

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Commande électrique

Thème

Commande d'un filtre actif parallèle par logique floue

Réalisé par :

HADDIG Salah

SAADALLAH Mahmoud

TLILI Ali

Encadré :

Dr.ZELLOUMA Laid

Soutenu en septembre 2020

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued
Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Étude
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Électrotechnique
Spécialité : Commande électrique

Thème

Commande d'un filtre actif parallèle par logique floue

Réalisé par :

HADDIG Salah

SAADALLAH Mahmoud

TLILI Ali

Encadré :

Dr.ZELLOUMA Laid

Soutenu en septembre 2020

Résumé :

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différentes charges sur le réseau électrique. Ce dernier, enregistre un accroissement des perturbations à cause de l'augmentation des charges non linéaires en nombre et genre. Les solutions classiques sont avérées insuffisantes.. En promouvant certains des nouveaux composants rapides de l'électronique énergétique, des solutions modernes et efficaces ont émergé, et le travail présenté dans cette mémoire aborde une solution modern de contrôle de la pollution harmonique qui est le filtre parallèle actif.

Dans cette thèse, nous présentons l'étude et la simulation du compensateur actif parallèle à deux niveaux. Les deux paramètres qui nécessitent un réglage précis pour une meilleure compensation sont la tension d'alimentation de l'onduleur (filtre actif) et le courant ou la tension harmonique.

Après un rappel des origines, et des effets de la pollution harmonique sur les réseaux électriques, les différents solutions de dépollution du réseau électrique nous étudions la structure du filtre actif parallèle de puissance, la commande du filtre actif à base de l'onduleur a été ensuite étudiée, à savoir les méthodes d'identification des courants harmoniques de référence: dans ce cas on utilisée la méthode des puissances instantanées p-q, la commande hystérésis pour l'onduleur et un régulateur proportionnelle ou régulateur de la logique floue pour régulation du bus continue. Puis, nous allons validé par des simulations sous l'environnement Simulink/Matlab. Les résultats obtenus par simulation montrent l'efficacité et les bonnes performances du filtre actif parallèle.

Mots clés: Courants harmoniques, Taux de distorsion d'harmonique, FAP, Onduleur, Méthode p-q.

Abstract :

Electrical energy, mainly produced and distributed in the form of three-phase sinusoidal voltages, provides the electrical power necessary for the various loads on the electrical network. The latter records an increase in disturbances due to the increase in non-linear loads in number and type. Conventional solutions have been shown to be insufficient. By promoting some of the new fast components of energy electronics, modern and efficient solutions have emerged, and the work presented in this thesis addresses a solution modern for controlling harmonic pollution which is the filter parallel active.

In this thesis, we present the study and simulation of the two-level parallel active compensator. The two parameters that require fine tuning for better compensation are the inverter supply voltage (active filter) and the harmonic current or voltage.

After a reminder of the origins, and the effects of harmonic pollution on networks electrical, the various solutions for cleaning up the electrical network we study the structure of the parallel active power filter, the control of the active filter based on the inverter was then studied, namely the methods of identification of the reference harmonic currents: in this case we used the instantaneous power method pq, the hysteresis control for the inverter and a proportional regulator or fuzzy logic regulator for continuous bus regulation. Then, we will validate by simulations under the Simulink / Matlab environment. The results obtained by simulation show the efficiency and good performance of the parallel active filter.

Key words: Harmonic current, total harmonic distortion, shunt active power filter, inverter, method (p-q).

المخلص

توفر الطاقة الكهربائية ، التي يتم إنتاجها وتوزيعها بشكل أساسي على شكل جهد جيبي ثلاثي الطور ، الطاقة الكهربائية اللازمة للأحمال المختلفة على الشبكة الكهربائية. هذا الأخير يسجل زيادة في الاضطرابات بسبب الزيادة في الأحمال غير الخطية في العدد والنوع. لقد ثبت أن الحلول التقليدية غير كافية. من خلال الترويج لبعض المكونات الجديدة السريعة للإلكترونيات الطاقة ، ظهرت حلول حديثة وفعالة ، ويتناول العمل المقدم في هذه الأطروحة حلاً للتحكم في التلوث التوافقي وهو المرشح الموازي النشط. في هذه الرسالة ، نقدم دراسة ومحاكاة المعوض النشط المتوازي ذي المستويين. المعلمتان اللتان تتطلبان ضبطاً دقيقاً لتعويض أفضل هما جهد مصدر تغذية العاكس (مرشح نشط) والتيار أو الجهد التوافقي.

بعد التنكير بالأصول وتأثيرات التلوث التوافقي على الشبكات الكهربائية ، الحلول المختلفة لتنظيف الشبكة الكهربائية ؛ قمنا بدراسة بنية مرشح القدرة النشط المتوازي ، ثم تمت دراسة التحكم في المرشح النشط القائم على العاكس ، والطرق المستعملة لتحديد التيارات التوافقية المرجعية: في هذه الدراسة استخدمنا طريقة الاستطاعة اللحظية pq ، التحكم في التخلفية للعاكس والمنظم النسبي أو المنظم المنطق الضبابي لتنظيم الجهد المستمر. بعد ذلك ، سوف نتحقق من الصحة عن طريق عمليات المحاكاة في بيئة Simulink / Matlab . تظهر النتائج التي تم الحصول عليها عن طريق المحاكاة كفاءة وأداء المرشح النشط المتوازي.

الكلمات المفتاحية : التيارات التوافقية ، معامل تشويه التيار ، المرشح الفعال المتوازن ، المرشح ، طريقة pq .

Remerciement

Nous remercions avant tout ALLAH Tout-Puissant de nous avoir donné et la volonté d'accomplir ce modeste travail

*Nous tenons à remercier vivement à encadreur Monsieur: **Dr l. zellouma** , parce qu'il nous a accompagnés tout au long de la période de réalisation de ce travail et qui a coopéré avec nous et ne nous a pas épargné ses conseils et ses connaissances dont nous avons grandement bénéficié.*

*Nous remercions également Monsieur : **Dr. Dia eddine** pour son soutien et ses conseils pendant la période d'achèvement.*

Nous offrons une salutation de remerciements tous les membres du jury qui ont accepté de juger nos travaux.

Nous sommes très reconnaissant les professeurs d'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued , Surtout les professeurs du faculté de Technologie pour leur bénéfice à nous.

Enfin, Nous exprimons toute nos gratitude à nos familles et amis et tous ceux qui ont contribué avec nous à mener à bien ce travail de près ou de loin.

Sommaire

SOMMAIRE

Liste des figures.	
Liste des tableaux.	
Liste des symboles.	
Liste des abreviations.	
Introduction général	1

Chapitre I:

Généralités sur les perturbations des réseaux électriques .

I.1 Introduction.....	4
I.2 Perturbation électrique	4
I.2.1 Creux et coupures de tension	5
I.2.2 Fluctuations des tensions.....	6
I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension.....	6
I.2.4 Variation de la fréquence.	7
I.2.5 Harmonique et inter harmonique	7
I.2.6 Conséquence néfastes des harmoniques	8
I.3 Origines des harmoniques.....	8
I.3.A Charge non-linéaire	8
I.3.B Déformation d'un signal sinusoïdal	9
I.3.1 Effets instantanés	10
I.3.2 Effets à terme	10
I.4 Les techniques de dépollution des réseaux électriques.....	11
I.5 Grandeurs caractéristiques	11
I.5.1 Grandeur harmonique	11
I.5.2 Rang de l'harmonique	11
I.5.3 Série de Fourier	11
I.5.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative	12
I.5.5 Taux de distorsion	12
I.5.6 Facteur de puissance	13
I.5.7 Spectre d'harmonique (de fréquence)	14
I.5.8 Charges linéaires et non linéaires	15

I.5.8.1: Charges linéaires	15
I.5.8.2:Charges non linéaires	15
I.6 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP	16
I.7 Normes et réglementation de perturbation.....	17
I.8 Les solutions traditionnelles	18
I.8.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique	19
I.8. 2 Transformateurs à couplage spécial	19
I.8. 3 Inductances (selfs) série	20
I.8. 4 Filtre passif	20
I.8.4.1: Filtre passif résonant	20
I.8. 4.2: Filtre passif amorti	21
I.8.5 Agir sur la structure de l'installation	21
I.8.6 Pont dodécaphasé	21
I. 9 Solutions modernes de dépollution	21
I.9.1 Filtrage actif	22
I.9.1.1 Filtre actif parallèle	22
I.9.1.2 Filtre actif série.....	23
I.9.1.3 Combinaison parallèle série actif	23
I.9.2 Filtrage hybride	24
I.9.2.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	24
I.9.2.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif	25
I.9.2.3 Association d' un filtre actif série et d' un filtre passif	25
I.9.3 Les redresseurs MLI	26
I.9.3.1 Redresseur de tension	26
I.9.3.2 Redresseur de courant	27
I.10 Conclusion	28

Chapitre II:

Structure du filtre actif parallèle de puissance et principe de fonctionnement.

II.1 Introduction	30
II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance	30
II.3 Structure du filtre actif parallèle.....	31
II.3.1 Etude de la partie puissance.....	32
II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle:	32

II.3.1.2 circuit de stockage d'énergie	33
II.3.1.2 .1 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage	34
II.3.1.3 Filtre de sortie.....	34
II.3.2 Etude de la partie commande	34
II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courant perturbés	34
II.3.2.1.2 . Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées	35
II.3.2.2 Système a PLL	38
II.3.2.3 Commande de onduleur	40
II.3.2.3.1 La commande par hystérésis.....	40
II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)	40
II.3.2.4 Régulation de la tension continue	41
II.3.2.5 Régulations du courant du filtre actif.....	42
II.4. Conclusion	43

Chapitre III: La commande par logique floue.

III-1-Introduction	45
III-2-La logique floue	45
III-3-Domaine d'application	45
III-4-Principe de la logique floue	45
III-5-Eléments de base de la logique floue.....	46
III-5-1-Variables linguistiques	46
III-5-2-Fonctions d'appartenance	47
III-5-3-Operateurs de la logique floue.....	47
III-5-4-Règles floues	48
III-6-Commande par logique floue	48
III-6-1-Constitution d'un système floue	48
III-6-1-1-Interface de fuzzification	49
III-6-1-2-Base de règles	49
III-6-1-3-Mécanisme d'inférence floue	49
III-6-1-4-Interface de Défuzzification	50
III-6-2-Description générale d'un contrôleur flou	50
III.7 .Application à la commande d'un filtre actif	51
III.7.1 Partitions floues	51
III.7.2 Base des règles:	53

III-9-Conclusion :	54
--------------------	----

Chapitre IV: Modélisation et Simulation Numérique.

IV-1 Introduction.....	56
IV-2-Schéma synoptique de l'association filtre – réseau – charge polluante	56
IV-3-Modélisation de l'association réseau- Filtre actif- Charge polluante	57
IV-3-1 Modélisation du réseau	57
IV-3-2 Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé)	58
IV-3-3 Modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur)	59
IV-4-Résultats de simulation sous Matlab-Simulink	61
IV-4-1-Résultats de simulation de filtre actif parallèle par régulateur PI	62
IV-4-1-1-Comportement du FAP en régime permanent	62
IV-4-1-1-1-Compensation des courants des harmoniques	62
IV.4-1- 2 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge)	64
IV.4-1-3- Interprétations des résultats	65
IV.4-2-Résultats de simulation de filtre actif parallèle par régulateur flou	66
IV-4-2-1- résultat de simulation	66
IV.4-2-2- Interprétations des résultats	68
IV-5- conclusion	69
Conclusion général	71
Bibliographiques	

LISTE DES FIGURE

Chapitre I: Généralités sur les perturbations des réseaux électriques et les principe de compensation.

Figure I. 1: creux de tension.....	5
Figure I. 2: coupure de tension.....	5
Figure I. 3: Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.	6
Figure I. 4: Variation de la fréquence.	7
Figure I. 5: Fondamental et inter-harmoniques.	7
Figure I. 6: Représente la décomposition d'un signal périodique.....	9
Figure I. 7: Spectre d'un signal de composante fondamentale 50 Hz, et comportant des harmoniques de rangs 3 (150 Hz), 5 (250 Hz), 7 (350 Hz) et 9 (450 Hz).....	14
Figure I. 8: Structure d'une charge linéaire résistive triphasé.....	15
Figure I. 9: Formes d'ondes de la tension et courant absorbé par une charge résistive.	15
Figure I. 10: Pont redresseur à diode débite sur une charge inductive.....	16
Figure I. 11: Diagramme de Fresnel des puissances.	16
Figure I. 12: Filtre passif résonant.	20
Figure I. 13: Filtre passif amorti.....	21
Figure I. 14: Filtre actif parallèle.	23
Figure I. 15: Filtre actif série.....	23
Figure I. 16: Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC).	24
Figure I. 17: Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	25
Figure I. 18: Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.	25
Figure I. 19: Filtre actif série avec filtre passif parallèle.	26
Figure I. 20:Le schéma de principe d'un redresseur à MLI de tension.....	27
Figure I. 21:Topologie d'un redresseur MLI triphasé de courant.	27

Chapitre II:

Structure du filtre actif parallèle de puissance et principe de fonctionnement.

Figure II . 2: Structure du FAP.....	32
Figure II . 3: Onduleur de tension triphasé.....	32
Figure II . 4: Synoptique de la P.L.L classique.	38
Figure II . 5: Synoptique détaille de la P.L.L classique.	38
Figure II . 6: Schéma simplifié de la P.L.L.	39
Figure II . 7:Schéma de commande par hystérésis.....	40

Figure II . 8: principe de commande par MLI	41
Figure II . 9: boucle de régulation de tension continue	42
Figure II . 10: Boucle de régulation des courants du filtre actif parallèle	43

Chapitre III:

La commande par logique floue.

Figure III . 1: Variable linguistique.....	46
Figure III . 2: Quelques différentes formes de fonctions d'appartenance.....	47
Figure III . 3 : Structure interne d'un système flou.....	49
Figure III . 4: Structure de base d'un régulateur flou.....	50
Figure III . 5: Schéma de principe d'un régulateur flou.....	51
Figure III . 6: illustrative de deux entrées et d'un régulateur floue.	51
Figure III . 7: Partition floue de e	52
Figure III . 8: Partition floue de Δe	52
Figure III . 9: Partition floue de cde	52
Figure III . 10: Établissement des règles floues en fonction du sens d'évolution et du signe algébrique de e	53

Chapitre IV: Modélisation et Simulation Numérique.

Figure IV . 1: Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluant.....	56
Figure IV . 2: Schéma bloc de méthode des puissances instantanées avec la régulateur flou.	57
Figure IV . 3: Schéma synoptique d'un réseau triphasé.	58
Figure IV . 4: Schéma d'une charge non-linéaire (un pont redresseur).....	58
Figure IV . 5: Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé.	59
Figure IV . 6: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.....	61
Figure IV . 7: Résultats de simulations de: I_{ch} : Courant de charge , I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur et V_s : Tension de source.	63
Figure IV . 8: Courant source I_s avant filtre et son analyse spectrale.....	64
Figure IV . 9: Courant source I_s après filtre et son analyse spectrale.	64
Figure IV . 10: Résultats de simulations de: I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur et V_s : Tension de source.	65
Figure IV . 11: Résultats de simulations de: I_{ch} : Courant de charge , I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur et V_s : Tension de source.	67
Figure IV . 12: Courant source I_s avant filtre et son analyse spectrale.....	68
Figure IV . 13: Courant source I_s après filtre et son analyse spectrale.	68

LISTE DES TABLEUX

Chapitre I:

Généralités sur les perturbations des réseaux électriques et les principe de compensation.

Tableau I. 1: Caractéristiques de quelques générateurs d'harmoniques.	13
Tableau I. 2: Limites de perturbations définies par <i>EN 50160</i>	17
Tableau I. 3: Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension (Norme <i>CEI 61000-2-2</i>).....	18

Chapitre II:

Structure du filtre actif parallèle de puissance et principe de fonctionnement.

Tableau II . 1:Tensions en sortie de l'onduleur.....	33
--	----

Chapitre IV:

Modélisation et Simulation Numérique.

Tableau IV. 1:Tensions générées par l'onduleur.	60
Tableau IV. 2: Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.	62
Tableau IV. 3:Les résultat des simulations.	69

LISTE DES SYMBOLES

U_f	La tension de fourniture(V).
U_n	La tension nominale de réseau électrique (V).
h ou k	La range des harmoniques.
f_h	La fréquence de la composante harmonique de rang h (H_z).
f_1	La fréquence de la composante fondamentale(H_z).
f, f_s	La fréquence fondamentale du réseau(H_z).
$S(t)$	Un signal périodique peut représenter un courant(A)ou une tension (V).
T	Un période (S).
ω, ω_s	La pulsation de réseau (rad_s).
a_0	Composante continue de la signal $S(t)$ périodique.
a_n, b_n ou a_h, b_h	Sont les coefficients de la série de Fourier.
C_h	L'amplitude l'harmonique de rang h .
θ_h	Phase de l'harmonique de rang h (°).
C_{eff}	La valeur efficace de l'amplitude l'harmonique de rang h .
S_{eff}	La Valeur efficace d'une grandeur d'harmonique.
S_{eff_h}	Les valeurs efficaces des différentes harmoniques du signales.
S	La puissance apparente (VA).
P	La puissance active (W).
Q	La puissance réactive(Var).
D	La puissance déformante.
V	La tension (V).
I_{eff_h}	La valeur efficace du courant de l'harmonique(A).
ϕ_1	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente(degré).
γ	Le déphasage entre S_1 et S .
S_1	la puissance apparente dans le cas d'un système équilibré linéaire.
φ	Le déphasage entre la puissance active et la puissance apparente S .
N	Un nombre de convertisseur triphasé.
P	Indice de pulsation.
M	Sera à indice de pulsation.
f_r	Fréquence de résonance (H_z).
L	L' inductance(H).
C	le condensateur(F).
R	Le résistance(Ω).
i_{inj}, i_f	Courant injecte dans la réseau par filtre actif parallèle(A).
I_d	Le courant de charge coté continu(A).
U_d	La tension de charge coté continu(V).

P_{cc}	Point de couplage commun.
i_{c_a}	Courant de la charge active (A).
i_{c_r}	Courant de la charge réactive(A).
i_h	Courant de la charge harmonique(A).
$i_f \{1, 2,3\}$	Le courant fournit par le filtre actif (A).
$i_s \{1, 2,3\}$	Le courant fournit par la source(A).
$L_c \{1, 2,3\}$	Inductance du réseau couté charge (H).
$R_c \{1, 2,3\}$	Résistance du réseau couté charge(Ω).
$R_s \{1, 2,3\}$	Résistance du réseau couté source(Ω).
$L_s \{1, 2,3\}$	Inductance du réseau couté source(H)
$e_s \{1, 2,3\}$	Tensions simples du réseau au début de la ligne (V).
$R_f \{1, 2,3\}$	Les résistances de couplage(Ω).
$L_f \{1, 2,3\}$	Les inductances de couplage(H).
$v_s \{1, 2,3\}$	Tension de source(V).
v_{dc}	Tension aux bornes du condensateur(V).
i_{dc}	Courant aux bornes du condensateur(A).
C_{dc}	Capacité du condensateur (F).
$S\{1,2,3,4,5,6\}$	Etats des interrupteurs de l'onduleur.
C_f	Capacité de filtre de sortie(F).
N	La neutre.
$C\{1,2,3\}$	Etats logiques de la commende de l'onduleur.
α, β	Paramètres du repère de <i>Clark</i> .
f_c	La fréquence de commutation des interrupteurs du filtre actif.(H_z).
v_{dc}	Différence entre les tensions du condensateur v_{dc1}, v_{dc2} .
v_{dc}^m n	Tension minimale aux bornes du condensateur(V).
ω_h	La pulsation la plus faible des harmoniques à compenser (rad/s).
$v_{f_{max}}$	La valeur maximale de la tension à l'entrée de l'onduleur(V).
$v_{s_{max}}$	La valeur maximale de la tension simple au point de raccordement du filtre(V).
ΔT	La période de variation du courant du filtre
f_{ond}	La fréquence de variation du courant du filtre.
α	La pente de la porteuse triangulaire.

f_c	Fréquence de coupure (H_z).
$v_s(\alpha, \beta, 0)$	Tensions estimées du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère stationnaire(V).
$i\{\alpha, \beta, 0\}$	Courants du réseau électrique dans le repère stationnaire (A).
$i_{ch}\{1, 2, 3\}$	Courants de charges(A).
i_n	Courant du neutre (A).
i_0	Courant homopolaire(A).
$p(t)$	Puissance réelle(W).
$p_0(t)$	Puissance homopolaire(W).
$q(t)$	Puissance imaginaire.
$\overline{p}, \overline{q}$	Puissance continue liée à la composante fondamentale du courant et de la tension.
p, q	Puissances alternatif correspondantes à la somme les composantes perturbatrices du courant et de la tension
Δ	Déterminé $v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$.
$I_{réf}$	Courant de référence (A).
$I_{h,réf}\{1,2,3\}$	Courants de référence du réseau électrique(A).
$I_{h,réf}\{\alpha, \beta, 0\}$	Courants de référence du réseau électrique dans le repère stationnaire (A).
K	Constante du FMV.
ε	L'amplitude de l'onde triangulaire.
$X_{\alpha\beta}$	L'entrée mesurée.
$\overline{i}_d, \overline{i}_q$	Courant continu (A).
i_d, i_q	Courant alternatif(A).
$v_s\{d, q, 0\}$	Tensions estimées du réseau électrique au point de raccordement du filtre actif dans le repère <i>Park</i> (V).
k_c, ζ_c, τ_c	Paramètres du régulateur P+FPB utilisé pour la régulation de tension aux bornes du condensateur.
P_c	Puissance active consommée par la charge.
$k, \zeta_i, \tau_i, \omega_i$	Paramètres du régulateur P+FPB utilisé pour la régulation de courant injecté.
v_p	L'amplitude de la porteuse triangulaire (V).
R_{ch}, L_{ch}	Charge non-linéaire.
L_{tot}	Inductance totale de ligne(H).
$i_{ch,moy}$	Le courant moyen de la charge non linéaire(A).
$i_{ch,fond}$	Le courant fondamental de la charge (A).
I_{SC}	Courant de court-circuit (A).

LISTE DES ABREVIATIONS

<i>THD</i>	En anglais: Taux de Distorsion Harmonique.
<i>F_p</i>	Facteur de puissance.
<i>IGBTs</i>	En anglais: Insolâtes Gâte Bipolaire Transistor.
<i>MOSFE</i> <i>T_s</i>	En anglais: Metal Oxyde Semi-Conductor Field Effect Transistor.
<i>GTO</i>	En anglais: Gate Turn-Off Thyristor .
<i>MLI</i>	Modulation de Largeur d'Impulsion (En anglais: <i>PWM</i>, Pulse width Modulation).
<i>VSC</i>	Onduleur de tension ou (En anglais: <i>Voltage Source Converter</i>).
<i>FAP</i>	Filtre Actif Parallèle.
<i>FAS</i>	Filtre Actif Série.
<i>UPQC</i>	En anglais: Unified Power Quality Conditioner.
<i>IEEE</i>	En anglais: Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<i>CEI</i>	En anglais: Commission Electrotechnique Internationale.
<i>IGBT</i>	En anglais: Isolated Gate Bipolar Transformer.
<i>PLL</i>	En anglais: Phase -Locked Loop (Boucle de verrouillage de phase).
<i>FFT</i>	La Transformée de Fourier Rapide.
<i>DFT</i>	La Transformée de Fourier Discrète .
<i>RDFT</i>	La transformée de Fourier discrète récursive.
<i>PIRI</i>	Puissance Instantanée Réelle et Imaginaire.
<i>PID</i>	Régulateur :Proportionnelle Intégral, Dérivation .
<i>F.e.m.</i>	Force électromotrice.
<i>FPH</i>	Filtre Passe Haut
<i>BT</i>	Basse Tension
<i>MT</i>	Moyenne Tension

Introduction général

Introduction général :

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux d'énergie électrique est devenue très préoccupante, la qualité du courant dans les installations électriques se dégrade incontestablement. Elle devient donc une préoccupation importante pour les distributeurs de cette énergie et pour leurs clients. Cette dégradation découle directement de la prolifération des charges qui consomment un courant non sinusoïdal, appelées « charges non linéaires ». Ce type de charge est utilisé pour assurer la conversion, la variation et la régulation du courant électrique dans les installations commerciales, industrielles et résidentielles, Ces perturbations sont la cause principale d'une dégradation du facteur de puissance et d'une génération de courants alternatifs non sinusoïdaux riches en harmoniques[1].

