif parallèle," *Revue des Systèmes, Série Revue Internationale de Génie Electrique (RS-RIGE)*, vol. 9, pp. 35-64, 2006.
- [40] J. Xu, "Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution d'électricité," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1994.
- [41] M.-X. Wang, "Filtrage actif de puissance: études et réalisation d'un filtre actif à commande numérique temps réel," Toulouse, INPT, 1992.

- [42] H. Akagi, Y. Tsukamoto, and A. Nabae, "Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, pp. 93-98, 1990.
- [43] S. Guffon, "Modélisation et commandes à structure variable de filtres actifs de puissance," Thèse de doctorat, Grenoble INPG, 2000.
- [44] 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, pp. 9-15, 1990.
- [45] 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, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 1995.
- [46] O. Lapena, L. G. de Vicuña, 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, Switzerland*, 1999.
- [47] M. A. E. Alali, "Optimisation des performances de filtres actifs parallèles-séries à partir des correcteurs avancés," *JCGE'01, Belfort/Nancy*, pp. 215-222, 2001.
- [48] K. Djazia, "Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus," Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, 2015.
- [49] A. Kouka and D. Ouissal, "Commande direct de puissance d'un filtre actif parallèle," Mémoire de master, Université Echahid Hama Lakhder d'El-Oued, 2022.
- [50] O. Amar, "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant," Thèse de doctorat, These, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2007.
- [51] S. Othman, "Modélisation et Commande à base d'une représentation par Réseau de Pétri d'un Filtre Actif Parallèle avec un Onduleur Multicellulaire Série," Thèse de doctorat, CY Cergy Paris Université; École nationale d'ingénieurs de Gabès (Tunisie), 2021.
- [52] A. Hamadi, "Contribution à l'étude des filtres hybrides de puissance utilisés pour améliorer la qualité de l'énergie dans le réseau électrique de distribution," Thèse de doctorat, École de technologie supérieure UNIVERSITÉD UQUÉBE C, 2010.
- [53] F. Berrezzek, "Etude des différentes techniques de commande des onduleurs à MLI associés à une machine asynchrone," Thèse de doctorat, Université de Annaba-Badji Mokhtar, 2006.
- [54] M. Adamou, N. Alkassoum, A. Foulani, and A. S. Maiga, "Dépollution harmonique des réseaux électriques: Etude comparative des commandes, par Modulation de Largeur d'Impulsion et par Hystérésis, des filtres actifs shunts triphasés," *International Journal of Innovation and Applied Studies*, vol. 28, pp. 557-566, 2020.

- [55] M. Dhaoui and L. Sbita, "Control and management of energy flows in a multi-source hybrid system," in *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, 2017, pp. 1-6.
- [56] T. Gouraud, "Identification et rejet de perturbations harmoniques dans des réseaux de distribution électrique," Thèse de doctorat, Nantes, 1997.
- [57] A. Mourad, "Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle," UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF M'SILA FACULTE DE TECHNOLOGIE, 2016.
- [58] A. Chaoui, "Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires," Thèse de doctorat, Université de Sétif, 2010.
- [59] A. Boussaid and A. Khezzar, "Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique," Thèse de doctorat, Université Frères Mentouri-Constantine 1, 2017.
- [60] O. Amar, "Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant," Thèse de doctorat, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA 2007.
- [61] H. Akagi, *INSTANTANEOUS POWER THEORY AND APPLICATIONS TO POWER CONDITIONING*, 2ème Edition ed., 2017.
- [62] M. C. BENHABIB, "Contribution à l'Etude des Différentes Topologies et Commandes des Filtres Actifs Parallèles à Structure Tension, Modélisation, Simulation et Validation Expérimentale de la Commande ». Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy France, 2004," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy France, 2004.
- [63] H.-S. Song, H.-g. Park, and K. Nam, "An instantaneous phase angle detection algorithm under unbalanced line voltage condition," in *30th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Record.(Cat. No. 99CH36321)*, 1999, pp. 533-537.
- [64] M. ELBAR, "Commande d'un filtre actif triphasé à quatre fils," Mémoire de magister, Ecole Militaire polytechnique, 2008.
- [65] D. Ould Abdeslam, "Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension," Thèse de doctorat, Mulhouse, 2005.
- [66] H. Farid, "Contribution aux stratégies de commande avancées d'un filtre actif shunt à quatre fils," Thèse de doctorat, Université EL-Hadj Lakder-Batna, 2012.
- [67] M. M. Abdusalam, "Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales," *These de doctorat, Université Henri Poincaré-Nancy-I-France*, vol. 29, 2008.