Ces harmoniques de courant vont à leur tour générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion au réseau. Pour les autres équipements électriques connectés en ces points, cette pollution harmonique a des effets nocifs. Parmi ces effets, on peut notamment citer la déformation de la tension réseau au point de raccordement alors que le distributeur d'énergie est tenu de fournir une tension propre. Cette pollution peut également conduire à l'échauffement des câbles et des équipements électriques ou bien encore à l'arrêt soudain de machines tournantes, voire la destruction totale de tous ces équipements [2].

Pour pallier aux problèmes de pollution harmonique dans les réseaux électriques de distribution plusieurs solutions ont été proposées pour limiter les harmoniques de courant injectés dans le réseau par des charges non linéaires, parmi elles : Les filtres passifs, qui sont souvent appelés filtres piègeurs d'harmoniques, ont été utilisés pour éliminer les harmoniques de courants et améliorer le facteur de puissance . Malgré sa simplicité et son faible coût, le filtre passif est lié aux variations de l'impédance de la source et peut mener à une résonance non voulue avec le réseau. De plus, ce type de filtre présente une non- adaptabilité aux variations de la charge et du réseau. Grâce aux progrès remarquables réalisés au cours des dernières années dans le domaine d'électronique de puissance et l'électronique numérique, ont permis de concevoir des dispositifs de filtrage modernes des harmoniques auto-adaptables appelés filtrage actifs. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des tensions harmoniques de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation de la qualité d'énergie [3].

Les filtres actifs ont un classement suivant leur type d'installation, on trouve alors : le filtre actif série, le filtre actif parallèle, la combinaison parallèle-série actif (aussi appelés UPQC) et la combinaison hybride active et passive. Cependant le type le plus répandu est le filtre actif parallèle, il est chargé de l'annulation des courants harmoniques parvenant sur le réseau électrique. Le principe du filtre actif parallèle consiste à générer des courants harmoniques en opposition de phase à ceux existants sur le réseau [4].

Cependant le filtrage actif présente également ses inconvénients spécifiques, notamment son coût élevé pour des applications industrielles ; le dimensionnement du convertisseur de puissance du filtre actif peut alors être relativement élevé. Pour cette raison majeure, les applications des filtres actifs de puissance dans les systèmes électriques sont aujourd'hui encore limitées bien que des normes fixent les caractéristiques exigées pour la qualité de l'énergie [5].

le but de ce mémoire est de démontrer l'efficacité du filtrage parallèle des harmoniques qui permet l'adaptation à la charge en temps réel aux harmoniques nécessaires, donnant une performance quasi constante et indépendante du taux de charge.

Ce mémoire a été structuré comme suit:

Dans le premier chapitre, nous présentons les perturbations des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Ensuite, les origines/les conséquences de cette pollution harmonique avec la citation des normes et réglementations imposées aux utilisateurs, ainsi que les solutions classiques et modernes pour la réduction des harmoniques.

Dans le deuxième chapitre, sera consacré à la structure du filtre actif parallèle de puissance ainsi que son principe de fonctionnement. Nous avons présenté les différentes méthodes d'identification des courants harmoniques des références, les principaux types de commande d'onduleur, et la régulation de bus continue.

Dans le troisième chapitre est consacré aux généralités de la logique floue, c'est-à-dire en l'introduisant en mentionnant ses caractéristiques et les règles mathématiques présentes en elle, en plus d'expliquer son mécanisme de travail qui nous permet de l'utiliser en régulateur pour commander le filtre actif parallèle afin d'atteindre une haute efficacité de ce filtre .

Dans le quatrième chapitre nous présentons la modélisation de l'ensemble, réseau-charge polluante-filtre actif, ensuite les résultats de simulation obtenus à partir de l'environnement Matlab/Simulink.

Chapitre I

*Généralités sur les perturbations des
réseaux électriques*

I.1 Introduction:

Dans l'industrie, des systèmes commandés à base d'électronique de puissance provoquent de plus en plus des problèmes de perturbations au niveau des réseaux électriques, tels que les distorsions harmoniques, les déséquilibres, le papillotement, les coupures brèves, les creux de tension, les surtensions temporaires, et les surtensions transitoires. En outre, ces perturbations peuvent générer des nuisances, pannes ou des dégâts par l'affectation d'un ou plusieurs paramètres de la tension du réseau électrique, suivants: la fréquence, l'amplitude, la symétrie des tensions triphasées et la forme de l'onde. [6]

Dans ce chapitre, nous étudierons les caractéristiques générales des perturbations électriques. Ainsi, nous détaillerons les origines, les conséquences matérielles de ces perturbations et nous présenterons des solutions de compensation de ces perturbations généralement. [7]

I.2 Perturbation électrique:

De nos jours, le besoin en électricité dans la vie quotidienne de la population et l'exigence de cette dernière ont vu une importante progression des dispositifs à base des convertisseurs statiques avec des puissances unitaires de plus en plus importantes, L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont la fréquence, l'amplitude, la forme d'onde, le déséquilibre[5,8].

La mesure de ces paramètres permet de juger la qualité de la tension. Une détérioration, de l'un d'entre eux ou de plusieurs à la fois, laisse supposer la présence d'une anomalie dans le réseau électrique. La qualité du réseau est affectée soit par des accidents naturels au sein du réseau, soit par certains récepteurs, Des défauts du réseau électrique apparaissent sur l'un des paramètres mentionnés ci-dessus. Nous allons donc déterminer quatre possibilités pour ces perturbations [6,8] :

- ✓ **Les fluctuations de la fréquence à 50 Hz** : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles.
- ✓ **Les variations de l'amplitude de la tension** : il ne s'agit pas des variations lentes de tension qui sont corrigées par les transformateurs de réglage en charge, mais de variations rapides de tension se présentant souvent sous forme d'un- coups brusques.
- ✓ **La dissymétrie du système triphasé**, que l'on appelle déséquilibre .

- ✓ **La modification de la forme d'onde** : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence multiple entier de 50 Hz, soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

I.2.1 Creux et coupures de tension :

un creux de tension (sag ou dip en anglais), Il s'est avéré qu'une chute de tension se produit lorsque cette dernière manifeste une diminution d'amplitude entre 10% et 90% de sa valeur nominal (U_n) pendant une durée allant de 10 ms à 1 minute, suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau (8 ms à 16 ms) et une minute.

Il s'agit d'événements aléatoires imprévisibles pour la plupart des cas (Figure .I.1), les coupures sont un cas particulier de creux de tension de profondeur supérieure à 90% (Figure .I.2) [6,9].

Ces deux types de perturbation peuvent être dus à divers dysfonctionnement dans les réseaux électriques, notamment, des défauts engendrés par les équipements connectés et des courants d'appel [9].

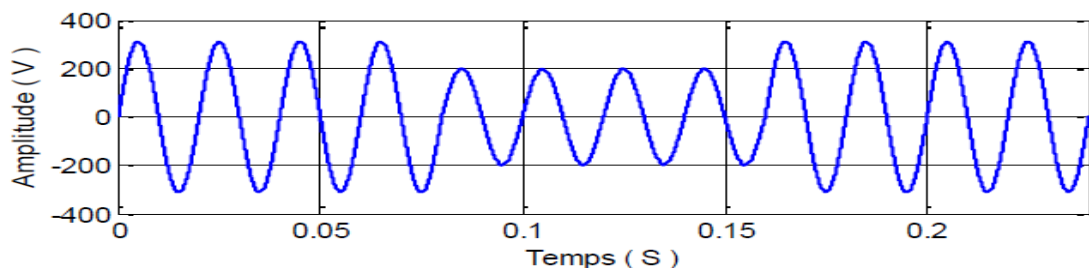


Figure I. 1: creux de tension.

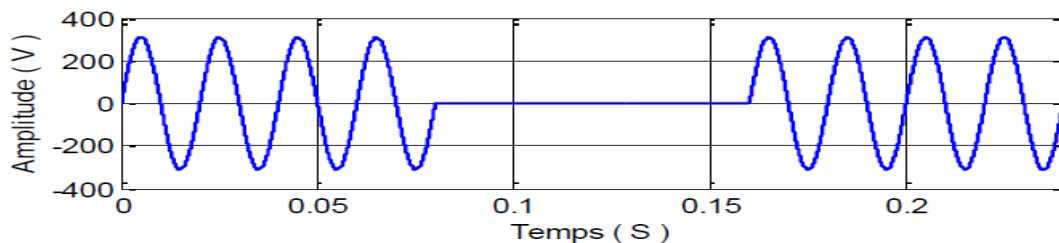


Figure I. 2: coupure de tension.

I.2.2 Fluctuations des tensions:

Une fluctuation de tension est décrite comme une variation de l'enveloppe de la tension. L'amplitude de celle-ci doit se situer dans une bande de 10% de sa valeur nominale [3].

il apparaît que la cause première des variations de tension est la variabilité temporelle de la composante réactive de la puissance appelée par la charge fluctuante.

Les charges fluctuantes sont typiquement : les fours à arc, les laminoirs les enrouleurs, etc..., en règle générale, des charges fortement fluctuantes et dont la puissance est proche de la puissance de court-circuit au point de raccordement de charge[10].

Quelques solutions pour s'en débarrasser :

- ✓ Modification du type d'éclairage.
- ✓ Modification de la structure du réseau.
- ✓ Adaptation du fonctionnement du perturbateur.
- ✓ Installation d'un équipement de réduction du flicker [3].

I.2.3 Déséquilibre du système triphasé de tension:

Le phénomène de déséquilibre est défini comme étant une différence d'au moins une des 3 tensions du réseau électrique soit en amplitude soit en déphasage, ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres [3,11].

Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau [11].

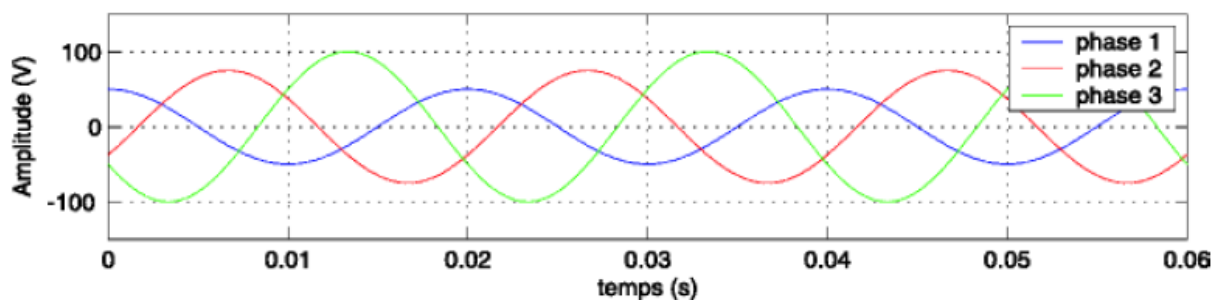


Figure I. 3: Cas particulier de déséquilibre du système triphasé de tension.

I.2.4 Variation de fréquence:

La variation de fréquence est extrêmement rare dans les systèmes d'alimentation électriques. Les consommateurs non interconnectés au réseau sont concernés par cette variation dont la tolérance de la fréquence est de 1 % quand la fréquence est de 50 Hz [9].

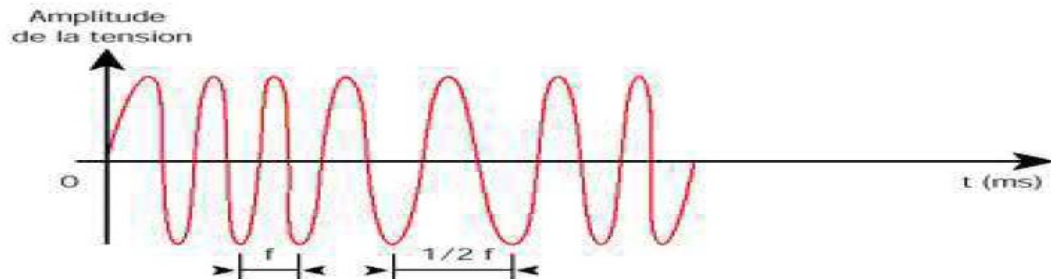


Figure I. 4: Variation de la fréquence.

I.2.5 Harmonique et inter harmonique :

Les harmoniques sont une superposition à l'onde fondamentale (50Hz) des ondes sinusoïdales mais de fréquences multiples entier du fondamental. La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation intensive des convertisseurs statiques. Les inter harmoniques sont superposés à l'onde fondamentale mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence des réseaux. Comme montre la Figure.I.5. [9]

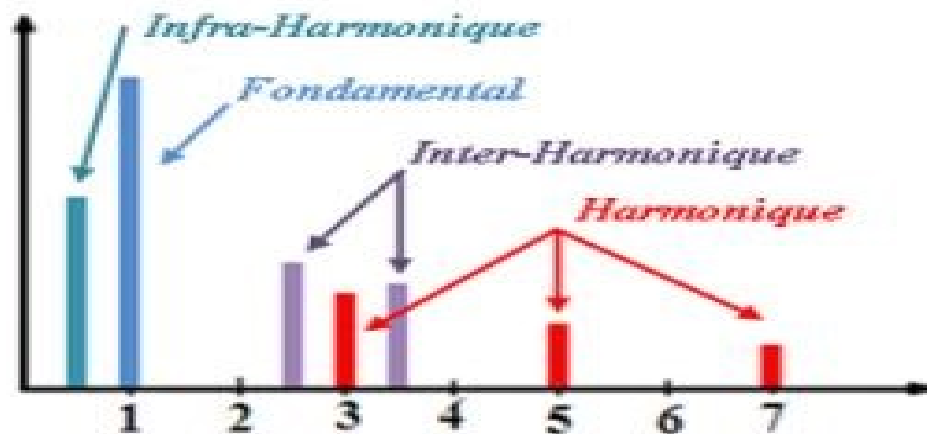


Figure I. 5: Fondamental et inter-harmoniques.

I.2.6 Conséquence néfastes des harmoniques:

Les courants et les tensions harmoniques ont des effets néfastes sur le fonctionnement, la rentabilité et la durée de vie des équipements électriques. Bien que les susceptibilités des différents équipements et appareils électriques, raccordés à un réseau pollué, soient très diversifiées [12].

- ✓ **Lignes** : pertes ohmiques supplémentaires.
- ✓ **Transformateurs** : pertes supplémentaires dans les enroulements par effet joule et dans le noyau par courant de Foucault .
- ✓ **Moteur à courant alternatif** : pertes supplémentaires dans le fer et les enroulements principalement liées aux harmoniques de tension.
- ✓ **Condensateur de puissance** : pertes diélectrique supplémentaires conduisant aux vieillissements rapide du condensateur.
- ✓ **Équipement de l'électronique de puissance** : dysfonctionnement lié à la déformation de la tension.
- ✓ **Ordinateurs** : trouble fonctionnels liés à la distorsion de la tension.
- ✓ **Lignes téléphoniques** : génération des bruits importants liés au couplage électromagnétique entre les lignes de puissance et les circuits de communication [13] .

I.3 Origines des harmoniques:

Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau. Ces perturbations résultent de la superposition, sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental [12] .

I.3.A Charge non-linéaire :

Une charge est dite : non linéaire lorsque le courant qu'elle absorbe n'a pas la même forme que la tension qui l'alimente. Typiquement, les charges utilisant l'électronique de puissance sont non-linéaires. Or, elles sont de plus en plus nombreuses et leur part dans la consommation d'électricité ne cesse de croître. Par exemple de charges non-linéaire, on peut citer [14] :

- ✓ les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs).
- ✓ les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu.
- ✓ les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, ...)
- ✓ les appareils domestiques (TV, fours micro-onde, éclairage néon, ...)
- ✓ les onduleurs.

I.3.B Déformation d'un signal sinusoïdal :

Les dispositifs générateurs d'harmoniques sont présents dans tous les secteurs industriels, tertiaires et domestiques. Les harmoniques sont le fait de charges non linéaires.

Le théorème de Fourier indique que toute fonction périodique non sinusoïdale peut être représentée sous la forme d'une somme de termes (série) qui est composée [4] :

- ✓ D'un terme sinusoïdal à la fréquence fondamentale.
- ✓ De termes sinusoïdaux dont les fréquences sont des multiples entiers de la fondamentale (harmoniques).
- ✓ Et d'une éventuelle composante continue.

Exemple : décomposition d'un signal périodique.

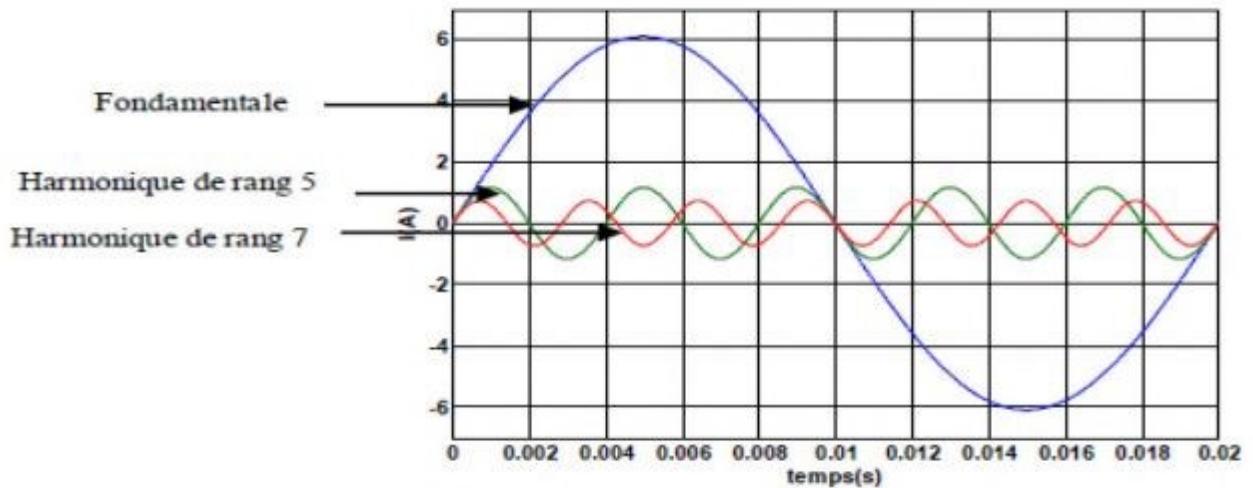


Figure I. 6: Représente la décomposition d'un signal périodique.

Un harmonique de rang h est la composante sinusoïdale d'un signal dont la fréquence vaut h fois la fréquence fondamentale.

La formule correspondant à la décomposition harmonique d'une fonction périodique est la suivante [8] :

$$\text{avec : } Y = Y_0 + \sum Y_n \cos(n\omega t - \varphi_n) \quad (\text{I-1})$$

- Y_0 : valeur de la composante continue généralement nulle et considérée comme telle par la suite :

- Y_n : valeur efficace de l'harmonique de rang n.
- ω : pulsation de la fréquence fondamentale.
- φ_n : déphasage de la composante harmonique.

Dans le cas des signaux que sont les ondes de courant et de tension du réseau électrique [4]:

- ✓ la fréquence fondamentale (ou harmonique de rang 1) a pour valeur 50 hertz (Hz).
- ✓ l'harmonique de rang 2 a une fréquence de valeur 100 Hz.
- ✓ l'harmonique de rang 3 a une fréquence de valeur 150 Hz.
- ✓ l'harmonique de rang 4 a une fréquence de valeur 200 Hz.

Un signal déformé est la résultante de la superposition des différents rangs d'harmoniques [4].

I.3.1 Effets instantanés :

Les effets instantanés concernent les appareils produisant une image électronique (écrans d'ordinateurs, télévisions), les appareils produisant un son censé être de bonne qualité (chaîne HI-FI, téléphonie) ou la précision des appareils de mesure [14].

- ✓ Déclenchements intempestifs des protections.
- ✓ Perturbations induites des systèmes à courants faibles (télécommande, télécommunication, écran d'ordinateur, téléviseur...).
- ✓ Vibrations et bruits acoustiques anormaux (tableaux BT, moteurs, transformateurs).
- ✓ Destruction par surcharge thermique de condensateurs.
- ✓ Perte de précision des appareils de mesure [7].

I.3.2 Effets à terme:

Les effets différés sont souvent liés à un sur échauffement plus ou moins important. Ces effets sont dus essentiellement à deux phénomènes :

- L'échauffement des conducteurs ou des composants traversés par les courants harmoniques.
- Le vieillissement des isolants. Il peut être dû soit à une contrainte en tension consécutive à la présence de tensions harmoniques, et donc à une augmentation locale des courants de fuite, soit à l'échauffement exagéré provoqué par l'échauffement des conducteurs [14].

I.4 Les techniques de dépollution des réseaux électriques:

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 communément appelé filtres passifs. Le rôle de ces filtres est l'absorption des harmoniques et la réduction concomitante du THD. Leur principe consiste à placer, en parallèle avec le réseau d'alimentation, une impédance de valeur très faible autour de la fréquence à filtrer et suffisamment importante à la fréquence fondamentale du réseau [8].

- ✓ Agir sur la structure de l'installation .
- ✓ Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique.
- ✓ Renforcement de la puissance de court-circuit.
- ✓ Rééquilibrage des courants du réseau électrique.
- ✓ Filtrage passif .[15]

I.5 Grandeurs caractéristiques:

I.5.1 Grandeur harmonique :

C'est l'une des composantes sinusoïdales de la variation d'une grandeur physique possédant une fréquence multiple de celle de la composante fondamentale. L'amplitude de l'harmonique est généralement de quelques pour cent de celle du fondamental[16].

I.5.2 Rang de l'harmonique:

C'est le rapport de sa fréquence (f_n) a celle du fondamentale [17] :

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (\text{I-2})$$

I.5.3 Série de Fourier :

Tout signal périodiques de période $T= 1/f$, peut se décomposer en une somme infinie des termes sinus et cosinus de fréquences multiples de f ». Mathématiquement, cela s'écrit :

$$s(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt) \quad (\text{I-3})$$

La valeur a_0 représente la valeur moyenne de $s(t)$.

On calcule les coefficients a_n et b_n avec les formules suivantes :

$$a_n = \frac{2}{T} \int s(t) \cos(nwt) dt \text{ et } b_n = \frac{2}{T} \int s(t) \sin(nwt) dt \quad (\text{I-4})$$

De plus, il existe quelques prérequis qui permettent de ne pas faire de calculs inutiles :

- ✓ si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_0 est nulle .
- ✓ si la fonction est paire, les coefficients b_n sont nuls .
- ✓ si la fonction est impaire, les coefficients a_n sont nuls .
- ✓ si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls [16].

I.5.4 Valeur efficace d'une grandeur alternative:

La valeur efficace vraie (TRMS values: True Root Mean Square values) conditionne les échauffements. Pour une grandeur périodique non sinusoïdale, son expression est :

$$Y_{trms} = \sqrt{Y_0^2 + \sum_{h=1}^{\infty} (Y_h)^2} = \sqrt{(Y_0^2 + Y_1^2 + Y_2^2 + \dots + Y_h^2)} \quad (\text{I-5})$$

Cette définition est valable aussi bien pour les tensions que pour les courants. Il est à noter que pour une grandeur purement sinusoïdale, la valeur efficace correspond à sa valeur maximale divisée par la racine carrée de deux [18].

I.5.5 Taux de distorsion:

Notre étude se limite au cas où la source est sinusoïdale et/ou le courant absorbé par la charge est entaché de composants harmoniques. Dans ces conditions, le taux global de distorsion harmonique (THD) est bien adapté pour quantifier le degré de pollution harmonique sur les réseaux électriques [8].

Deux taux de distorsion harmonique sont distingués :

- ✓ Le taux de distorsion harmonique en courant, noté THD-I
- ✓ Le taux de distorsion harmonique en tension, noté THD-U

Le premier s'exprime sous la forme :

$$THD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^n I_n^2}{I_1^2}} \quad (\text{I-6})$$

Avec : I_1 la valeur efficace du courant fondamental et I_n la valeur efficace de rang harmoniques du courant n . Le THD-I ne dépend que des valeurs efficaces du courant de charge. En revanche, le THD-U est fonction des courants harmoniques, caractérisant la charge, et de l'impédance de court circuit, imposée par le réseau :

$$THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^n U_n^2}{U_1^2}} \quad (\text{I-7})$$

Avec : U_1 la valeur efficace de tension fondamental et U_n la valeur efficace de rang harmoniques de la tension n [19].

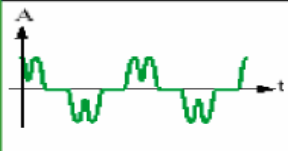
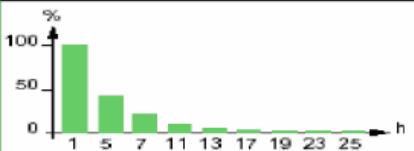

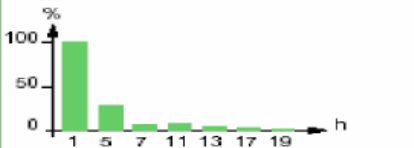
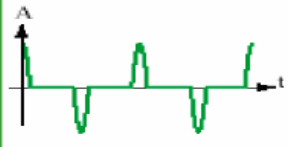
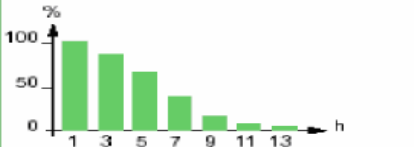
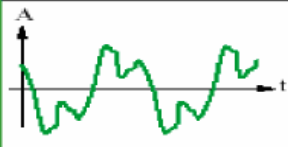

Charges non linéaires	Forme d'onde de courant	Spectre	THD
Variateur de vitesse			44 %
Redresseur / chargeur			28 %
Charge informatique Ordinateur			115 %
Eclairage fluorescent			53 %

Tableau I. 1: Caractéristiques de quelques générateurs d’harmoniques.

I.5.6 Facteur de puissance :

Le facteur de puissance est défini dans le cas général par le rapport de la puissance active sur la puissance apparente [17]:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}} \tag{I-8}$$

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

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{I-9}$$

L’expression du facteur de puissance peut alors se mettre sous la forme suivante :

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \tag{I-10}$$

I.5.7 Spectre d'harmonique (de fréquence) :

Une représentation essentielle pour les harmoniques c'est le spectre en fréquence. Il s'agit d'un moyen graphique très pratique pour apprécier les harmoniques en présence.

Le spectre est un histogramme fournissant l'amplitude de chaque harmonique en fonction de son rang.

Ce mode de représentation est également appelé analyse spectrale. L'examen du spectre permet d'apprécier à la fois quels sont les harmoniques en présence et leur importance respective. [4]

La figure I.7 représente le spectre du signal :

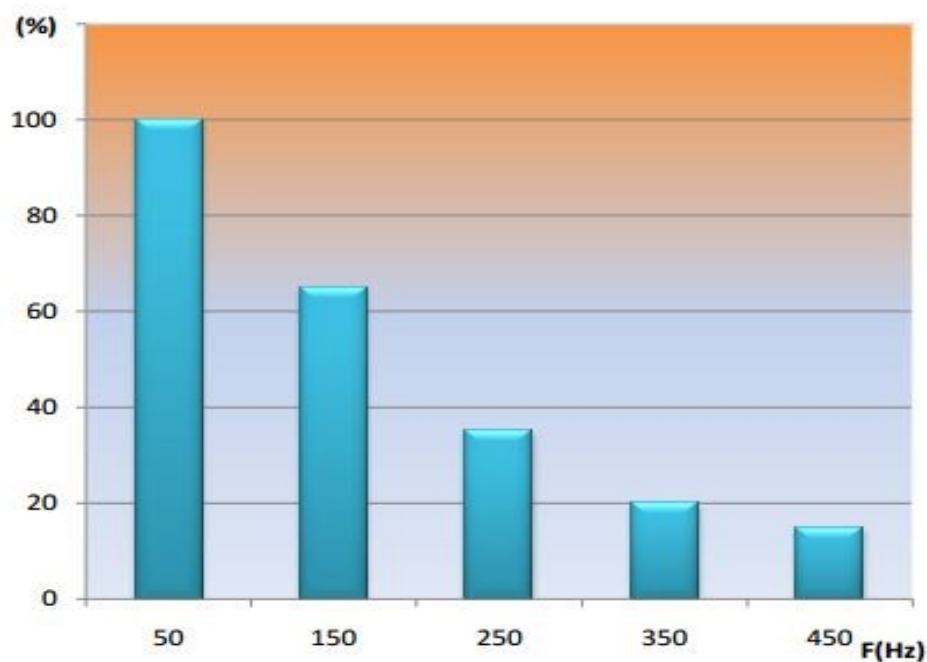


Figure I. 7: Spectre d'un signal de composante fondamentale 50 Hz, et comportant des harmoniques de rangs 3 (150 Hz), 5 (250 Hz), 7 (350 Hz) et 9 (450 Hz).

I.5.8 Charges linéaires et non linéaires :

I.5.8.1: Charges linéaires:

Une charge est dite linéaire, lorsqu'elle est alimentée par une source de tension sinusoïdale, elle absorbe un courant sinusoïdal, à titre d'exemple des charges linéaires les résistances, les inductances...etc. La Figure. I.8 illustre ce type des charges électriques [20].

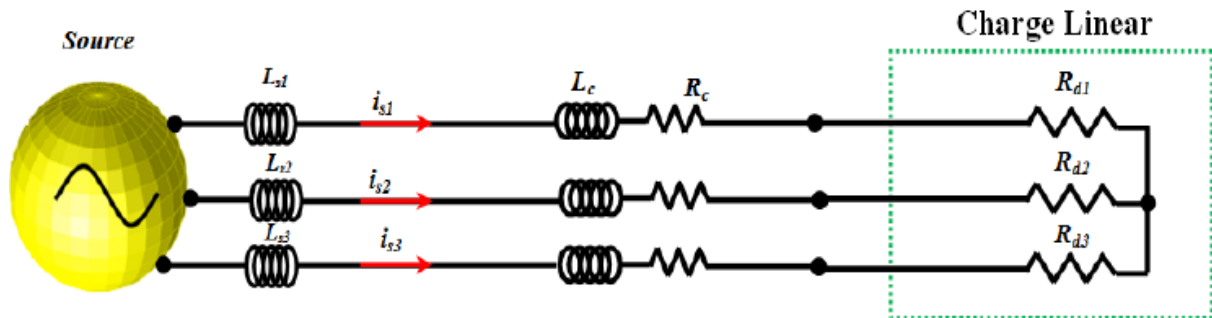


Figure I. 8: Structure d'une charge linéaire résistive triphasée.

Les formes d'ondes de la tension de source et du courant absorbé par une charge linéaire (résistance) sont représentées sur la Figure. I.9.

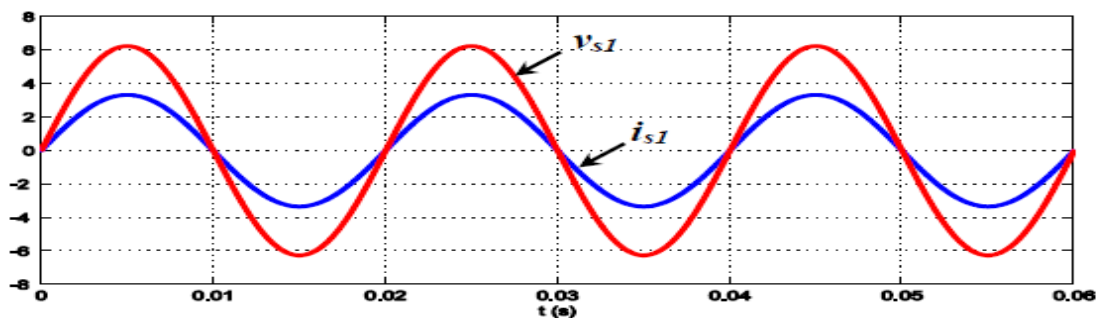


Figure I. 9: Formes d'ondes de la tension et courant absorbé par une charge résistive.

I.5.8.2: Charges non linéaires :

Si l'on alimente une charge non linéaire par une tension sinusoïdale, le courant circulant dans la charge n'est plus sinusoïdal. Ce courant peut être décomposé en une composante fondamentale et des harmoniques. La Figure. I.10 présente la structure d'une charge non linéaire représentée par un pont triphasé à diode débité sur une charge inductive, et alimenté par un réseau triphasé équilibré [20-8]

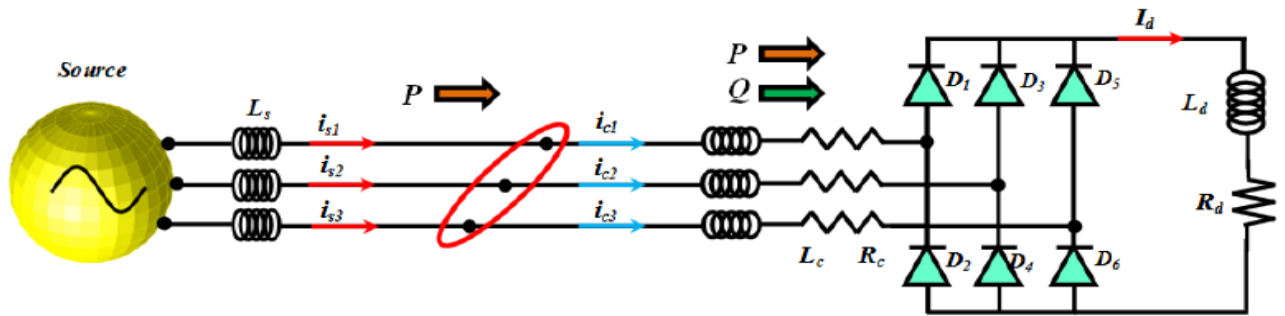


Figure I. 10: Pont redresseur à diode débite sur une charge inductive.

I.6 Influence des harmoniques sur le facteur de puissance FP:

Normalement, pour un signal sinusoïdal le facteur de puissance est donné par le rapport entre la puissance active P et la puissance apparente S. En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties ; actives P, réactive Q et déformante D. Cette dernière est la puissance provoquée par les courants harmoniques, comme montre par équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{I-11}$$

$$P = 3 \cdot U \cdot I_1 \cos \phi_1 \tag{I-12}$$

ϕ_1 : représente le déphasage entre le courant fondamental et la tension.

$$Q = 3 \cdot U \cdot I_1 \sin \phi_1 \tag{I-13}$$

$$D = 3 \cdot V_{eff} \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \frac{I_h^2}{h}} \tag{I-14}$$

Le facteur de puissance (F.P) devient :

$$F.P = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \tag{I-15}$$

Remarque : le facteur de puissance décroît à cause de la puissance déformante qui est générée par les perturbations harmoniques. [16]

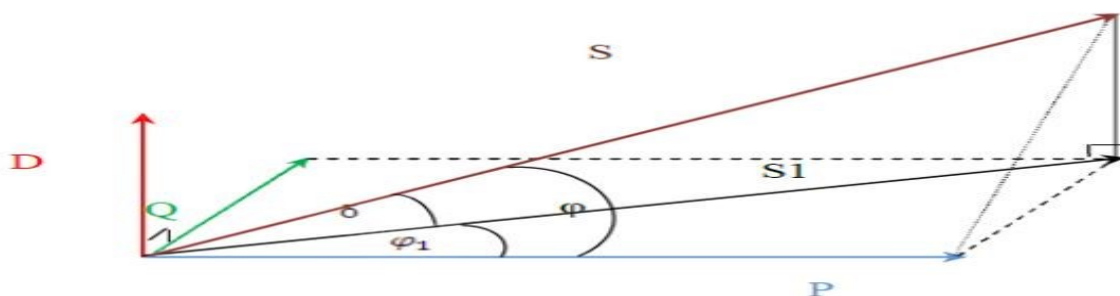


Figure I. 11: Diagramme de Fresnel des puissances.

I.7 Normes et réglementation de perturbation:

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 [4] :

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

Amplitude de la tension	<ul style="list-style-type: none"> • Pour chaque période d'une semaine 95% des valeurs efficaces moyennes sur 10 minutes doivent être dans la plage $V_n \pm 10\%$
Variations rapides de la tension	<ul style="list-style-type: none"> • De 5% à 10% de V_n (4 à 6% en moyenne tension)
Creux de tension	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur : entre 10% à 99% de V_n • Durée : entre 10 ms et 1 minute • Nombre : quelques dizaines à 1 millier par an
Coupures brèves	<ul style="list-style-type: none"> • Durée : jusqu'à 3 minutes • Nombre : quelques dizaines à plusieurs centaines par an
Coupures longues	<ul style="list-style-type: none"> • Durée : supérieure à 3 minutes • Nombre : entre 10 et 50 par an
Fréquence	<ul style="list-style-type: none"> • 50 Hz \pm 1% pendant 95% d'une semaine • 50Hz + 4%, 6% pendant 100% d'une semaine

Tableau I. 2: Limites de perturbations définies par *EN 50160*.

Ces recommandations concernent les exigences au point de raccordement de l'utilisateur sur le réseau électrique. Pour les réseaux électriques, les recommandations d'EDF pour les tensions sont.[4]

- harmoniques pairs : $V_h/V_1 < 0.6\%$
- harmoniques impairs : $V_h/V_1 < 1\%$
- taux de distorsion harmonique en tension : $THD < 1.6\%$

Ces limites sont destinées à minimiser le risque de voir le réseau d'alimentation général atteindre un taux de distorsion harmonique en tension supérieur à 5% , D'autre part, pour assurer la compatibilité entre les installations sensibles alimentées par le réseau, il faut imposer des limites d'émission et donner des niveaux d'immunité suffisants. Les caractéristiques principales de la tension fournie par un réseau de distribution (MT ou BT), définies par la norme Européenne EN 50160, précisent les tolérances qui doivent être garanties pour la tension et la fréquence ainsi que les niveaux des perturbations habituellement rencontrées. Le tableau I.2 suivant précise les valeurs adoptées .

Le tableau I.3, présente les caractéristiques et le niveau de compatibilité pour les harmoniques au point de raccordement du client pour un réseau satisfaisant la norme CEI 1000-2-4 [12]

Rangs impairs non multiples de 3		Rangs impairs multiples de 3		Rangs pairs	
Rang	Tension harm. (%)	Rang	Tension harm. (%)	Rang	Tension harm. (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.3	6	0.5
13	3	21	0.2	8	0.5
17	2	>21	0.2	10	0.5
19	1.5			12	0.2
23	1.5			>12	0.2
25	1.5				
>25	0.2+1.3*25/h				

Tableau I. 3: Niveau de compatibilité pour les tensions harmoniques sur les réseaux basse tension
(Norme CEI 61000-2-2)

I.8 Les 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. Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques [21] :

- ✓ Inductance anti-harmonique de protection des condensateurs .
- ✓ Inductance de lissage des courants .
- ✓ Confinement des harmoniques .
- ✓ L'utilisation de transformateurs à couplage approprié permettant de limiter la circulation des courants harmoniques .
- ✓ Augmentation de l'indice de modulation .
- ✓ Les filtres passifs qui sont utilisés pour empêcher les courants harmoniques de se propager dans les réseaux électriques. Ils peuvent aussi être utilisés pour compenser la puissance réactive. Malgré leur large utilisation dans l'industrie, ces dispositifs peuvent présenter beaucoup d'inconvénients [21,22]:
- ✓ Manque de souplesse à s'adapter aux variations du réseau et de la charge.
- ✓ Equipements volumineux.
- ✓ Problèmes de résonance avec l'impédance du réseau.

I.8.1 Surdimensionnement ou déclassement de l'installation électrique:

On procède généralement au surdimensionnement des équipements afin d'assurer leur tenue aux surcharges harmoniques. Cette solution n'agit pas sur les harmoniques qui ne subissent aucune action curative de la part de l'utilisateur. Par cette approche, les problèmes liés à la pollution harmoniques sont résolus pendant une durée limitée.

Le déclassement des équipements de distribution électrique soumis aux harmoniques est utilisé dans le cas des installations existantes. Cette méthode cause un surcoût de production et ne tire pas profit du potentiel réel de l'installation. [7].

I.8.2 Transformateurs à couplage spécial:

Le choix de couplages appropriés des transformateurs permet de limiter la circulation des courants harmoniques. L'utilisation d'un transformateur d'isolement, de rapport 1/1 à couplage triangle-étoile ou triangle-zigzag , empêche la propagation des courants harmoniques de rang 3 et leurs multiples circulant dans le neutre. Ce procédé n'a aucun effet sur les autres rangs harmoniques. Il limite au contraire la puissance disponible de la source et augmente l'impédance de ligne. Il en résulte une augmentation de la distorsion en tension due aux autres rangs harmoniques .

L'utilisation des transformateurs primaires étoiles (sans neutre) et à secondaires zigzags est une solution intéressante. Ce couplage permet d'avoir le minimum de distorsion au secondaire. En effet, dans ce cas, les courants harmoniques de rang $3 \cdot h$ ne circulent pas au primaire du transformateur et l'impédance Z_s ne dépend que des enroulements secondaires [3].

I.8.3 Inductances (selfs) série:

Cette solution, utilisée pour les entraînements à vitesse réglable (variateurs de vitesse) et les redresseurs triphasés, consiste à introduire une inductance série en amont d'une charge non linéaire. La self a cependant efficacité limitée. Il faut en installer une par charge non linéaire. La distorsion en courant est divisée approximativement par deux [14].

I.8.4 Filtre passif :

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

En général, les filtres d'harmoniques sont connectés en parallèle avec les charges injectant des courants harmoniques (les redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arcs électrique, etc.). L'association d'éléments capacitifs et inductifs en parallèle avec la charge polluante permet d'obtenir une résonance série accordée sur les rangs harmoniques à éliminer [22].

I.8.4.1: Filtre passif résonant :

Qui sont constitué d'un circuit LC série avec résistance utilisée généralement pour éliminer les harmoniques de rang 5 et 7. [9]

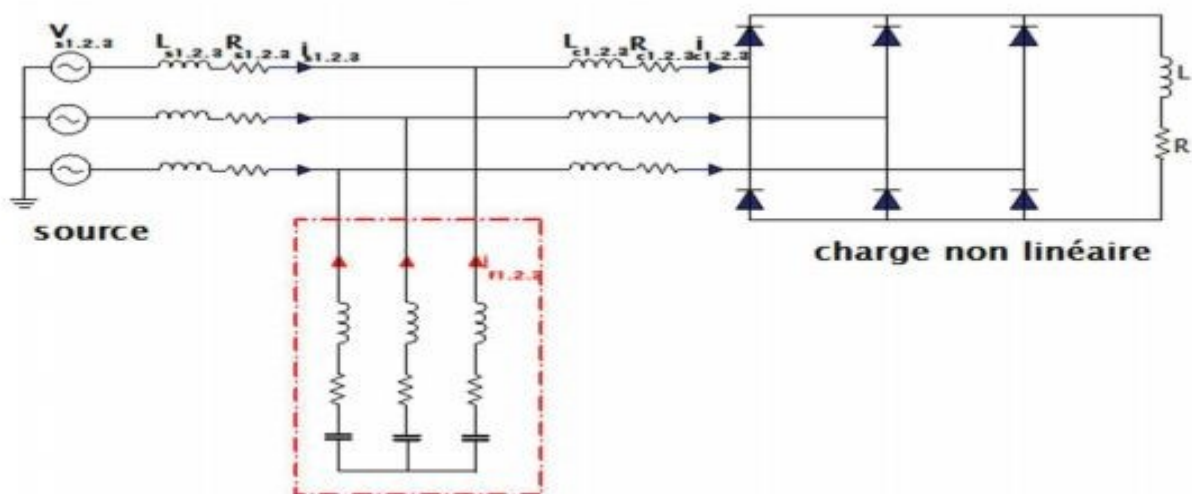


Figure I. 12: Filtre passif résonant.

Le rang d'accord 'ha' correspond au multiple, entier ou non, de la fréquence nominale du réseau. La pulsation de résonance du filtre est:

$$\omega_a = 2\pi \cdot f_a = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (\text{I-16})$$

I.8. 4.2: Filtre passif amorti :

C'est un filtre passe haut constitué d'une inductance en parallèle avec une résistance, le tout en série avec un condensateur comme décrit sur la figure I.13.[23]:

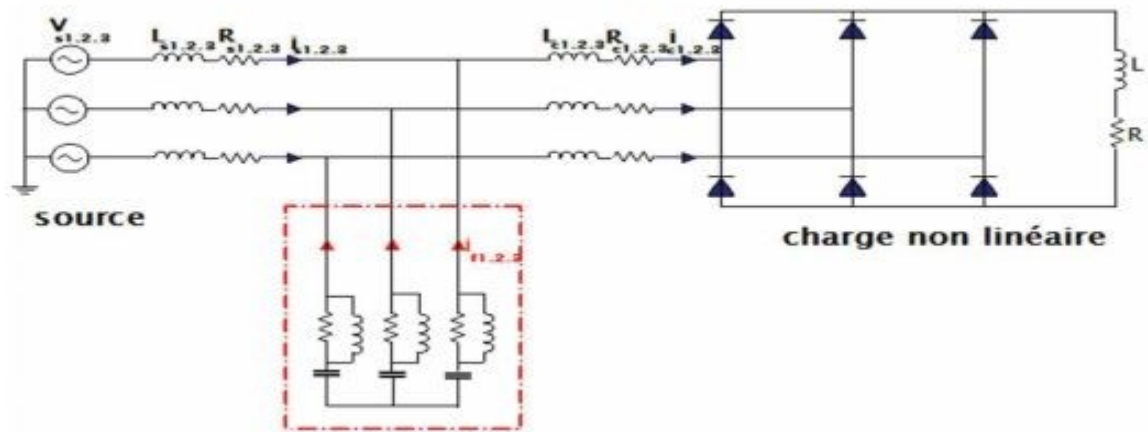


Figure I. 13: Filtre passif amorti.

I.8.5 Agir sur la structure de l'installation :

Il est souhaitable d'alimenter un grand pollueur par un transformateur à part, afin de le séparer d'un récepteur sensible. Face à un pollueur moyen il est préférable d'effectuer l'alimentation par des câbles distincts au lieu de les connecter en parallèle. Une distribution en étoile permet le découplage par les impédances naturelles et/ou additionnelles [24].

I.8.6 Pont dodécaphasé :

La structure dodécaphasée présente des caractéristiques très intéressantes par rapport à celle hexaphasée. Cependant, le nombre de semi-conducteurs utilisés et le transformateur à deux enroulements au secondaire rendent cette solution onéreuse [13].

I. 9 Solutions modernes de dépollution :

Les progrès remarquables réalisés d'une part dans le domaine des composants semi-conducteurs, comme les *IGBT*, *IGCT*, *GTO* et *MOSFET*, ainsi que la maîtrise de leur mise en œuvre et d'autre part l'existence de nouvelles méthodes de traitement analogique et numérique du signal, ont permis l'émergence de moyens modernes et efficaces pour faire face aux différentes perturbations (harmoniques, puissance réactive, fluctuations, creux de tension) affectant les systèmes électriques [25].

Parmi ces moyens modernes, nous pouvons citer [12] :

- les filtres actifs: parallèles, séries, hybrides et combinaisons des structures .
- les alimentations sans interruption .
- les dispositifs FACTS .
- les convertisseurs à prélèvement sinusoïdal.

I.9.1 Filtrage actif :

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 (FAP) .

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 ensemble ou associé avec des filtres passifs en fonction des grandeurs électriques harmoniques (courants ou tensions) à compenser [13].

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 .