- [68] B. Mehayaech, E. Guidiri, and M. Dachri, "Commande direct de puissance d'un filtre actif parallèle," *Mémoire de magister, Université Echahid Hamma Lakhdar*, 2020.
- [69] S. Abdeslem, "Filtrage actif et contrôle de puissances: application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau," *mémoire de magistère, université Ferhat Abbas, Sétif*, 2012.
- [70] N. Mesbahi, "Contribution à l'étude des performances des onduleurs multiniveaux sur les réseaux de distribution," *Thèse de Doctorat*, 2014.
- [71] N. M. e. A. Ouari, "Direct power control of three-PWM reetifier without line voltage sensors", in proc .2ème journées Internationales d'Electrotechnique, de Maintenance et de comptabilité Électromagnétique (JIEMCEM2010), ENSET Oran, Algeria," 25-27 May 2010.
- [72] T. Noguchi, H. Tomiki, S. Kondo, and I. Takahashi, "Direct power control of PWM converter without power-source voltage sensors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, pp. 473-479, 1998.
- [73] S. NOUKAS and O. BERRABAH S, "ETUDE ET SIMULATION D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE EN REGIME DESEQUILIBRE UTILISANT DES NOUVELLES TECHNIQUES DE MODULATION SVM3D," *Université Ibn Khaldoun-Tiaret-*, 2020.
- [74] N. Mancer, "Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositif de compensation dynamique (FACTS)," *Mémoire de magister*, 2012.
- [75] H. NG and L. Gyugyi, "Understanding FACTS," ed: IEEE Press, 1999.
- [76] B. Mahdad, "Optimal power flow with consideration of facts devices using genetic algorithm: Application to the algerian network," *Doctorat Thesis, Biskra University Algeria*, 2010.
- [77] K. R. Padiyar, "FACTS controllers in power transmission and distribution," 2007.
- [78] A. Alibi, "Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS:(Flexible AC Transmission Systems)," *Mémoire de magister, Université de Batna 2*, 2009.
- [79] N. Mancer and Y. Aggouni, " modélisation et integration des dispositifs de compensation dynamique FACT'," *Mémoire de l'ingénieur d'état* 2007.
- [80] N. Mancer, "Aggouni Y''modélisation et integration des dispositifs de compensation dynamique FACT'''," *Mémoire de l'ingénieur d'état Juin*, 2007.
- [81] B. Mahdad, "Contribution to the improvement of power quality using multi hybrid model based wind-shunt FACTS," in *2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, 2011, pp. 1-5.

- [82] A. Seifi, S. Gholami, and A. Shabanpour, "Power flow study and comparison of FACTS: Series (SSSC), Shunt (STATCOM), and Shunt-Series (UPFC)," *The Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 11, pp. 129-137, 2010.
- [83] X.-P. Zhang, E. Handschin, and M. Yao, "Multi-control functional static synchronous compensator (STATCOM) in power system steady-state operations," *Electric power systems research*, vol. 72, pp. 269-278, 2004.
- [84] P. L. So, Y. C. Chu, and T. Yu, "Coordinated control of TCSC and SVC for system damping enhancement," *International Journal of Control, Automation, and Systems*, vol. 3, pp. 322-333, 2005.
- [85] E. G. Shahraki, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques," Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2003.