I.9.1.1 Filtre actif parallèle :

Le filtre actif connecté en parallèle sur le réseau, est considéré comme générateur de courant. Il injecte dans le réseau des courants perturbateurs égaux à ceux absorbés par la charge polluant, mais en opposition de phase avec ceux-ci [6].

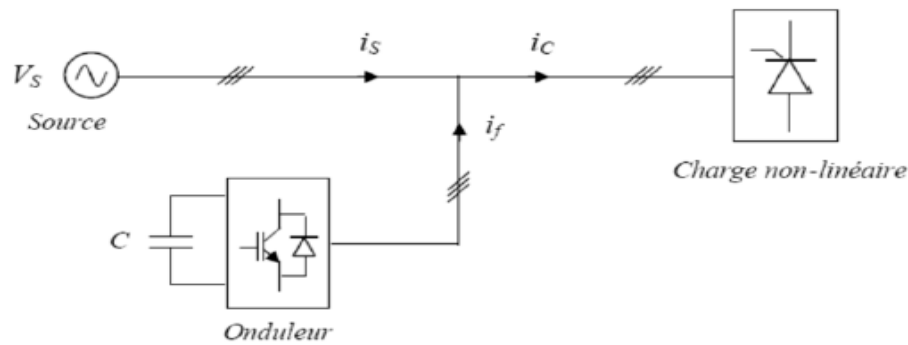


Figure I. 14: Filtre actif parallèle.

I.9.1.2 Filtre actif série:

Le rôle filtre actif série est de modifier localement l'impédance du réseau, son structure est montré sur la Figure. I.15. Le FAS se comporte comme une source de tension harmonique qui annule les tensions perturbatrices (creux, déséquilibre, harmonique) venant de la source et celles générées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau. Ainsi, la tension au point de raccordement peut être rendue sinusoïdale [20].

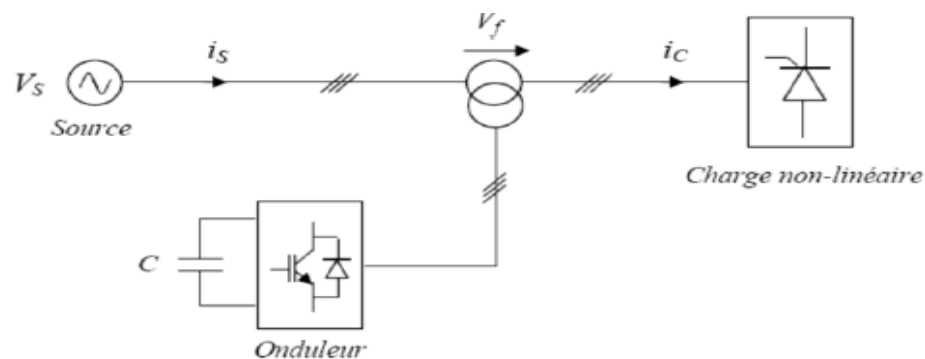


Figure I. 15: Filtre actif série.

I.9.1.3 Combinaison parallèle série actif :

La figure (I.16) illustre l'association de deux filtres actifs parallèle et série, Cette structure bénéficie des avantages des deux types de filtres actifs série et parallèle. Ainsi, elle permet d'assurer simultanément un courant sinusoïdal et une tension du réseau électrique également sinusoïdale[21].

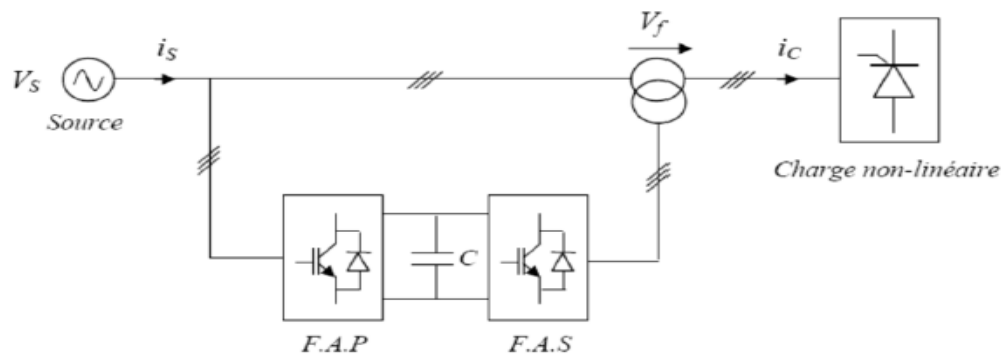


Figure I. 16: Filtre actif mixte série-parallèle (UPQC).

I.9.2 Filtrage hybride :

Le filtre actif hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution, Ainsi, l'objectif visé est la non pollution d'un réseau par une charge perturbatrice et simultanément le bon fonctionnement d'une charge ou d'un réseau sensible dans un environnement pollué. Le traitement s'effectue donc à deux niveaux par rapport à un point considéré ; dépollution par un filtre actif parallèle en aval et par un filtre actif série en amont. La deuxième famille combine la mise en oeuvre simultanée de filtres passifs accordés et actifs, d'autre part. Le filtre actif parallèle compense les courants harmoniques et la puissance réactive de la charge en même temps qu'il contrôle la tension continue du condensateur commun des deux filtres actifs [6,12,25].

On peut distinguer trois configurations du filtre actif hybride [25] :

- Combinaison du filtre actif parallèle et du filtre passif parallèle .
- Combinaison du filtre actif série et du filtre passif parallèle .
- Filtre actif parallèle connecté en série avec un filtre passif.

I.9.2.1 Association série d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif :

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme le décrit la figure I.17 .[21]

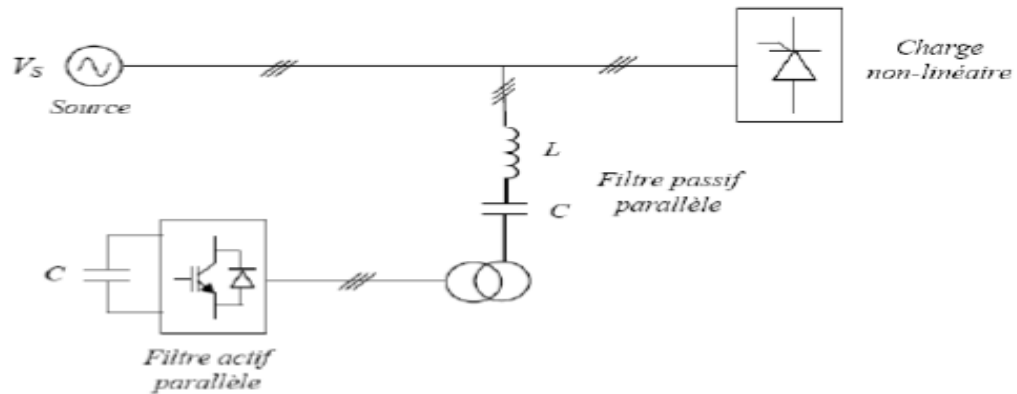


Figure I .17: Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.

I.9.2.2 Association parallèle d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif :

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous deux sont également en parallèle avec la charge. Le filtre actif parallèle sert à compenser les courants harmoniques basses fréquences émis par la charge polluante alors que le filtre passif, accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques hautes fréquences, figure I.18 .[22]

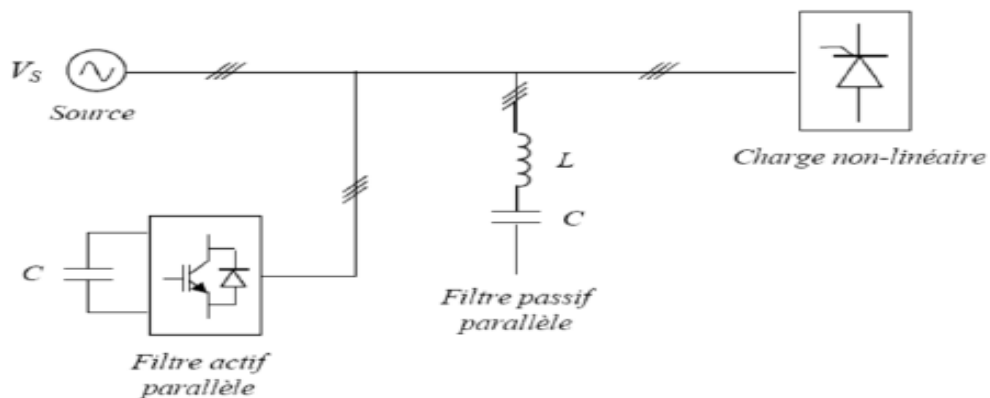


Figure I. 18: Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle.

I.9.2.3 Association d' un filtre actif série et d' un filtre passif :

Cette structure permet de réduire les risques d'antirésonance entre les éléments des filtres passifs et l'impédance du réseau. Dans ce cas, le filtre actif série agit comme une résistance vis-à-vis des courants harmoniques et les oblige à circuler dans le filtre passif, tout en restant transparent à la fréquence fondamentale. La figure I.19 illustre cette topologie [26].

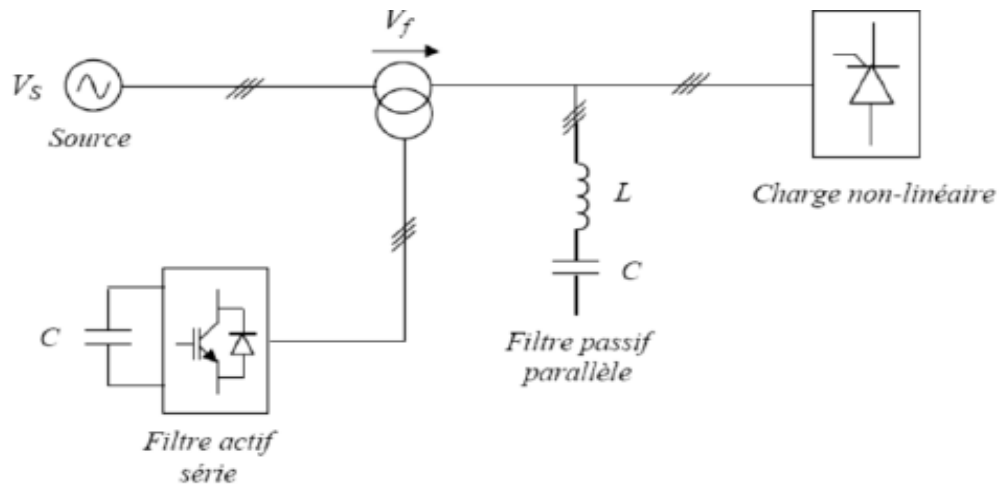


Figure I. 19: Filtre actif série avec filtre passif parallèle.

I.9.3 Les redresseurs MLI :

Contrairement aux redresseurs classiques, les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture grâce à la boucle de contrôle. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que, les interrupteurs peuvent être commutés, selon les besoins, aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée.

Il y a deux manières de mettre en application des redresseurs MLI : comme redresseur à source de tension, et redresseur à source de courant [27].

I.9.3.1 Redresseur de tension:

Un redresseur à MLI de tension est alimenté par une source de tension sinusoïdale, et débite sur un récepteur de courant continu. Il a donc la structure d'un onduleur de courant . Le redresseur à MLI de tension fonctionne en abaisseur de tension. Il peut donc être directement utilisé pour alimenter à tension variable une charge à courant continu[28] .

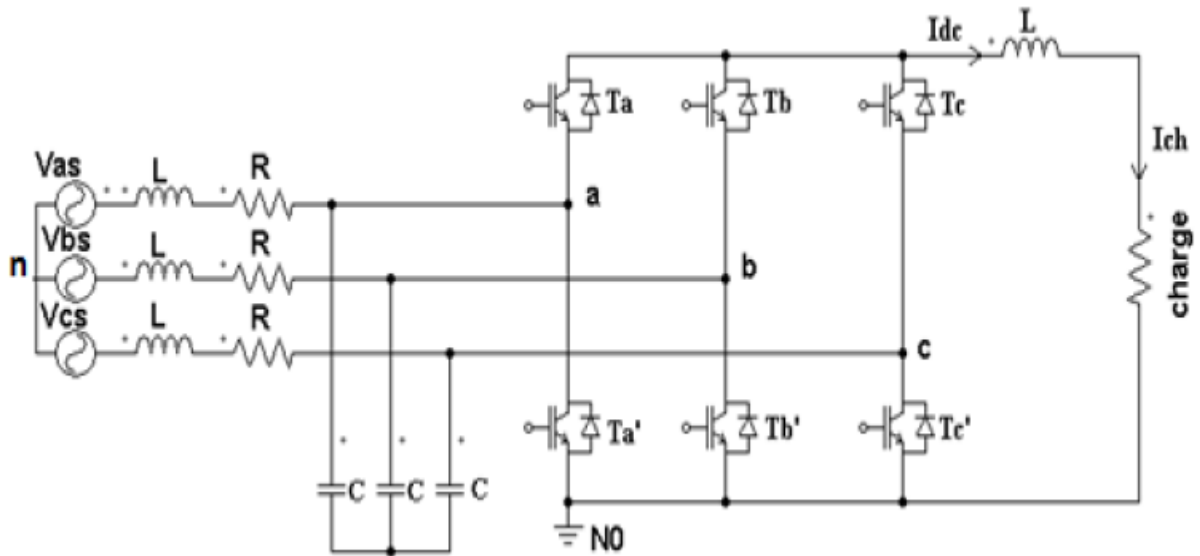


Figure I. 20: Le schéma de principe d'un redresseur à MLI de tension.

I.9.3.2 Redresseur de courant :

La figure I.21 illustre la topologie du redresseur *MLI* de courant. Il assure la conversion d'énergie entre une source de tension alternative et un récepteur de courant continu. Les interrupteurs sont unidirectionnels en courant mais bidirectionnels en tension. L'utilisation des techniques *MLI* conduit à un courant côté alternatif ayant une pollution harmonique contrôlée. Cette structure est souvent dotée d'un filtre de second ordre *LC* du côté alternatif [25].

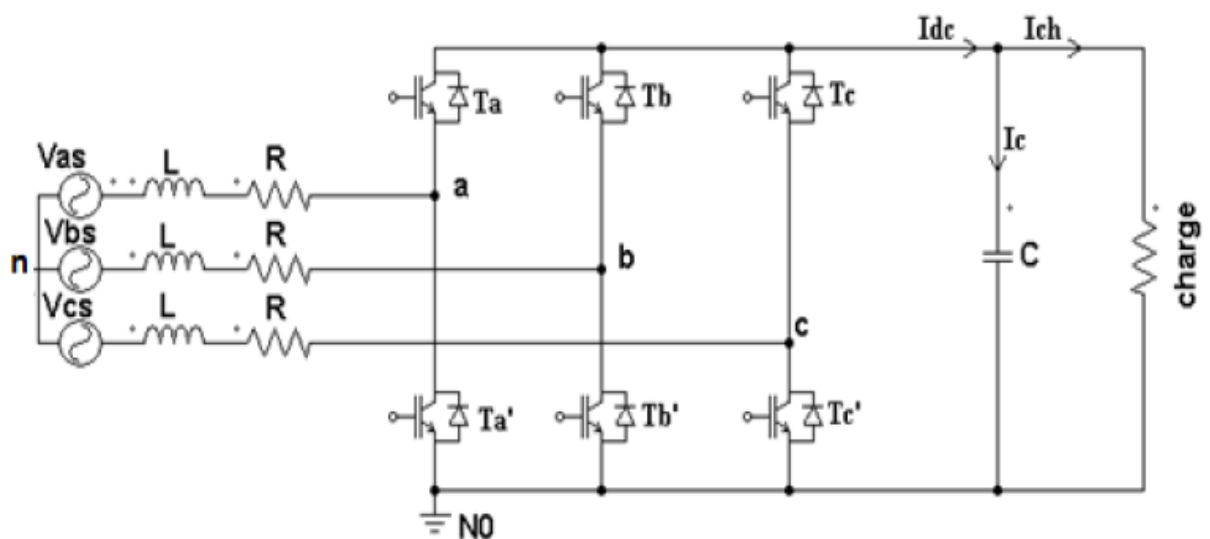


Figure I. 21: Topologie d'un redresseur MLI triphasé de courant.

I.10 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, les harmoniques et les déséquilibres de courant et de tension, la puissance réactive et 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. Plusieurs solutions traditionnelles et modernes de dépollution ont été présentées. La solution classique à base de filtres passifs est souvent pénalisée en termes d'encombrement et de résonance [22].

Chapitre II

*Structure du filtre actif parallèle
de puissance et principe de
fonctionnement*

II.1 Introduction:

La prolifération de perturbations électriques est due à un nombre croissant de charges non linéaires présentes dans les lignes électriques. Tous ces appareils possèdent la particularité d'absorber des courants non sinusoïdaux et donc d'introduire dans les lignes électriques des pollutions harmoniques en courant.

Les filtres actifs parallèles se sont révélés être des techniques efficaces pour la compensation des composantes harmoniques. Dans ce chapitre nous allons étudier le filtre actif parallèle. Sa structure a été divisée en deux parties, la partie puissance et la partie commande.[29]

La partie puissance, à savoir l'onduleur triphasé à structure tension, l'élément de stockage d'énergie et le filtre de sortie. Dans la partie commande, on a l'identification des courants perturbateurs, la régulation du courant injecté par l'onduleur et la régulation de la tension continue[1,29].

II.2 Principe de filtrage actif parallèle de puissance:

Ce filtre est le plus souvent commandé comme un générateur de courant, il génère des courants harmoniques, en opposition de phase avec le réseau, afin que la somme avec ceux-ci soit nulle. On obtient alors des courants sinusoïdaux au niveau du réseau. Il permet donc de supprimer au point de raccordement tous les harmoniques de courants de la charge non linéaire. En pratique, on ne peut pas obtenir un courant de ligne purement sinusoïdal comme dans le cas idéal mais le but est d'avoir un courant qui sera le plus proche possible de la sinusoïde. La simulation par PSIM permet d'apprécier la réalité de la compensation.

En général, le filtre actif parallèle est utilisé pour la dépollution des réseaux BT et MT. Son impédance totale vis à vis de la source et de la charge lui confère une bonne auto-adaptabilité avec des performances appréciables[15].

La figure (II.1) peut facilement expliquer le fonctionnement du filtre pour un courant de charge i_c imposé. Le courant harmonique i_h qui doit fournir le filtre doit être égal à la différence entre le courant d'entrée i_c de la charge polluante et le courant sinusoïdal i_s fourni par la source (loi des nœuds)[31].

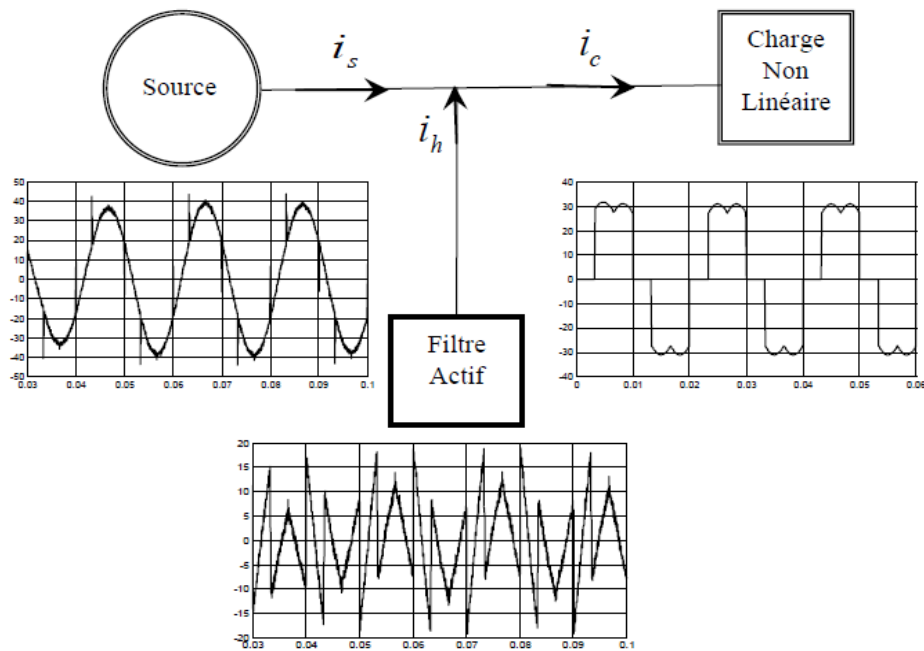


Figure II . 1: Principe de filtrage actif.

II.3 Structure du filtre actif parallèle:

La figure II.2 donne la structure du FAP, laquelle se présente sous la forme de deux parties [22]:

- ❖ La partie puissance et la partie contrôle-commande. 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, ...etc.) avec des diodes en antiparallèle.
 - ✓ d'un circuit de stockage d'énergie, souvent capacitif.
 - ✓ d'un filtre de sortie.
- ❖ La partie contrôle-commande quant à elle est constituée :
 - ✓ de la méthode d'identification des courants perturbés.
 - ✓ du système à base de PLL qui sera intégré dans la méthode d'identification des courants.
 - ✓ de la régulation de la tension continue appliquée aux éléments de stockage d'énergie.
 - ✓ de la régulation du courant injecté sur le réseau à partir de l'onduleur de tension.
 - ✓ de la commande de l'onduleur de tension.

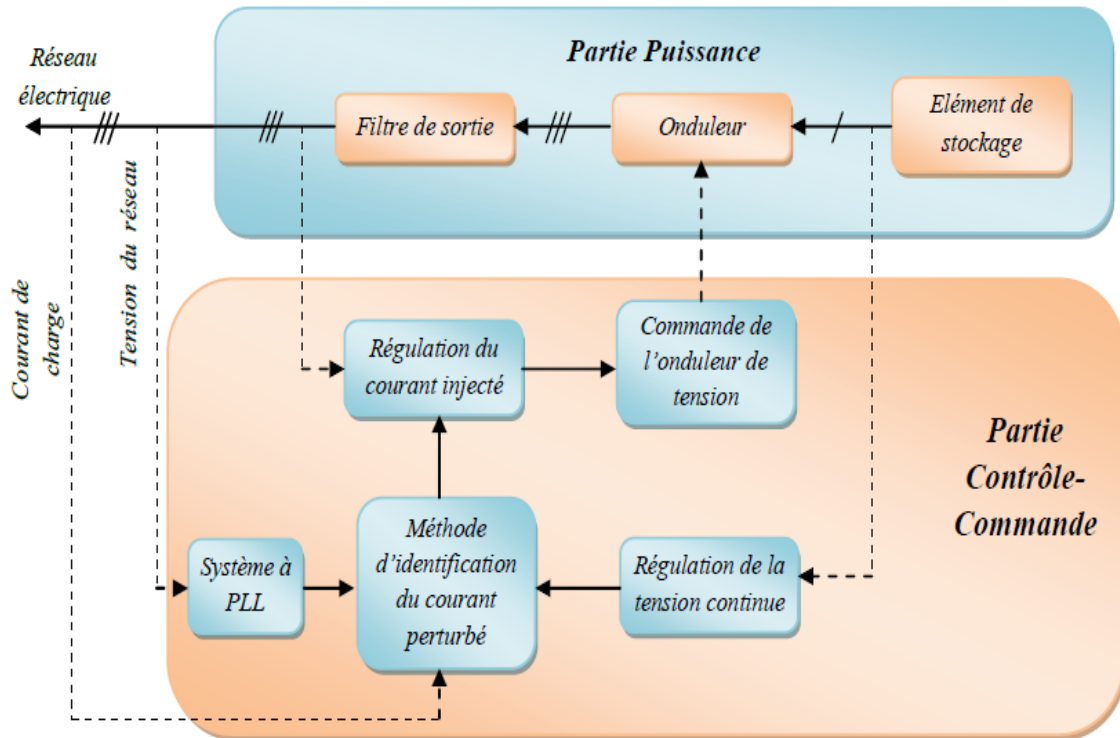


Figure II . 2: Structure du FAP.

II.3.1 Etude de la partie puissance:

II.3.1.1 Onduleur d'un filtre actif parallèle:

La Figure . II.3 présente un onduleur triphasé à structure de tension. Il se compose de trois bras à interrupteurs réversibles en courant, commandés à la fermeture et à l'ouverture, réalisés à partir d'un transistor (GTO ou IGBT) et d'une diode en antiparallèle. Le stockage de l'énergie du côté continu se fait par l'intermédiaire d'un condensateur C_{dc} de tension V_{dc} . Le filtre de sortie est un filtre passif habituellement du premier ordre (L_f, R_f) employé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique[29].

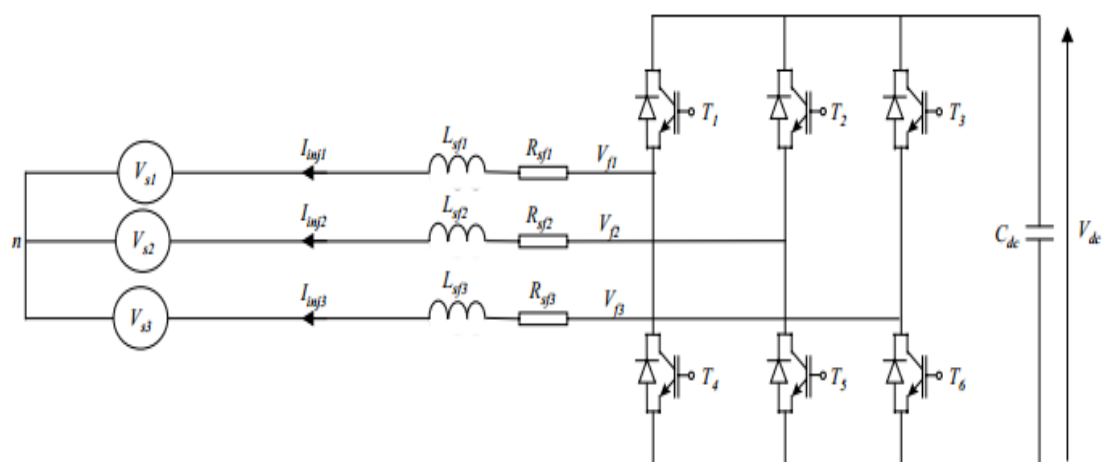


Figure II . 3: Onduleur de tension triphasé.

En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. Avec cette hypothèse, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur de la figure 5.2 dépendent de l'état de trois signaux de commande (T_1 , T_2 , T_3), définis ci-dessous :

$$T_1 = \begin{cases} 1 & S_1 \text{ fermé et } S_4 \text{ ouvert} \\ 0 & S_4 \text{ fermé et } S_1 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_2 = \begin{cases} 1 & S_2 \text{ fermé et } S_5 \text{ ouvert} \\ 0 & S_5 \text{ fermé et } S_2 \text{ ouvert} \end{cases}$$

$$T_3 = \begin{cases} 1 & S_3 \text{ fermé et } S_6 \text{ ouvert} \\ 0 & S_6 \text{ fermé et } S_3 \text{ ouvert} \end{cases}$$

En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras. Ainsi, à partir des états des interrupteurs présentés par les variables T_1 , T_2 et T_3 , on obtient huit cas possibles pour les 3 tensions de sortie du filtre actif V_{fi} (référencées par rapport au point de mi-tension continue), comme le montre le Tableau II-1[3].

V_{fa}	V_{fb}	V_{fc}	T_1	T_2	T_3	Cas N°
0	0	0	0	0	0	0
$2V_{dc/3}$	$-V_{dc/3}$	$-V_{dc/3}$	1	0	0	1
$-V_{dc/3}$	$2V_{dc/3}$	$-V_{dc/3}$	0	1	0	2
$V_{dc/3}$	$V_{dc/3}$	$-2V_{dc/3}$	1	1	0	3
$-V_{dc/3}$	$-V_{dc/3}$	$2V_{dc/3}$	0	0	1	4
$V_{dc/3}$	$-2V_{dc/3}$	$V_{dc/3}$	1	0	1	5
$-2V_{dc/3}$	$V_{dc/3}$	$V_{dc/3}$	0	1	1	6
0	0	0	1	1	1	7

Tableau II . 1:Tensions en sortie de l'onduleur.

II.3.1.2 circuit de stockage d'énergie:

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 :

- En régime permanent, il maintient la tension du bus continu Q constante avec des faibles oscillations.

- Il sert comme élément stockage d'énergie pour compenser la différence de la puissance réelle entre la charge et la source lors des périodes transitoires .

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 SAPF. Donc, la tension du bus continu peut être maintenue constante à sa référence[32].

II.3.1.2 .1 Estimation de la valeur de la capacité du condensateur de stockage :

La détermination de la valeur de la capacité du condensateur de stockage d'énergie peut C_{dc} 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 d'énergie [18] .

A partir de la puissance réelle maximale de la charge P_{max} la valeur de la capacité est donnée par :

$$C_{dc} = \frac{2.P_{max} \cdot 20 \times 10^{-3}}{V_{dc}^2 (1-k^2)} \text{ ou } k = V_{dcmin}/V_{dc} \quad (\text{II-1})$$

La tension V_{dcmin} doit être choisie judicieusement pour assurer la contrôlabilité du courant en tous points de fonctionnement.

II.3.1.3 Filtre de sortie:

Le filtre de sortie a pour rôle d'assurer la liaison entre le réseau et l'onduleur de tension. Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte des deux points importants suivants :

- Il doit fournir une atténuation suffisante des rebondissements causés par la commutation des semi-conducteurs de l'onduleur du filtre actif,
- Il doit préserver les performances du filtre actif, définies par :

$$\frac{d_{if}}{d_t} = \frac{d_{iref}}{d_t} \quad (\text{II-2})$$

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance L_f et de résistance interne R_f . Une valeur relativement faible de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité (II-2) [24].

II.3.2 Etude de la partie commande:

II.3.2.1 Les méthodes d'identification des courants perturbés:

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération de courants harmoniques de même amplitude mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant

absorbe au réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les courants harmoniques de la charge polluante.

L'identification sert à générer des références nécessaires à la compensation. Le choix de la méthode utilisée pour isoler la composante harmonique du courant de charge est un facteur déterminant quant aux performances obtenues par le filtre actif (précision, dynamique, . . .). Dans la littérature, on trouve plusieurs méthodes qui décrivent différents algorithmes d'identification possibles [33].

La première utilise la transformée de Fourier rapide dans le domaine fréquentiel, pour extraire les harmoniques du courant. Cette méthode est bien adaptée aux charges où le contenu harmonique varie lentement. Elle donne aussi l'avantage de sélectionner les harmoniques individuellement. Il est à noter que cette méthode nécessite une grande puissance de calcul afin de réaliser, en temps réel, toutes les transformations nécessaires pour extraire les harmoniques.

La deuxième famille est basée sur le calcul des puissances instantanées dans le domaine temporel. Certaines de ces méthodes se basent sur le calcul des puissances harmoniques de la charge non linéaire. D'autres peuvent être utilisées pour compenser à la fois les courants harmoniques et la puissance réactive, en se basant sur la soustraction de la partie fondamentale active du courant total [32].

On distingue des méthodes d'extraction globale (tous les harmoniques à compenser sont présents dans la référence) et sélective (les harmoniques à compenser sont choisis et limités). Le choix de la méthode dépendra des objectifs fixés : compensation de tous les courants harmoniques, compensation sélective de certaines harmoniques, compensation des harmoniques dans des cas de configurations défavorables susceptibles de survenir dans les réseaux triphasés industriels, car la tension du réseau est souvent perturbée ou déformée. Pour générer les courants de référence servant à la commande du filtre actif [13].

II.3.2.1.2 . Principe du fonctionnement de la méthode des puissances instantanées :

II.3.2.1.2 .1. Généralités sur les puissances instantanées :

Cette méthode exploite la transformation α - β pour obtenir les puissances réelles et imaginaires. Notons par (V_α, V_β) et (I_α, I_β) les composantes orthogonales du repère α - β associées respectivement aux tensions de raccordement du filtre actif parallèle (V_s) et aux courants absorbés par les charges polluantes (I_s). La transformation α - β -0 triphasée permet d'écrire, la relation des tensions suivante:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-9})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{S1} \\ I_{S2} \\ I_{S3} \end{bmatrix} \quad (\text{II-10})$$

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

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

$$P(t) = V_{s1} I_{s1} + V_{s2} I_{s2} + V_{s3} I_{s3} = p(t) + p_0(t)$$

$$p(t) = V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta \quad (\text{II-11})$$

$$p_0(t) = V_0 I_0$$

Avec $p(t)$ la puissance réelle instantanée, $p_0(t)$ la puissance homolaire instantanée.

L'avantage de la transformation α - β -0 est la séparation des séquences homopolaires du système triphasé de courant ou de tension. De la même manière, la puissance imaginaire instantanée peut s'écrire sous la forme suivante :

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(V_{S1} - V_{S2})I_{S3} + (V_{S2} - V_{S3})I_{S1} + (V_{S3} - V_{S1})I_{S2}] = V_\alpha I_\beta - V_\beta I_\alpha \quad (\text{II-12})$$

A partir des relations (II-11) et (II-12), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & V_{s\beta} \\ -V_{s\beta} & V_{s\alpha\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II-13})$$

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

$$\begin{cases} p = \bar{p} + \tilde{p} \\ q = \bar{q} + \tilde{q} \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

Avec :

- \bar{p} une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.
- \bar{q} une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.

· \tilde{P} et \tilde{q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension [14].

II.3.2.1.2 .2. Calcul des courants perturbateurs :

En inversant la relation (II.12), nous pouvons recalculer les courants dans le repère comme le montre l'équation (II-15) :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P \\ q \end{bmatrix} \quad (\text{II-15})$$

En considérant les équations (II. 14) et (II.15), nous pouvons séparer le courant dans le repère (α, β) en trois composantes, active et réactive à la fréquence fondamentale et les harmoniques.

Ceci conduit à:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{Courant actif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant réactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} V_{s\alpha} & -V_{s\beta} \\ V_{s\beta} & V_{s\alpha} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{P} \\ \tilde{q} \end{bmatrix}}_{\text{Courant harmonique}} \quad (\text{II-16})$$

avec:

$$\Delta = V_{s\alpha}^2 + V_{s\beta}^2 \quad (\text{II-17})$$

Supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale équilibrée du réseau électrique.

Cette expression montre donc que l'identification des différentes composantes du courant dans le repère (α, β) revient à séparer des termes continus des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasés qui représentent les courants identifiés, dits courants de référence ($I_{h\text{ref}}$), qui sont à injecter en opposition de phase sur le réseau électrique pour éliminer les harmoniques, sont calculés à partir de la transformation (α, β) inverse donnée par la relation (II-18) :

$$\begin{bmatrix} I_{h\text{ref}1} \\ I_{h\text{ref}2} \\ I_{h\text{ref}3} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{h\alpha} \\ I_{h\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{II-18})$$

Avec : $I_{h\alpha}, I_{h\beta}$ courants perturbateurs calculés dans le repère (α, β) à partir des courants réactifs et harmoniques de la relation (II-16) [46]

II.3.2.2 Système a PLL:

La technique PLL est la plus utilisée pour l'extraction de la composante directe de la tension du réseau. C'est un système asservi comprenant un régulateur (PID, RST, RSTamélioré, ...) pour la détection de la pulsation directe de la tension et utilisant une transformation pour passer dans le repère de Park, La forme de base de la PLL est présentée sur la figure II.4, contenant un détecteur de phase (PD), un filtre de la boucle (LF) et un oscillateur de tension contrôlée (VCO). Plusieurs techniques de PLL . ont été développées, la figure II.5 représente le synoptique détaillé de la PLL classique utilisée. Cette méthode détecte les paramètres de la composante fondamentale ($\hat{\theta}$, V_m) des tensions de sources données par l'équation (II.9) ou ω est la pulsation du terme fondamental de la tension et V_m sa valeur efficace [34 ,18].

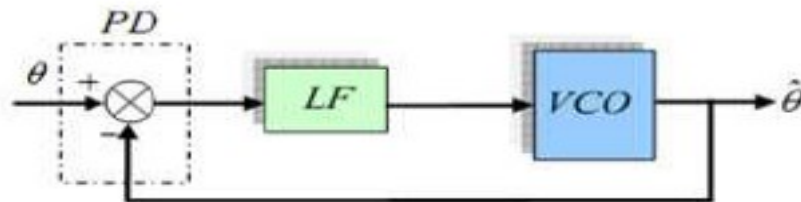


Figure II . 4: Synoptique de la P.L.L classique.

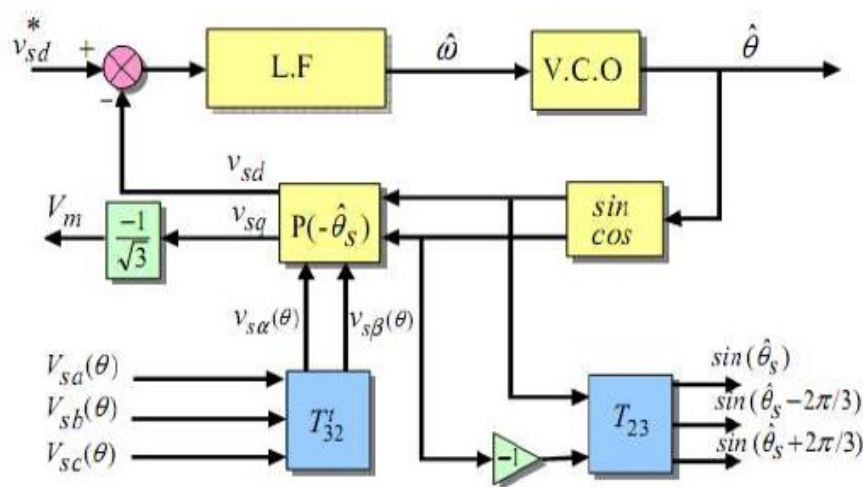


Figure II . 5: Synoptique détaillé de la P.L.L classique.

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} = \sqrt{2} V_m \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} ; \text{avec } \theta = \omega t \tag{II-19}$$

Les tensions simples $v_{s(abc)}(\theta)$ mesurées au point de raccordement, subissent en premier lieu la transformation de Concordia qui permet de passer d'une structure triphasée a la structure diphasé équivalente dans un repère de coordonnées (α, β) et qui s'écrit comme suit [18] :

$$\begin{bmatrix} v_\alpha(\theta) \\ v_\beta(\theta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} V_m \cdot \sin(\theta) \\ -\sqrt{3} V_m \cdot \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II-20})$$

Ces grandeurs peuvent être obtenues dans le référentiel tournant synchrone en appliquant la transformation de Park suivante :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\theta}) & \sin(\hat{\theta}) \\ -\sin(\hat{\theta}) & \cos(\hat{\theta}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II-21})$$

D'où on obtient :

$$\begin{bmatrix} v_{sd} \\ v_{sq} \end{bmatrix} = \sqrt{3} V_m \begin{bmatrix} \sin(\theta - \hat{\theta}) \\ \cos(\theta - \hat{\theta}) \end{bmatrix} \quad (\text{II-22})$$

La PLL sera verrouillée lorsque l'angle estimé $\hat{\theta}$ sera égal à θ . Dans ce cas : $v_{sd} = 0$, et $v_{sq} = -\sqrt{3} V_m$. Donc, il est possible de contrôler θ en régulant v_{sd} à zéro. Le synoptique de la figure II.5, peut être simplifié pour être similaire à celui de la figure II.5, comme il apparaît sur le schéma de la figure II.6. La fonction de transfert en boucle fermée de ce système est donnée par :

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{\sqrt{3} V_m \cdot k_p \left(\frac{1+\tau_i s}{\tau_i s} \right) \cdot \frac{1}{s}}{1 + \sqrt{3} V_m \cdot k_p \left(\frac{1+\tau_i s}{\tau_i s} \right) \cdot \frac{1}{s}} \quad (\text{II-23})$$

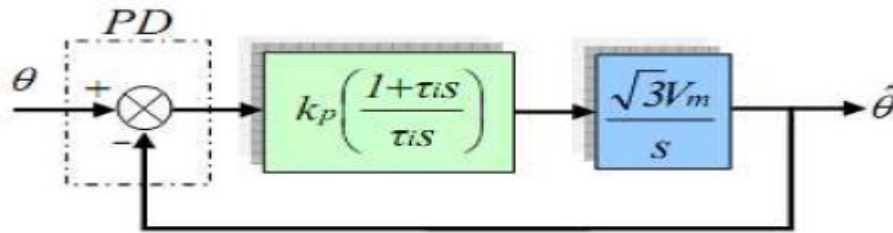


Figure II . 6: Schéma simplifié de la P.L.L.

La fonction de transfert trouvée peut s'identifier avec le système général du deuxième ordre donné par [18]:

$$F(s) = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n s + \omega_n^2} \quad (\text{II-24})$$

Les paramètres du LF s'expriment comme suit :

$$k_p = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n}{\sqrt{3} V_m} \quad \text{et} \quad \tau_i = \frac{2 \cdot \varepsilon}{\omega_n}$$

II.3.2.3 Commande de onduleur:

Les performances du filtre actif et notamment la diminution du THD du courant de source sont certes liées aux performances de la génération des références de courants harmoniques, mais dépendent également de la stratégie de commande de l'onduleur de tension (poursuite des références de courant). Pour maintenir le courant à la sortie du filtre actif autour de sa référence, deux techniques de commande peuvent être utilisées [7]:

- La commande par hystérésis.
- La commande par Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI).

II.3.2.3.1 La commande par hystérésis:

La commande par hystérésis, appelée aussi commande en tout ou rien, est une commande non linéaire qui utilise l'erreur existant entre le courant de référence (I_{fref}) et le courant produit par l'onduleur (I_f). L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis. Dès que l'erreur atteint la bande inférieure ou supérieure, un ordre de commande est envoyé de manière à rester à l'intérieur de la bande. La simplicité de la mise en œuvre, comme le montre la Figure II-7 [18].

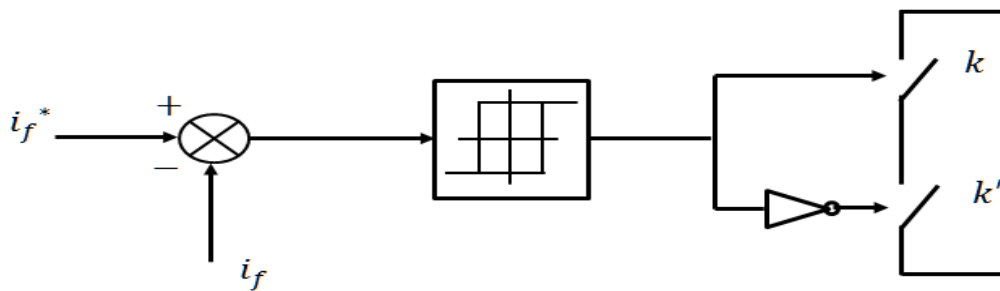


Figure II . 7:Schéma de commande par hystérésis.

II.3.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI) :

La technique de commande par MLI : la commande par modulation de largeur d'impulsion résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur. La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel, dite *MLI* intersective.

Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant

la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le Schéma de principe est donné par la figure II.8 [35].

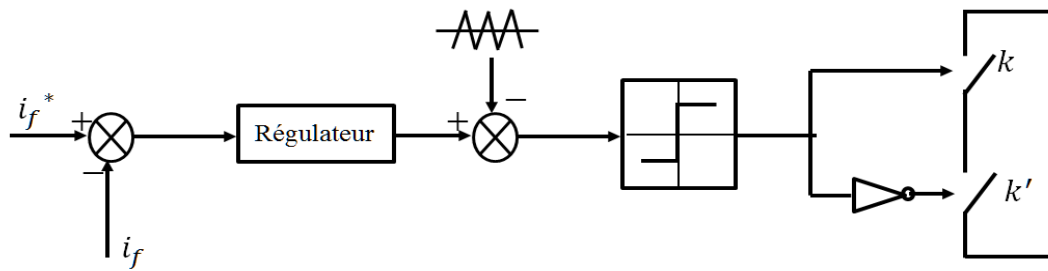


Figure II . 8: principe de commande par MLI .

II.3.2.4 Régulation de la tension continue :

La tension moyenne V_{dc} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. La principale cause susceptible de la modifier sont les pertes dans le filtre actif (interrupteurs et filtre de sortie). La régulation de la tension moyenne aux bornes du condensateur de stockage d'énergie doit se faire par l'adjonction des courants fondamentaux actifs dans les courants de référence. La sortie du régulateur P_c s'ajoute, à un signe près, à la puissance active perturbatrice \tilde{P} et donne lieu à un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{dc} . La puissance P_c représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{dc} égale à la valeur de la tension de référence souhaitée

(V_{dc-ref}) [36].

Le régulateur employé ici est un régulateur proportionnel simple (K_c) avec une action de filtrage au préalable sur la tension mesurée V_{dc} , réalisée par un filtre passe-bas du deuxième ordre de manière à atténuer les fluctuations à 300 Hz.

En négligeant les pertes de commutations dans l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante [35] :

$$P_C = \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} C_{dc} \cdot V_{dc}^2 \right) \quad (\text{II-25})$$

Notons que la relation (II-25) est non linéaire. Pour des faibles valeurs de la tension V_{dc} autour de la référence V_{dc-ref} , elle peut être linéarisée à travers les relations suivantes:

$$\begin{cases} P_c = C_{dc} \cdot V_{dc-ref} \cdot \frac{d}{dt} (V_{dc}) \\ \Rightarrow V_{dc}(S) = \frac{P_c(S)}{V_{dc-ref} \cdot C_{dc} S} \end{cases} \quad (II-26)$$

A partir de la relation (II-26) et en prenant en compte le régulateur proportionnel (K_c). Le choix du paramètre K_c aura pour objectif d'obtenir un temps de réponse minimal afin de ne pas nuire à la dynamique du filtre actif [21].

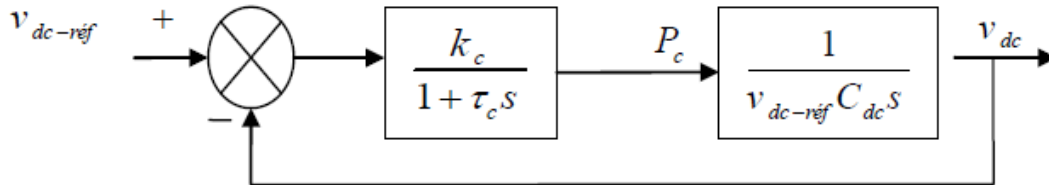


Figure II . 9: boucle de régulation de tension continue .

II.3.2.5 Régulations du courant du filtre actif:

On néglige les effets de la capacité C_{dc} et les résistances du filtre de sortie sur le courant injecté par l'onduleur I_f , donc on peut écrire la relation suivant qui caractérise le courant du filtre actif I_f [37] :

$$L_f \frac{d}{dt} I_f = V_f - V_s \quad (II-27)$$

On pose ΔI_f la différence entre le courant de référence et le courant mesuré à partir de la relation suivante :

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_f \quad (II-28)$$

A partir des équations (II.27) et (II.28), nous obtenons l'expression suivante :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = \left(V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \right) - V_f \quad (II-29)$$

La tension de référence peut être définie comme suit :

$$V_{fref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (II-30)$$

Dans ce schéma, $G(s)$ représente l'onduleur qui peut être modélisé par la relation suivante :

$$G(S) = K \frac{1}{1+\tau s} \quad (II-31)$$

$$K = \frac{V_{dc}}{2V_p} \quad (II-32)$$

Avec:

V_{dc} : La tension du côté continu de l'onduleur.

V_p : L'amplitude de la porteuse triangulaire.

τ : Le retard causé par le calcul des courants perturbateurs.