**ملخص-** من بين المشاكل المختلفة التي يسببها التلوث التوافقي تدفق تيار كبير في خط التوصيل- المحايد .- هذا التيار يمكن أن يتجاوز التيار المتدفق في الطور وبالتالي يشكل خطرًا على الأشخاص والمعدات .يعتبر المرشح النشط المتوازي FAP حتى الآن من بين الحلول المناسبة والحديثة لمكافحة التلوث لاستعادة الشكل الجيبي للتيار في شبكة التوزيع الكهربائية .يتم استخدام هذا المرشح FAP للتعويض عن التيارات التوافقية، وكذلك الاستطاعة الغير فعالة .الهدف الرئيسي لهذه الأطروحة هو التركيز على جوهر الحمولة الغير خطية لنظام الشبكة في ظل ظروف عدم توازن الحمولة، ودراسة مفهوم المرشح النشط المتوازي للاستطاعة القائم على عاكس رباعي الأذرع بهدف تنظيف الشبكات الكهربائية من خلال التعويض عن التوافقيات الملوثة الناتجة عن الحمولة في الشبكة (تقليل إجمالي معدل التشوه التوافقي ) THD وتحييد التيار المحايد الملوث في حالة عدم توازن الحمولة المتصلة بتوزيع الشبكة من أجل الحصول على تيار شبكة قريب قدر الإمكان للإشارة الجيبية وإلغاء التيار في المحايد لغرض حماية معدات الشبكة. الهدف الثاني هو استخدام STATCOM كوسيلة لتعويض الطاقة التفاعلية وعامل القدرة دائمًا هو الوحدة لأنماط التشغيل المختلفة للحمولة.

**الكلمات المفتاحية-** مرشح نشط متوازي، تلوث توافقي، طريقة pq ، حمولة غير خطية ، PWM ، التحكم PI ، عاكس رباعي الأذرع ، عدم التوازن STATCOM .

**Résumé-** La circulation d'un courant important dans le conducteur du neutre est parmi les divers problèmes causés par la pollution harmonique. Ce courant peut dépasser le courant circulant dans les phases et constitue ainsi un danger pour les personnes et le matériel. Le filtre actif parallèle (FAP) est à ce jour la solution moderne et efficace de dépollution les plus adéquates pour restaurer la forme sinusoïdale du courant dans un réseau de distribution électrique. Le FAP est utilisé pour compenser les courants harmoniques, ainsi que la puissance réactive. L'objectif principal de ce travail s'articule autour deux axes : le premier est de se concentrer sur le cœur du système réseau-charge non linéaire dans les conditions de déséquilibre de la charge, et d'étudier le concept du filtre actif parallèle basé sur un onduleur à quatre bras pour objectif de dépolluer les réseaux électriques par compensation des harmoniques produits par la charge polluante dans le réseau (diminution du taux de distorsion d'harmonique total THD) et de neutraliser le courant du neutre dans le cas de déséquilibre dans les charges polluantes branchées avec le réseau de distribution afin d'obtenir un courant du réseau s'approchant le plus possible du signal sinusoïdal et d'annuler le courant dans le neutre pour protéger les équipements du réseau. Le deuxième objectif est l'utilisation du STATCOM comme moyen de la compensation de l'énergie réactive et le facteur de puissance est toujours unitaire pour différents mode de fonctionnement de la charge.

**Mots-clés-** Filtre actif parallèle, Pollution Harmonique, Méthode pq, Charge non linéaire, MLI, Régulateur PI, Onduleur à quatre bras, Déséquilibre, STATCOM.

**Abstract-** The flow of a large current in the neutral conductor of a transmission system is one of the major problems caused by harmonic pollution. This current can assume excessive values and even exceed the current flowing in the phases which can be extremely dangerous both for the equipment and the safety of the personnel. Currently, the parallel or shunt active filter (SAF) or parallel active filter is considered as the most effective solution to mitigate harmonic pollution and restore a sinusoidal current waveform in electrical distribution networks. The SAF can be used to compensate for harmonic currents, as well as that of the reactive power. The main objective of this work revolves around two axes: the first is a SAF circuit based on a four-arm inverter topology. The designed SAF is shown to lead to better harmonic compensation with a reduced THD (Total Harmonic Distortion) level in the presence of nonlinear and unbalanced loads in the network, and to eliminate the neutral current caused by the unbalance in the polluting loads connected to the distribution network, achieve a near-sinusoidal current waveform and protect the electric network equipment. The other goal of this study is to use STATCOM as a means of reactive energy compensation and the power factor is always unity for different operating modes of the load.

**Keywords-** Parallel active filter, Harmonic pollution, pq method, Non-linear load, Active shunt filter, PWM, PI regulator, Four-arm inverter, Unbalance, STATCOM.