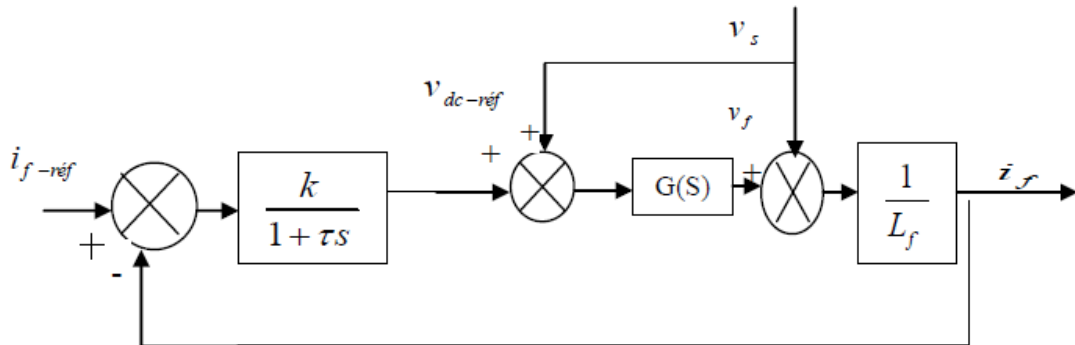


Figure II . 10: Boucle de régulation des courants du filtre actif parallèle .

II.4. Conclusion :

Nous avons dans ce chapitre commence par faire une présentation du filtre actif de puissance parallèle base sur un onduleur de tension. Nous avons ensuite présente les différentes stratégies de commande pour l'identification des courants de référence. Nous avons présente en détail les éléments constituant les commandes de filtre actif de puissance[38].

Chapitre III

La commande par logique floue

III-1-Introduction :

L'incertitude, l'imprécision, sont inhérents à certains types d'informations traitées ou échangées par l'homme avec son environnement. Comme le précisait Zadeh, le raisonnement humain utilise couramment des étiquettes floues, "la température est élevée", " le ciel est gris ",... Ce trait de caractéristique différencie l'intelligence humaine de l'intelligence artificielle [2].

La logique floue sert à représenter des connaissances incertaines et imprécises. La commande floue, quant à elle, sert à prendre une décision même si on ne peut estimer les entrées/sorties qu'à partir de prédicats vagues ou lorsque ces entrées/sorties sont entachées d'erreurs que l'on ne peut évaluer que grossièrement [39].

commande floue que nous pouvons résumer ainsi:

- ✓ Facilité d'implémentation,
- ✓ Solution de problèmes multi variables complexes,
- ✓ Robustesse vis-à-vis des incertitudes.

III-2-La logique floue :

Aujourd'hui, la floue (en logique anglais fuzzy logic) est de grande actualité. Il s'agit d'une nouvelle méthode de traitement pour les problèmes de réglage ou de commande [29].

III-3-Domaine d'application :

Les systèmes flous ont été utilisés dans une large variété d'applications industrielles, gestionnaires et médicales. Parmi ses applications on peut citer [40] :

- ✓ Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...).
- ✓ Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.).
- ✓ Systèmes autonomes mobiles.
- ✓ Systèmes de transport (train, métro, ascenseur, ...).
- ✓ Systèmes de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production .

III-4-Principe de la logique floue :

Le principe du réglage par logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logique (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables linguistiques, proche du langage humain de tous les jours [35].

Ainsi la ,théorie de la logique floue, fondée sur des aspects de la théorie des possibilités, fait intervenir des ensembles d'appartenances appelés "ensembles flous" caractérisant les différentes grandeurs du système à commander. Le raisonnement flou emploie un ensemble de règles floues établies par l'expert et dont la manipulation permet la génération de la commande adéquate ou la prise de décision. Ainsi, les éléments de base de la logique floue sont les suivants [12] :

- ✓ Les variables linguistiques et les ensembles flous .
- ✓ Les fonctions d'appartenance .
- ✓ Les opérateurs .
- ✓ Les inférences à plusieurs règles floues.

III-5-Eléments de base de la logique floue :

III-5-1-Variables linguistiques :

Pour qu'il soit possible de raisonner simplement sur un problème, il faut tout d'abord spécifier clairement les connaissances disponibles. Les variables linguistiques permettent de décrire dans un cadre très général la connaissance acquise sur une variable, même lorsqu'elle est vague ou imprécise [41].

La variable linguistique peut être représentée par un triplet $x, T(x), U$ dans lequel x est le nom de la variable linguistique, $T(x)$ l'ensemble des valeurs linguistiques de x et U l'univers de discours. La figure III.1 illustre un exemple de variable linguistique 'vitesse' avec trois termes linguistiques : petite, moyenne et grande [42].

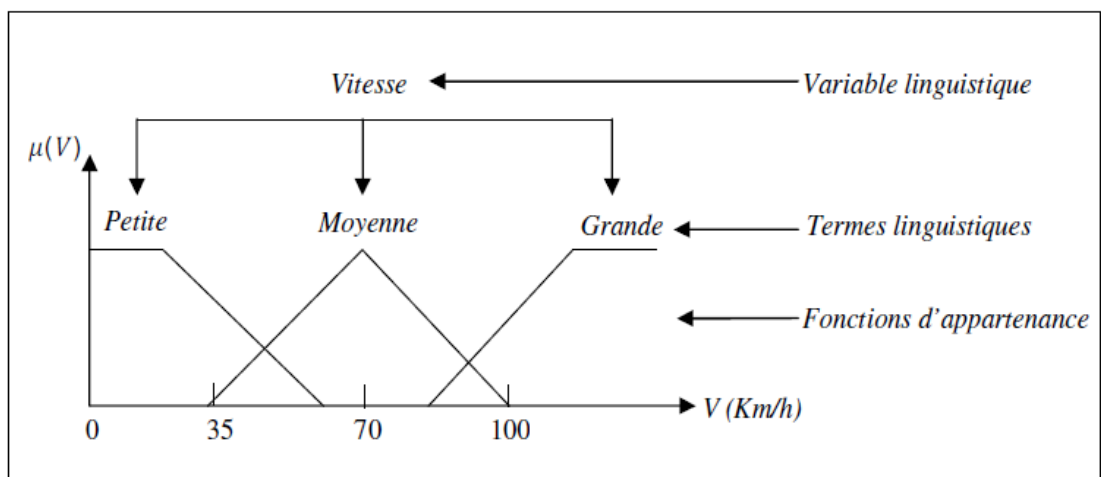


Figure III . 1: Variable linguistique.

III-5-2-Fonctions d'appartenance :

Afin de pouvoir traiter numériquement les variables linguistiques, il faut les soumettre à une définition mathématique à base de fonctions d'appartenance qui montrent le degré de vérification de ces variables aux différents sous-ensembles.

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme, mais en général, les fonctions d'appartenance les plus utilisées sont définies par des formes géométriques ou des fonctions, on cite les suivantes:

Les fonctions d'appartenance sont le plus souvent représentées par les fonctions triangulaire et trapézoïdale, donc par des segments de droite, les fonctions sont alors dites linéaires par morceaux.

Dans la plupart des cas, et en particulier pour le réglage par la logique floue, ces deux formes sont suffisantes pour délimiter des ensembles flous .

Généralement, les plus souvent utilisées sont les fonctions de forme trapézoïdale ou triangulaire ou gaussiennes [29].

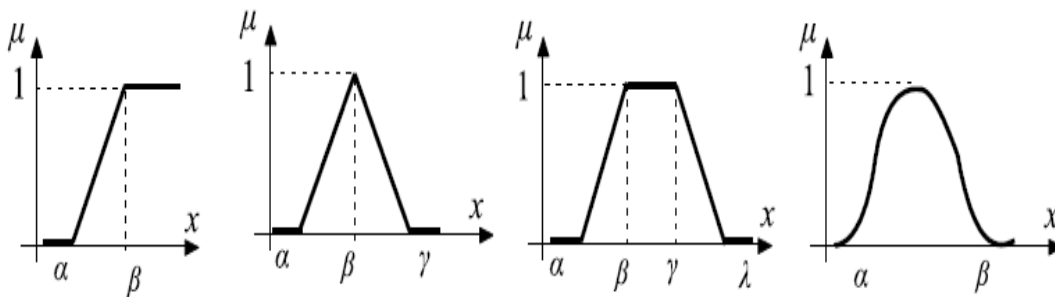


Figure III . 2: Quelques différentes formes de fonctions d'appartenance.

III-5-3-Opérateurs de la logique floue:

Les variables linguistiques sont liées entre elles au niveau des inférences ouest par des opérateurs de la logique ou intervenant sur les fonctions d'appartenance représentant les variables linguistiques. Voici quatre principaux opérateurs [33]:

$$\text{Négation (NON)} : \mu_{A^-} = 1 - \mu_A \quad (\text{III-1})$$

$$\text{Conjonction (ET)} : \mu_c = \mu_A \text{ ET } \mu_B (Z) = \min [\mu_A (x), \mu_B (y)] \quad (\text{III-2})$$

$$\text{Disjonction (OU)} : \mu_c = \mu_A \text{ OU } \mu_B (Z) = \max [\mu_A (x), \mu_B (y)] \quad (\text{III-3})$$

Implication : S I x est A ALORS y est B L'implication est une importante connexion dans les algorithmes de contrôle par logique , car la stratégie d'asservissement est souvent dictée par un ensemble de règles SI... ALORS... Il y a plusieurs méthodes d'implication ,mais les plus connues sont :

$$\text{Imp de Zadeh : } \mu_c(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\} \quad (\text{III-4})$$

$$\text{Imp de Mamdani : } \mu_c(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (\text{III-5})$$

III-5-4-Règles floues :

La règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication entre deux propositions flous, par exemple, considérons deux variables linguistiques (V1, U, Tv1) (V2, U, Tv2) et les deux propositions suivantes 'V1 est A', 'V2 est B', ou A et B sont deux ensembles flous de V1 et V2. On peut définir la règle floue par l'expression, si V1 est A Alors V2 est B.

Généralement, plusieurs règles floues sont nécessaires pour prendre une décision face à une situation donnée. On s'intéresse au cas de plusieurs règles floues dans le domaine de la commande et la régulation. Les règles floues peuvent être décrites de plusieurs façons [40] :

- ✓ Linguistiquement.
- ✓ Symboliquement .
- ✓ Par matrice d'inférence.

III-6-Commande par logique floue :

La commande par la logique floue est de grande actualité aujourd'hui. La commande par la logique floue a le même but qu'une commande classique. En effet, cette méthode permet d'obtenir une loi de réglage souvent très efficace sans devoir faire des modélisations approfondies. Par opposition à un régulateur classique, Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basent sur des variables linguistiques [29] .

III-6-1-Constitution d'un système floue :

Un système flou est composé de quatre parties essentielles [29]:

- ✓ La base de connaissance constituée d'une base de données et d'une base de règles.
- ✓ Le système d'inférence.
- ✓ L'interface de fuzzification.
- ✓ L'interface de déffuzzification.

- La figure.III-3, montre la configuration de base d'un réglage par logique floue :

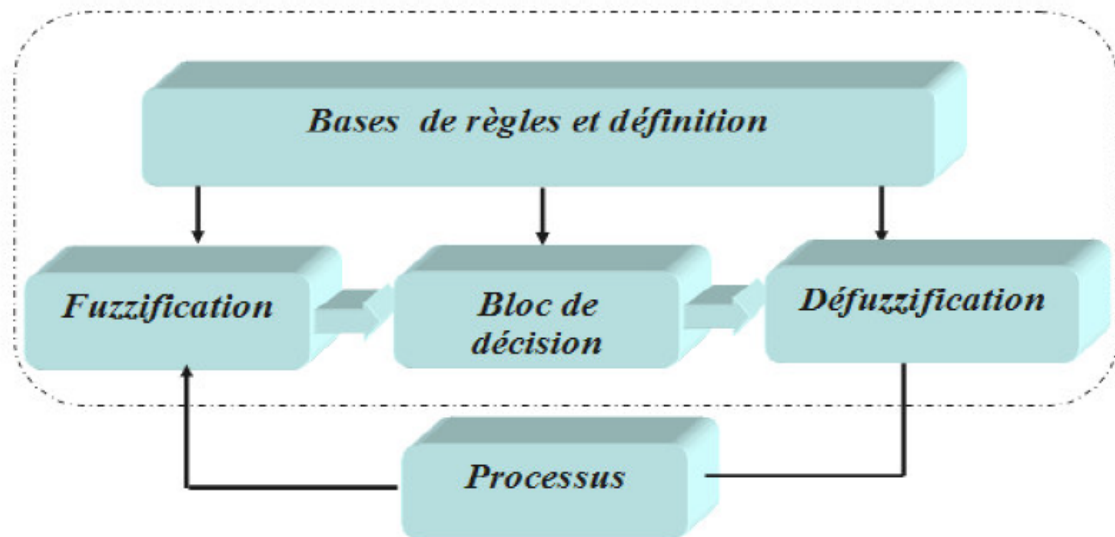


Figure III . 3 : Structure interne d'un système flou.

III-6-1-1-Interface de fuzzification :

La fuzzification de la valeur précise d'une variable consiste à caractériser le degré avec lequel cette mesure appartient à un sous-ensemble flou donné, c'est-à-dire le passage d'une grandeur précise à une variable floue.

Le choix des formes des fonctions d'appartenance est arbitraire. Des études comparatives ont montré qu'avec les différentes formes des fonctions d'appartenance, les résultats sont pratiquement similaires en boucle fermée. La forme la plus fréquemment utilisée en commande floue est la forme triangulaire. Le nombre de fonctions d'appartenance est généralement impair et se répartissent autour de zéro. En général, on introduit pour une variable linguistique trois, cinq ou sept ensembles flous. Le choix du nombre dépend de la précision souhaitée. Les fonctions d'appartenance peuvent être symétriques, non symétriques et équidistantes ou non équidistantes [42].

III-6-1-2-Base de règles :

Ce bloc, comporte l' ensemble de définitions utilisées dans la commande floue (univers de discours, partitions ou classes floues, choix d' opérateurs, etc.), ainsi que la base de règle « Si...alors... », de la stratégie de commande [43].

III-6-1-3-Mécanisme d'inférence floue :

Le principe de cette opération consiste à établir la liaison entre les grandeurs d'entrée du régulateur exprimées par des termes linguistiques et la variable de sortie sous sa forme linguistique à partir d'une parfaite connaissance du système à régler et d'une expertise concernant le fonctionnement du processus à régler. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont [40]:

- ✓ Max-Produit.
- ✓ Somme-produit.
- ✓ Max-Min (Implication de Mamdani).

III-6-1-4-Interface de Défuzzification :

Le résultat d'une inférence est une fonction d'appartenance, cependant, un organe de commande nécessite un signal de commande précis. La transformation d'une information en une information déterminée est la defuzzification[33].

III-6-2-Description générale d'un contrôleur flou :

En général, les contrôleurs flous sont utilisés dans les structures de commande en boucle fermée des processus(figure III-4) .

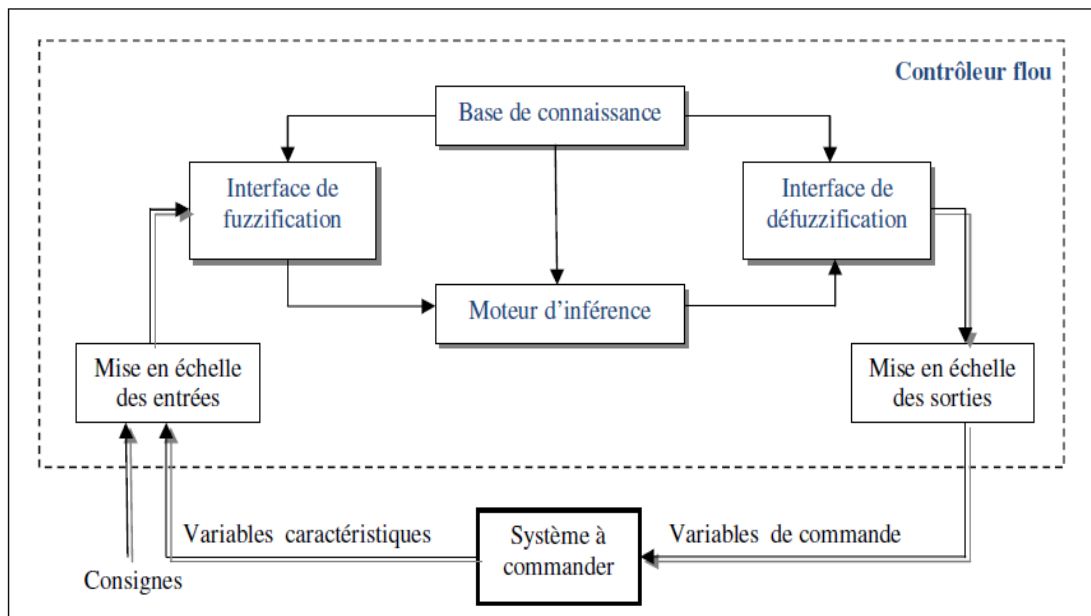


Figure III . 4: Structure de base d'un régulateur flou.

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrées du contrôleur flou. Les variables caractéristiques sont, en général, les grandeurs de sortie du processus et, le cas échéant, d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du système. Les variables de sortie du contrôleur flou sont les commandes appliquées au processus. La Mise en échelle (normalisation/dénormalisation) des grandeurs d'entrées/sorties permet d'adapter le traitement des signaux d'entrées/sorties. Par convention, la plage de variation des variables d'entrées/sorties est comprise entre -1 et +1. Les opérations de normalisation et de dénormalisation sont optionnelles [42].

La configuration de base du contrôleur flou comprend quatre parties :

- ✓ Interface de fuzzification,
- ✓ Base de connaissances,
- ✓ Moteur d'inférence floue,
- ✓ Interface de défuzzification.

III.7 .Application à la commande d'un filtre actif :

Souvent, le régulateur flou possède deux entrées (l'erreur et sa dérivée) et une sortie représentant la commande floue elle-même.

La régulation floue consiste à transformer le régulateur classique en un régulateur classique-flou avec un processus. La figure (III-5) montre le schéma de principe d'un régulateur flou [44].

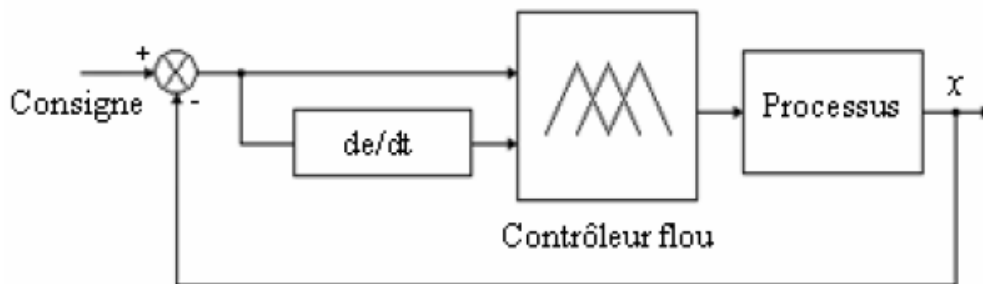


Figure III . 5: Schéma de principe d'un régulateur flou.

III.7.1 Partitions floues :

Les deux entrées (e et Δe) sont définies chacune par trois sous-ensembles: Négative 'N', Nulle 'ZE', Positive 'P', les fonctions d'appartenance sont du type Gaussien .

La sortie (cde) est définie par cinq sous-ensembles: Grande Négative 'GN', Négative 'N', Nulle 'ZE', Positive 'P', Grande Positive 'GP', les fonctions d'appartenance sont du type triangulaire [44].

Les partitions floues de cette commande sont représentées dans la figure (III-6)

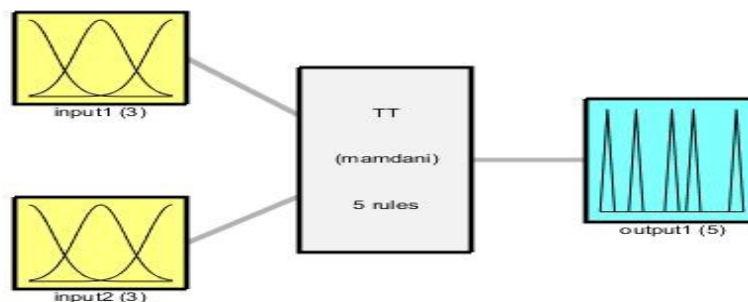


Figure III . 6: illustrative de deux entrées et d'un régulateur floue.

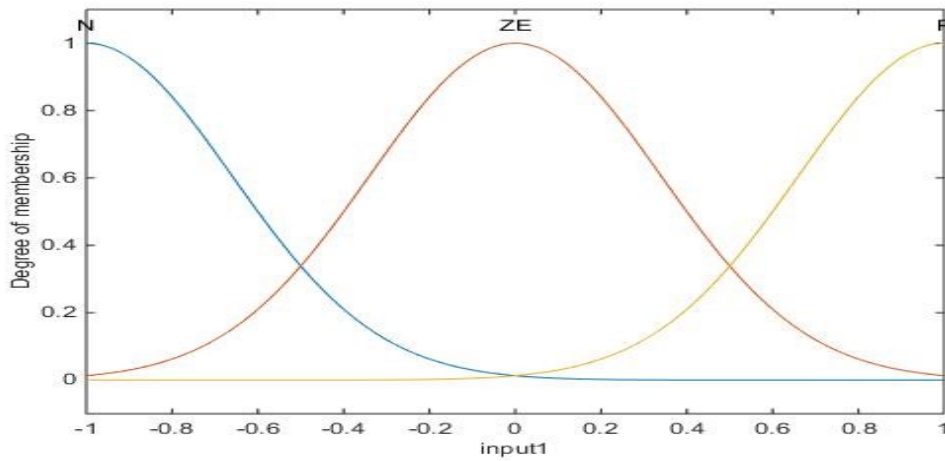


Figure III . 7: Partition floue de e .

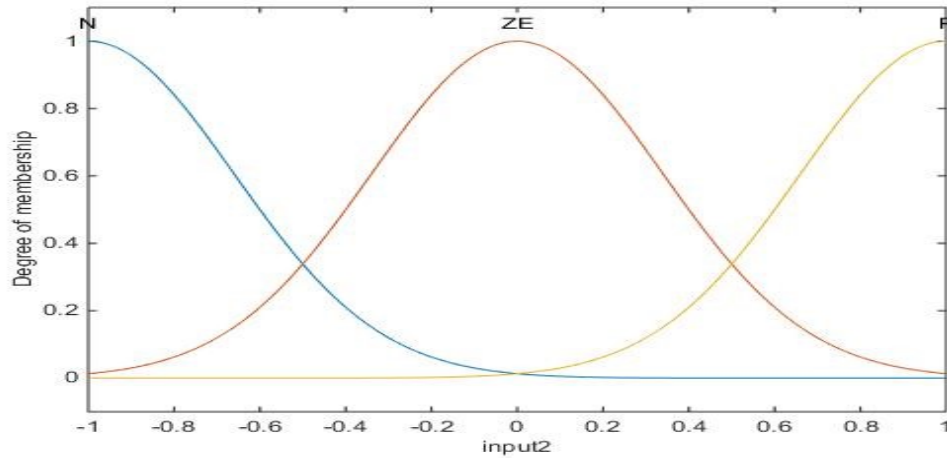


Figure III . 8: Partition floue de Δe .

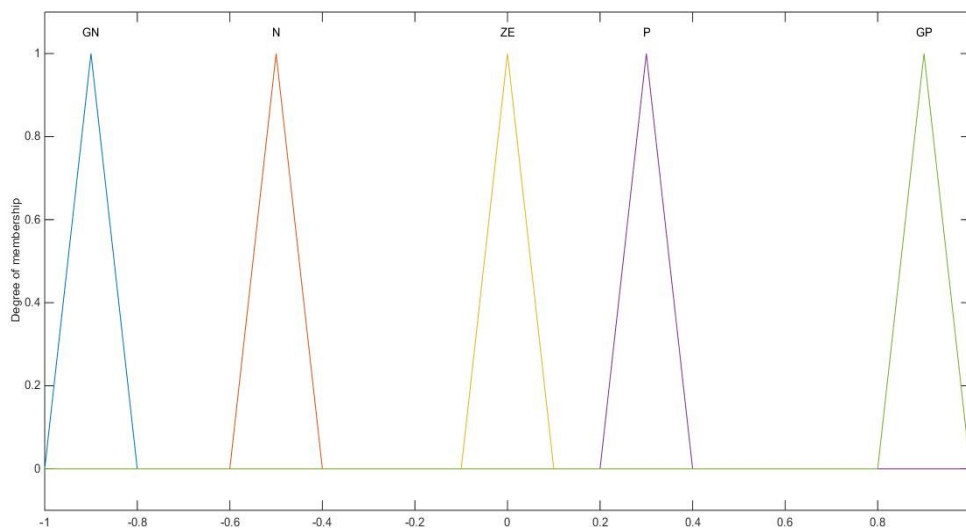


Figure III . 9: Partition floue de cde .

III.7.2 Base des règles:

L'établissement des règles floues se base sur le sens de variation de l'erreur e , de son signe algébrique et de celui de sa dérivée Δe . Comme illustrée dans la Figure (III-10), et sachant que :

- ✓ e est croissante si sa dérivée Δe est positive,
- ✓ e est constante si sa dérivée Δe est nulle,
- ✓ e est décroissante si sa dérivée Δe est négative,
- ✓ e est positive si la consigne est supérieure à la sortie x (consigne $> x$),
- ✓ e est nulle si la consigne est égale à la sortie x (consigne = x),
- ✓ e est négative si la consigne est inférieure à la sortie x (consigne $< x$),

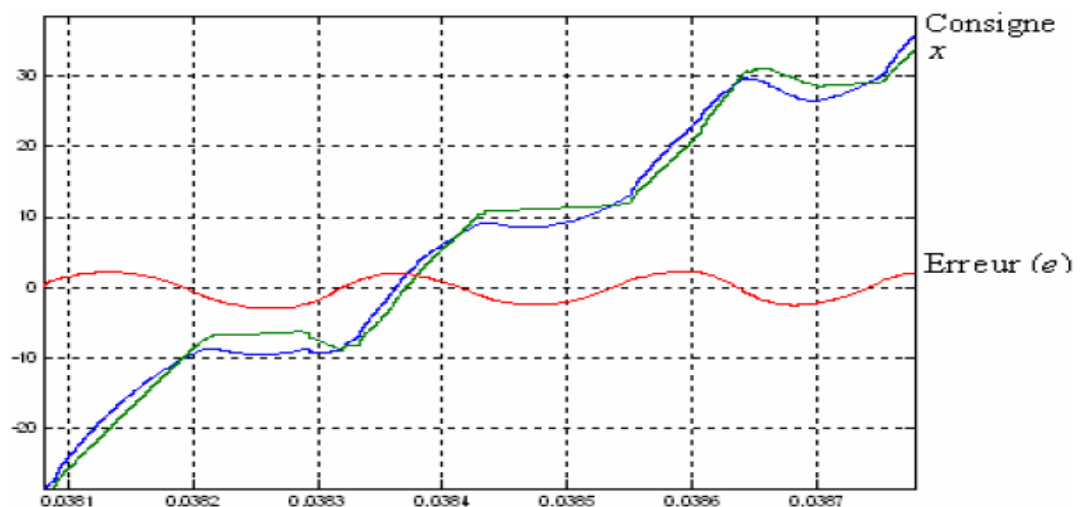


Figure III . 10: Établissement des règles floues en fonction du sens d'évolution et du signe algébrique de e .

Alors la commande cde sera:

- ✓ Nulle (ZE) si e est nulle (ZE).
- ✓ Grande positive (GP) si e est positive dans les deux situations de croissance et décroissance.
- ✓ Grande négative (GN) si e est négative dans les deux situations de croissance et décroissance.
- ✓ Négative (N) si e est croissante vers zéro.
- ✓ Positive (P) si e est décroissante vers zéro.
- ✓ SI e est ZE, ALORS cde est ZE.

SI e est P, ALORS cde est GP.

Ainsi, les règles floues seront définies comme suit:

- ✓ SI e est N, ALORS cde est GN.
- ✓ SI e est ZE ET Δe est P, ALORS cde est N.
- ✓ SI e est ZE ET Δe est N, ALORS cde est P.

III-9-Conclusion :

Comme mentionné précédemment, ce chapitre s'est concentré sur les principes du concept de la logique floue d'un contrôleur mystérieux pour les utilisateurs ultérieurs dans l'organisation de divers problèmes de contrôle. Dans le chapitre suivant, nous étudierons le côté appliqué du régulateur floue.

Chapitre IV

Modélisation et Simulation Numérique

IV-1 Introduction:

L'objectif principal de ce travail est la compensation des courants harmoniques en utilisant le filtre actif à base un convertisseur statique (onduleur de tension à deux niveaux). Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation des différentes parties du système global: le réseau électrique, la charge polluante (redresseur en pont tout diodes), et le filtre actif parallèle.

Nous exposons dans ce chapitre les différents résultats obtenus en simulation et des tests. Ces résultats ont été relevés pour un réglage classique à l'aide des régulateur PI et régulateur flou de la tension du bus continu , enfin nous présentons les résultats de simulation obtenus dans l'environnement Matlab/ Simulink avec interprétation.

IV-2-Schéma synoptique de l'association filtre – réseau – charge polluante :

Le filtre actif parallèle est un onduleur de tension commandé en courant, qui possède un condensateur comme source continue et qui est connecté au réseau perturbé à travers un filtre inductif [45].

La figure (IV.1) donne le schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluant.

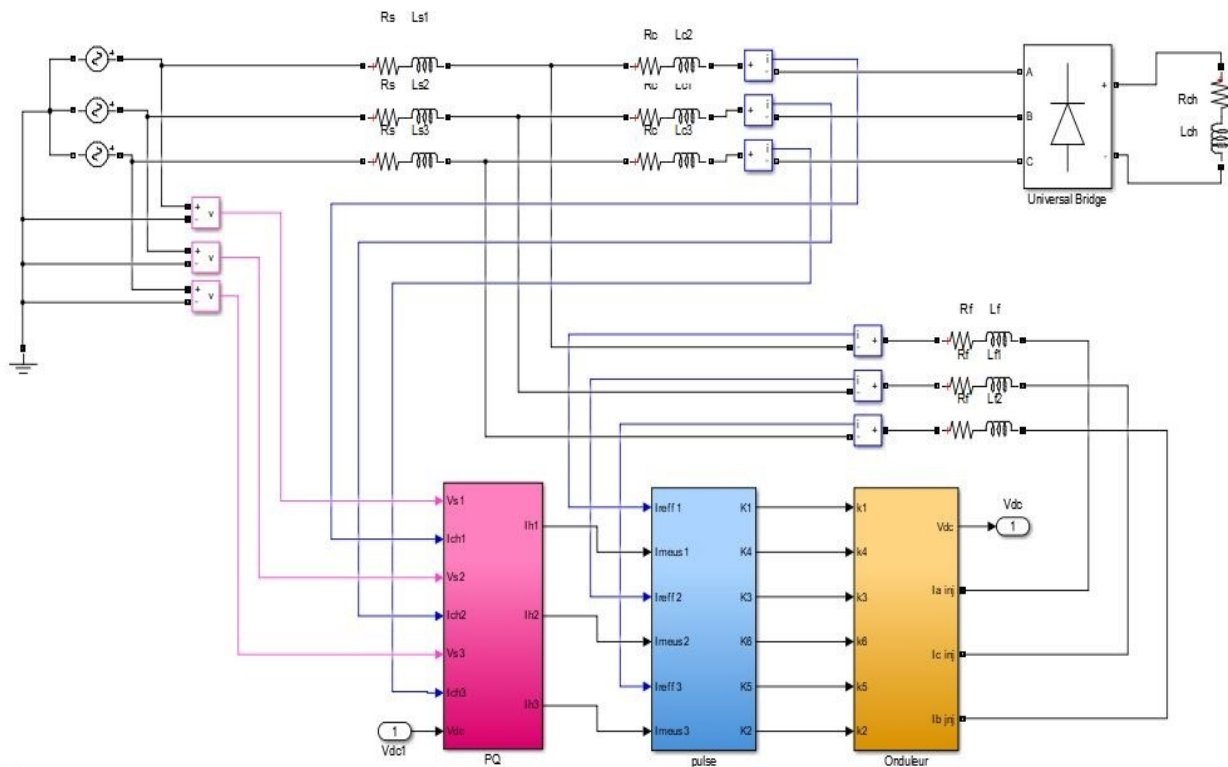


Figure IV . 1: Schéma synoptique de l'association filtre actif-réseau-charge polluant.

✓ Schéma bloc détaillé la méthode des puissances instantanées avec la régulateur flou :

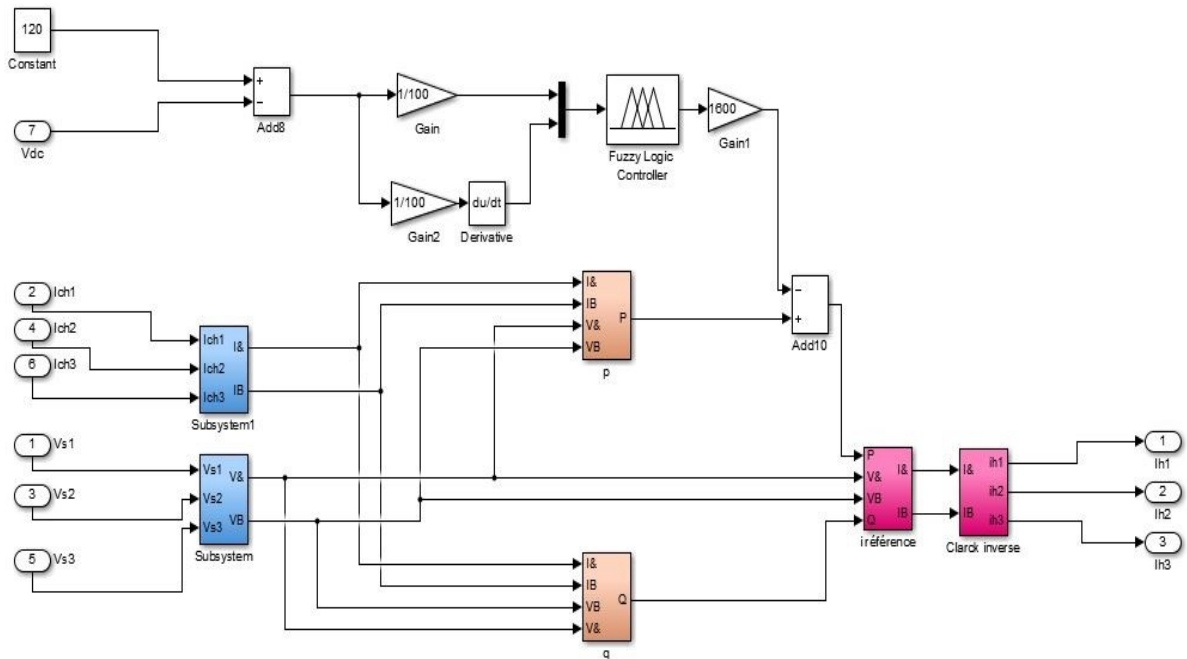


Figure IV .2: Schéma bloc de méthode des puissances instantanées avec la régulateur flou.

IV-3-Modélisation de l'association réseau- Filtre actif- Charge polluante :

La modélisation d'un système revient à trouver les équations mathématiques qui décrivent son fonctionnement [14] .

IV-3-1 Modélisation du réseau :

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance, dite de court-circuit, d'où la représentation du réseau par un système de F.E.M triphasées équilibrées en série avec une impédance [45] .

$$\begin{bmatrix} e_{s1} \\ e_{s2} \\ e_{s3} \end{bmatrix} = \sqrt{2} E \begin{bmatrix} \sin(\omega_s t) \\ \sin(\omega_s t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega_s t + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \tag{IV-1}$$

Les tensions de phase sont :

$$\begin{bmatrix} v_{s1} \\ v_{s2} \\ v_{s3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_{s1} \\ e_{s2} \\ e_{s3} \end{bmatrix} - R_s \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} - L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s1} \\ i_{s2} \\ i_{s3} \end{bmatrix} \tag{IV-2}$$

$$Z_s = R_s + jL_s \omega \tag{IV-3}$$

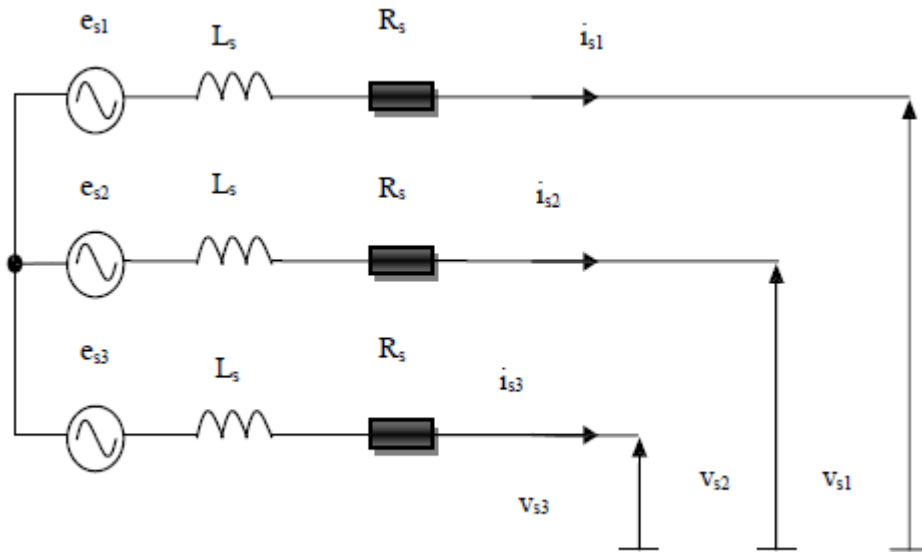


Figure IV .3: Schéma synoptique d'un réseau triphasé.

IV-3-2 Modélisation de la charge polluante (Redresseur triphasé) :

Pour tester ce filtre actif, nous avons sélectionné un redresseur de triphasé comme charge représenté sur la figure (IV.3) , débitant sur une charge inductive R-L. . Étant donné que ce pont redresseur est responsable de génère des harmoniques de courants de l'ordre $6K \pm 1$. que nous voulons filtrer, Cette charge est modélisé comme étant des sources de courants parfaites (les semi-conducteurs sont considérés parfaits) [14] .

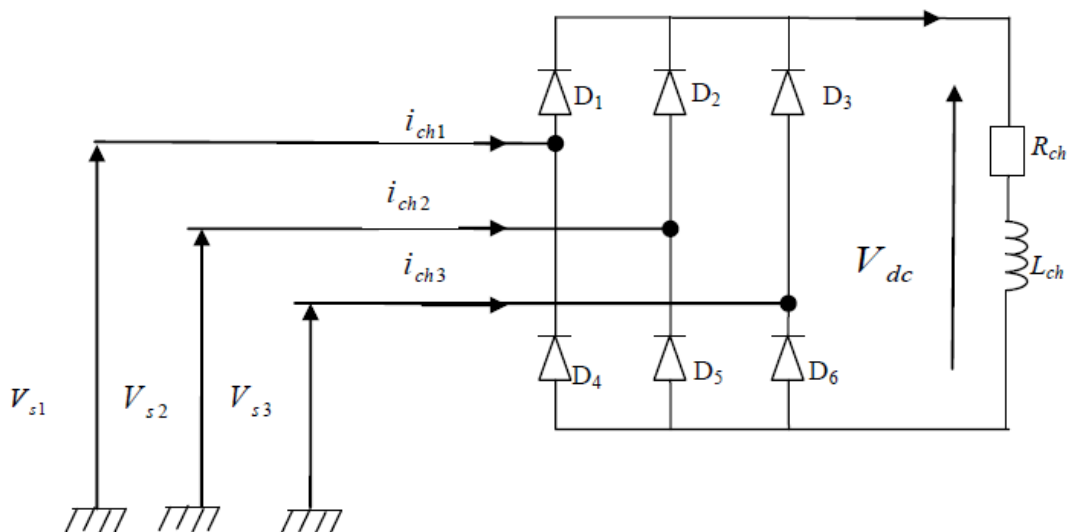


Figure IV .4: Schéma d'une charge non-linéaire (un pont redresseur).

IV-3-3 Modélisation du filtre actif (ou de l'onduleur) :

Dans notre étude, on choisit un onduleur de tension commandé en courant. Ce dernier est constitué de trois bras dont chacun est constitué de deux cellules, contenant chacune un interrupteur bicommandable (MOSFET), aux bornes duquel est montée une diode en antiparallèle, la cellule ainsi définie forme un interrupteur bidirectionnel (figure(IV-4)) [14] .

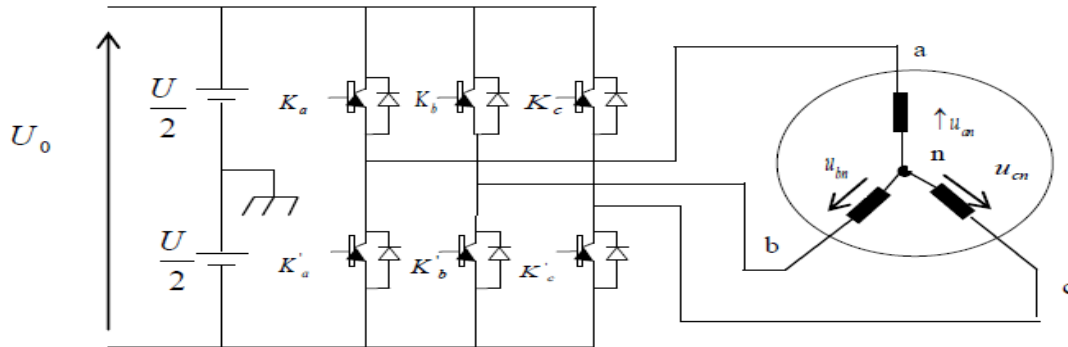


Figure IV . 5: Schéma représentatif d'un onduleur de tension triphasé.

Pour les tensions composées u_{ab} , u_{bc} et u_{ca} , on a :

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{ao} - u_{bo} \\ u_{bc} = u_{bo} - u_{co} \\ u_{ca} = u_{co} - u_{ao} \end{cases} \quad (IV-4)$$

u_{ao} , u_{bo} et u_{co} peuvent être considérées comme des tensions d'entrée à l'onduleur (tensions continues).

Soit " n" l'indice du point neutre du coté alternatif. On a:

$$\begin{cases} u_{ao} = u_{an} - u_{no} \\ u_{bo} = u_{bn} - u_{no} \\ u_{co} = u_{cn} - u_{no} \end{cases} \quad (IV-5)$$

u_{an} , u_{bn} et u_{cn} sont les tensions simples de la charge et u_{no} est la tension fictive entre le neutre de la charge et le point fictif d'indice "o".

Sachant que la charge est équilibrée et le neutre isolé alors:

$$u_{an} + u_{bn} + u_{cn} = 0 \quad (IV-6)$$

La substitution de (IV.6) dans (IV.5) aboutit à:

$$u_{no} = \frac{1}{3} \cdot (u_{ao} + u_{bo} + u_{co}) \quad (IV-7)$$

En remplaçant (IV.7) dans (IV.5), on obtient:

$$\begin{cases} u_{an} = \frac{2}{3} u_{ao} - \frac{1}{3} u_{bo} - \frac{1}{3} u_{co} \\ u_{bn} = -\frac{1}{3} u_{ao} + \frac{2}{3} u_{bo} - \frac{1}{3} u_{co} \\ u_{cn} = -\frac{1}{3} u_{ao} - \frac{1}{3} u_{bo} + \frac{2}{3} u_{co} \end{cases} \quad (\text{IV-8})$$

En utilisant les variables booléennes de l'état des interrupteurs on a:

$$\begin{cases} u_{ao} = U \cdot K_a \\ u_{bo} = U \cdot K_b \\ u_{co} = U \cdot K_c \end{cases} \quad (\text{IV-9})$$

En remplaçant (IV-9) dans (IV-8), on obtient:

$$\begin{bmatrix} u_{an} \\ u_{bn} \\ u_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U}{3} \times \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} K_a \\ K_b \\ K_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV-10})$$

Par principe, cet onduleur a un fonctionnement discret. Il ne peut prendre que $2^3=8$ état.

(Combinaison des trois grandeurs K_a , K_b , K_c).

- **Représentation vectorielle des tensions fournies par l'onduleur :**

Dans le plan biphasé en considérant $V_F(s)$ le vecteur correspondant aux tensions de l'onduleur, les huit cas possibles du vecteur $V_F(s)$ sont donnés par le tableau (IV.1) et la figure (IV.5):

k	0	1	2	3	4	5	6	7
Mod (v_f)	0	$\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$	$\sqrt{\frac{2}{3}} v_{dc}$	0
Arg (v_f)		0	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3}$	π	$\frac{4\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3}$	

Tableau IV. 1: Tensions générées par l'onduleur.

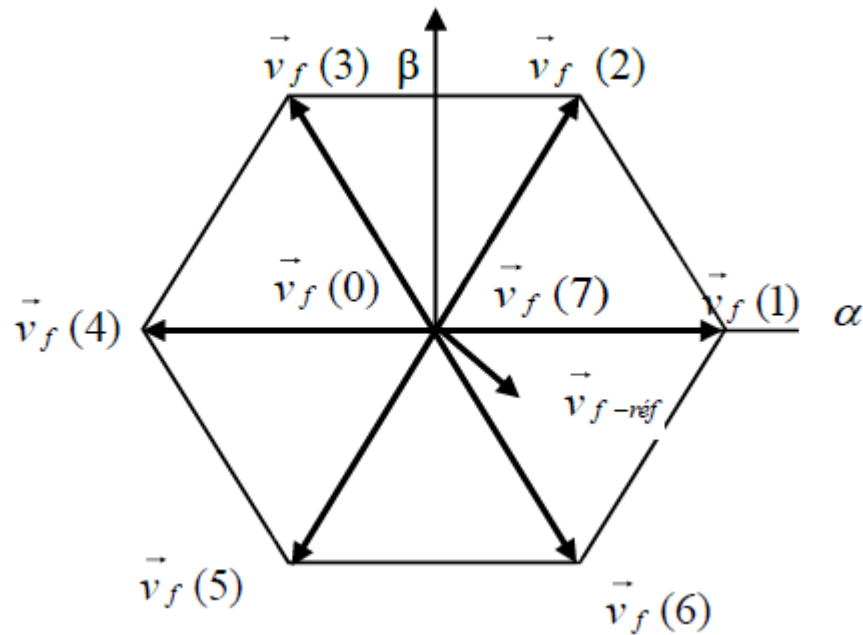


Figure IV . 6: Représentation vectorielle des tensions générées par l'onduleur.

- V_{dc} la tension aux bornes de la source flottante C_{dc} , en un premier temps nous la considérerons constante.
- Où $v_{f-réf}$ représente la tension de référence que doit produire l'onduleur pour pouvoir créer les courants perturbateurs identifiés. Ceci signifie que l'onduleur n'est pas capable de fournir des tensions égales aux tensions de référence que si le vecteur formé par ces derniers reste à l'intérieur de l'hexagone de la figure (IV . 5) [45]

IV-4-Résultats de simulation sous Matlab-Simulink :

La modélisation globale de la structure , présentée dans la figure (IV-1) , a permis d'étudier la validité fonctionnelle du filtre actif parallèle a travers plusieurs simulation. Les valeurs des éléments caractérisant cette structure ont été regroupées dans le Tableau (IV-2) .

Réseau électrique
$V_s = \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ V}, F_s = 50 \text{ Hz}, R_s = 0.42\Omega, L_s = 2.5e-3\text{H}$
Charge polluante
Résistance et inductance de l'entrée du redresseur: $R_c = 0.2 \Omega, L_c = 1e-3(\text{H}).$
Pont de Gréât alimentant une charge R-L série: $R_{ch} = 15\Omega, L_{ch} = 3e-3\text{H}.$
Filtre parallèle
$V_{dcref} = 120\text{V}, C_{dc} = 1.1e-3\text{F},$ $R_f = 0.4\Omega, L_f = 5e-3\text{H}, F_c = 50 \text{ Hz}$
Commande hystérésis
$\Delta I = \mp 0.01\text{A}$
Régulateur PI
$K_i = 39.08, K_P = 0.29$
Régulateur flou
Flou $G_e = 1/100, G_{\Delta e} = 1/100, G_{ce} = 1600$

Tableau IV. 2: Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.

IV-4-1-Résultats de simulation de filtre actif parallèle par régulateur PI:

IV-4-1-1-Comportement du FAP en régime permanent :

IV-4-1-1-1-Compensation des courants des harmoniques :

La figure (IV-10) montre respectivement les formes d'ondes du courant de charge I_{ch} , courant du filtre actif I_f , courant de source I_s et tension aux bornes du condensateur V_{dc} obtenues pour un régulateur PI.

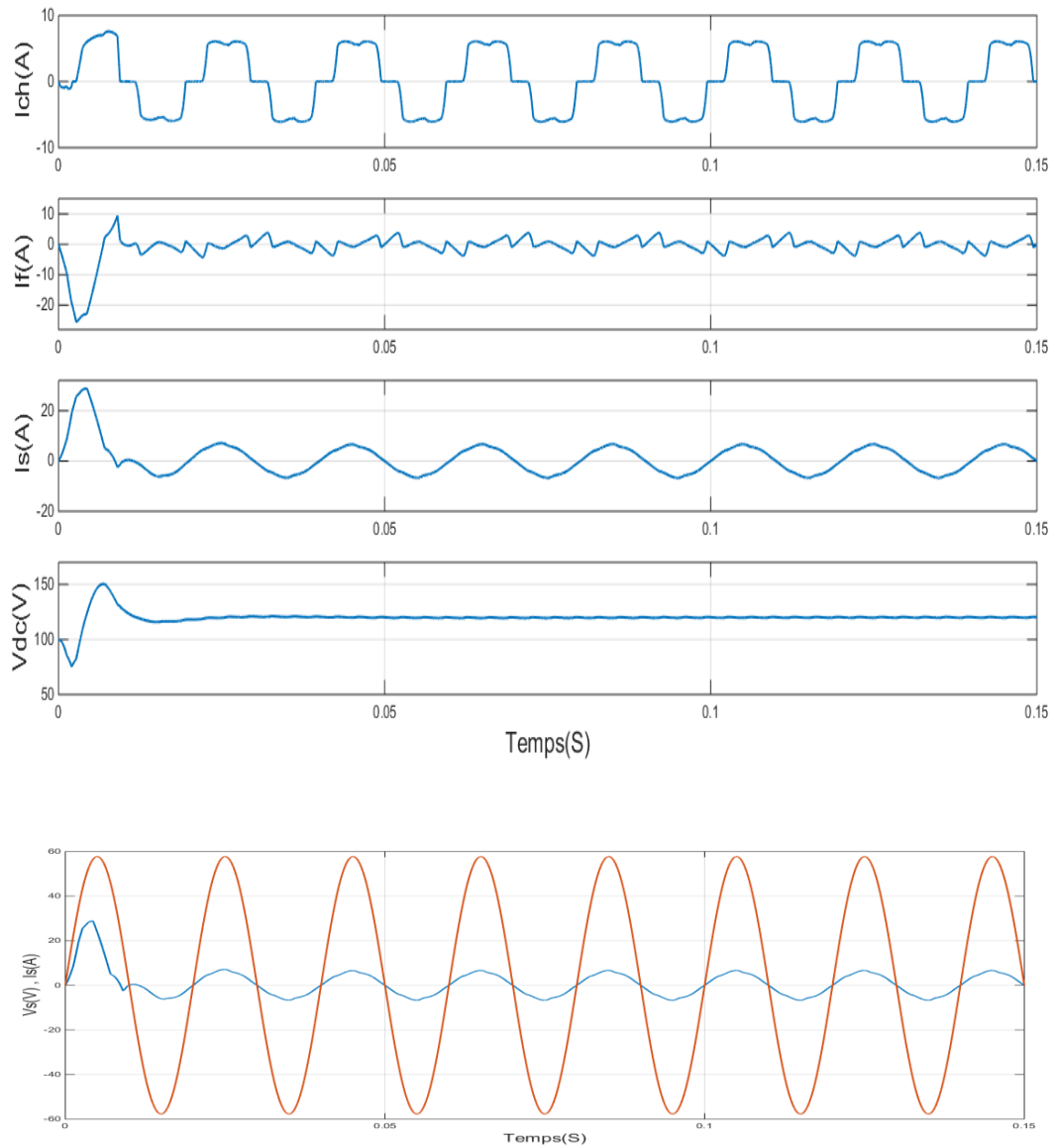


Figure IV . 7: Résultats de simulations de: I_{ch} : Courant de charge , I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur et V_s : Tension de source.

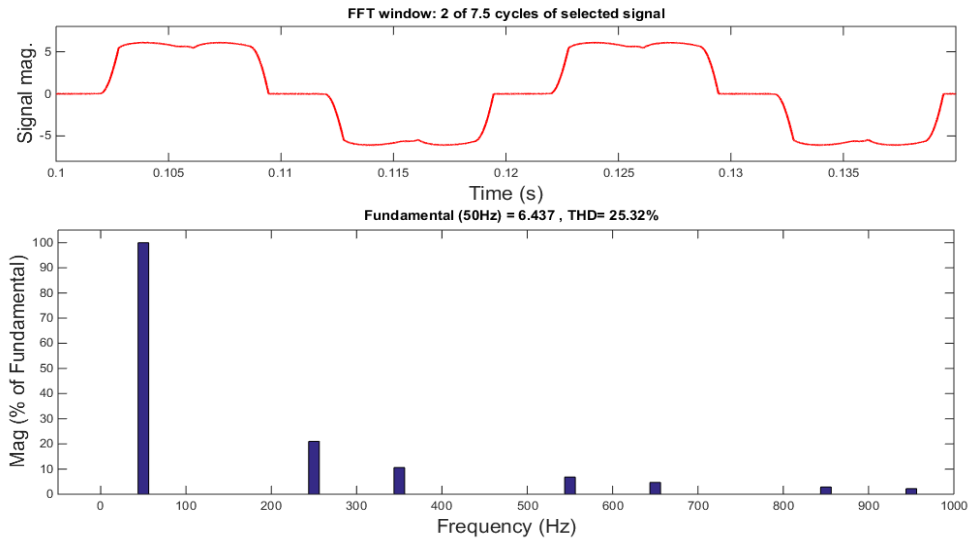


Figure IV . 8: Courant source Is avant filtre et son analyse spectrale.

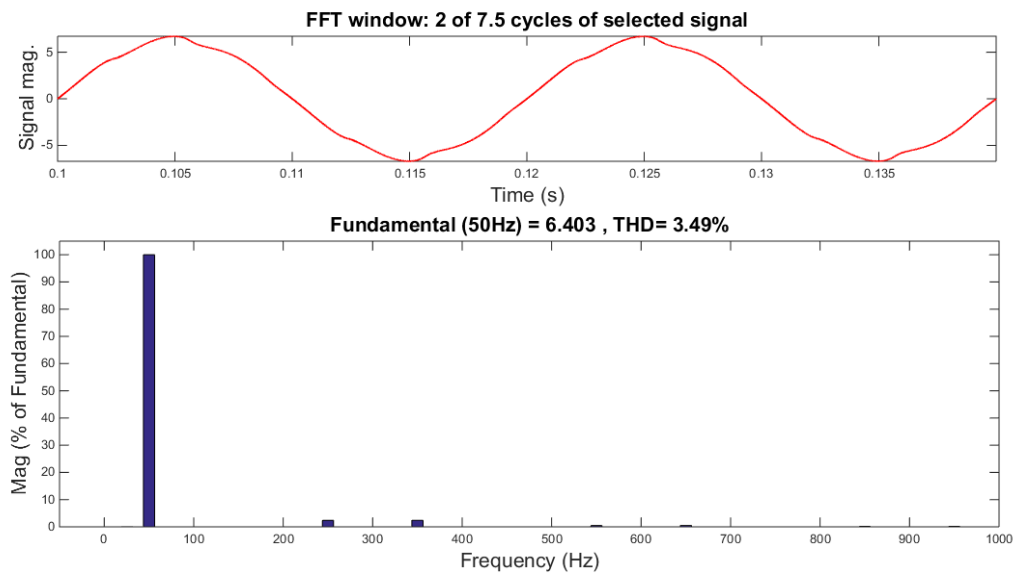


Figure IV . 9: Courant source Is après filtre et son analyse spectrale.

IV.4-1- 2 Comportement du FAP en régime dynamique (Changement de la charge) :

Pour étudier l'adaptation et le comportement du FAP en régime dynamique, nous avons procédé à une variation de la charge non linéaire et une variation de la tension du bus continu. Le passage de la charge(1) à la charge(2), se fait à l'instant $t=0.07$ sec. Comme le montre les figures suivants:

charge RL1 : $R_{ch1}= 15$, $L_{ch1}= 3e-3H$

charge RL2 : $R_{ch2}= 12$, $L_{ch2}= 3e-3H$

- **Changement de la charge :**

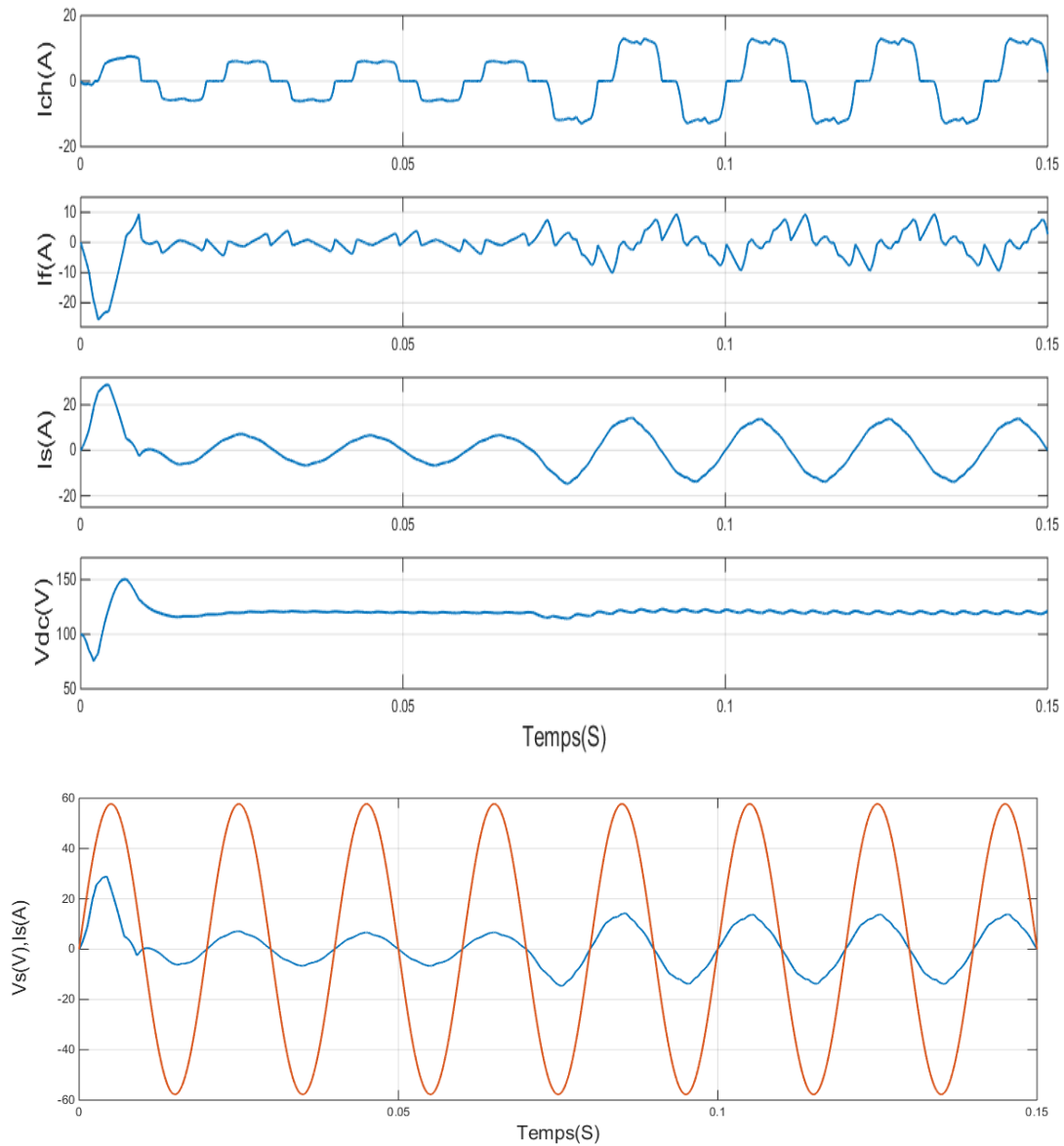


Figure IV . 10: Résultats de simulations de: I_{ch} : Courant de charge, I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur et V_s : Tension de source.

IV.4-1-3- Interprétations des résultats :

D'après les résultats de simulation obtenus sur les figures ci-dessus montrant la compensation des courants d'harmoniques, et la puissance réactive en utilisant la méthode de p-q comme une méthode d'identification des courants harmoniques des références appliquée à un filtre actif de puissance à deux niveau à trois bras avec une commande d'hystérésis, et régulateur proportionnel; on remarque que:

A) En régime permanent :

- la figure (IV. 7) montre que le courant « I_s » est quasi-sinusoïdal, néanmoins un pic apparaissant dans le premier temps. En outre, le courant de source après la compensation est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui signifie la correction du facteur de puissance, ce qui prouve une bonne qualité du filtrage avec FAP.
- La tension entre bornes du condensateur (V_{dc}) dans la Figure (IV. 7) est presque constante, elle fluctue d'un très faible pourcentage autour de la valeur de référence (120 V). C'est-à-dire, le régulateur de bus continue à faire un travail efficace en termes de régulation et stabilité de tension.
- la Figure (IV. 8) représente la forme d'onde du courant de source I_s qui est avant le filtre. Nous remarquons que les harmoniques existent intensivement et cela s'explique par spectrale pour cette étape où elle atteint THD à 25.32 %.
- la Figure (IV. 9) représente la forme d'onde du courant de source I_s qui est après le filtre. On remarque très peu d'harmoniques et cela s'explique par spectrale pour cette étape où elle atteint THD à 3.49 %.

B) En régime dynamique :

la Figure (IV. 10) montre les résultats dans le cas où on ajoute une autre charge. Nous remarquons un changement dans la valeur de débordement dans ce cas, On note également que le courant de source I_s a conservé la même forme (sinusoïdale).

IV.4-2-Résultats de simulation de filtre actif parallèle par régulateur flou :

Dans cette expérience, nous allons remplacer le régulateur PI par le régulateur flou et extraire les résultats

IV-4-2-1- résultat de simulation :

La figure (IV-11) montre respectivement les formes d'ondes du courant de charge I_{ch} , courant du filtre actif I_f , courant de source I_s et tension aux bornes du condensateur V_{dc} obtenues pour un régulateur flou.

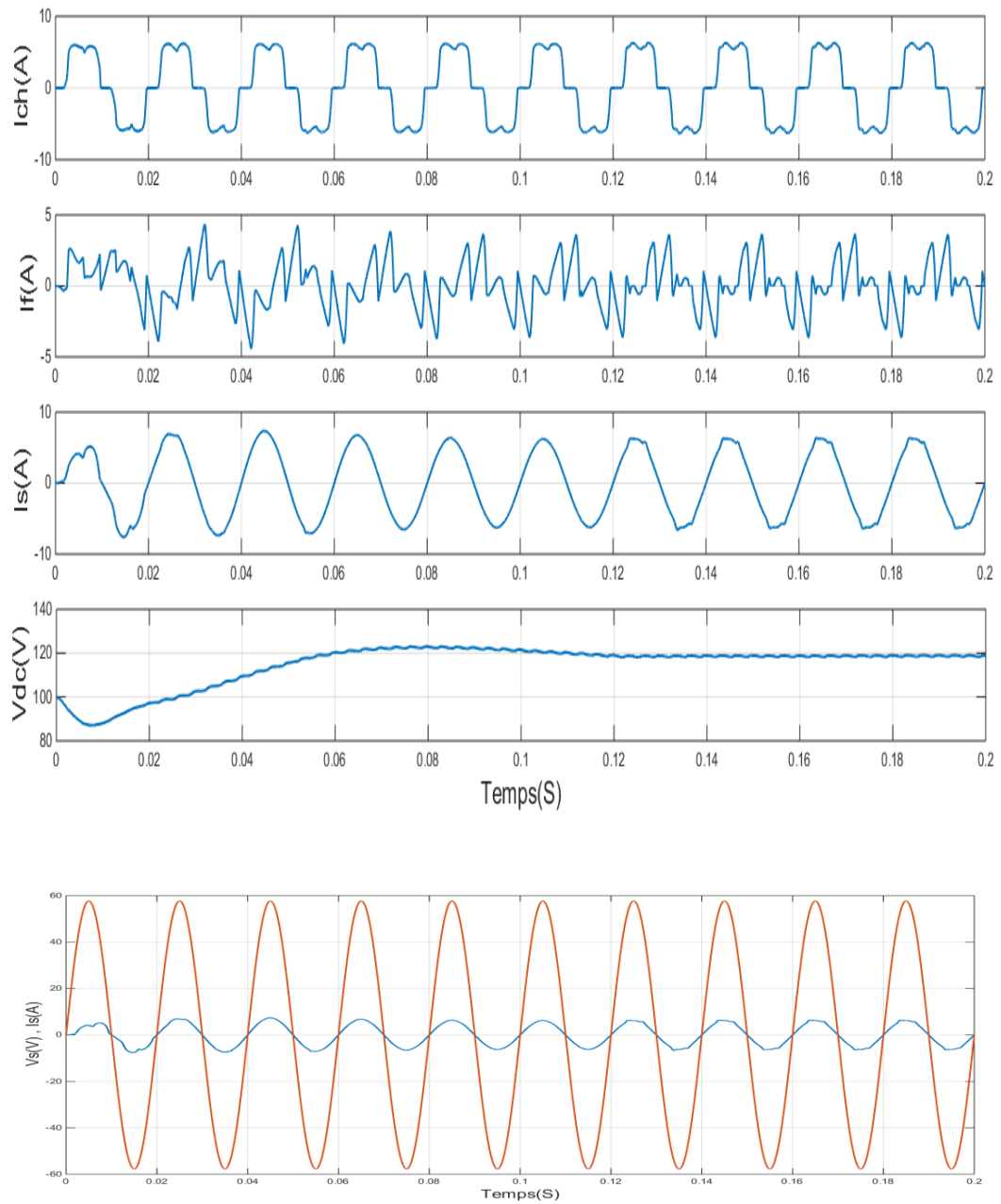


Figure IV . 11: Résultats de simulations de: I_{ch} : Courant de charge , I_f : Courant de filtre actif, I_s : Courant de source, V_{dc} : Tension aux bornes du condensateur et V_s : Tension de source.

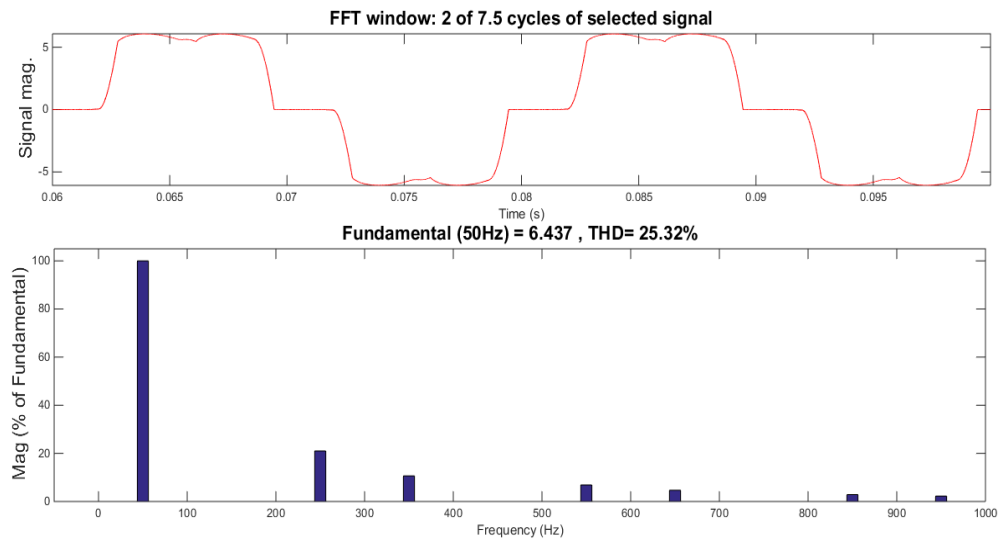


Figure IV . 12: Courant source I_s avant filtre et son analyse spectrale.

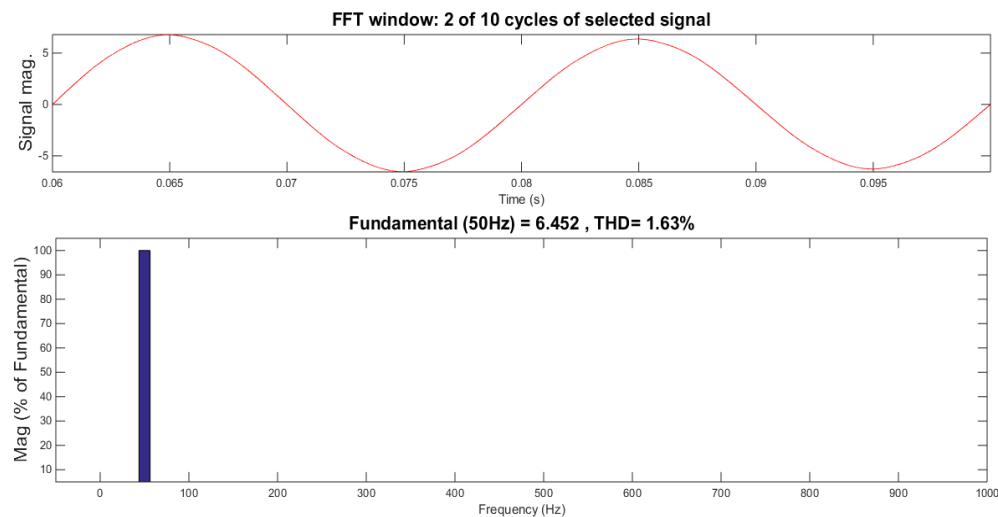


Figure IV . 13: Courant source I_s après filtre et son analyse spectrale.

IV.4-2-2- Interprétations des résultats :

- la figure (IV. 11) montre que le courant de source après la compensation est presque sinusoïdale et en phase avec la tension de source, ce qui prouve une bonne qualité du filtrage.
- La tension aux bornes du condensateur (V_{dc}) dans la Figure (IV. 11) est presque constante ($V_{dc} = 120v$).
- la Figure (IV. 12) représente la forme d'onde du courant de source I_s qui est avant le filtre. Nous remarquons les harmoniques existent intensivement et cela s'explique par spectrale pour cette étape où elle atteint THD à 25.32 % .

- la Figure (IV. 13) représente la forme d'onde du courant de source I_s qui est après le filtre. On remarque très peu d'harmoniques et cela s'explique par spectrale pour cette étape où elle atteint THD à 1.63 % .

Commande	charge	THD % avant filtre	THD % après filtre
Command par régulateur PI	Charge RL	25.32 %	3.49 %
Command par régulateur flou	Charge RL	25.32 %	1.63 %

Tableau IV. 3:Les résultat des simulations.

IV-5- conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre le schéma global de système filtrage(source -filtre- Charge) avant et après compensation, ainsi que les résultats de simulation et les interprétations obtenues en utilisant stratégie de commande hystérésis de l'onduleur avec un régulateur PI et régulateur floue .

Conclusion général

Conclusion général :

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

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouvelles solutions pour la minimisation de la perturbation harmonique des réseaux électriques. Il est consacré à l'étude théorique et la simulation d'un filtre actif parallèle a structure tension présente une caractéristique de filtrage très intéressante. Les performances du filtre actif sont liées au stratège de commande pour l'élimination des harmoniques dans les réseaux électriques.

Pour atteindre notre objectif dans ce travail nous choisissons la méthode des puissances instantanées réelles et imaginaire que nous donne des bons résultats et cette méthode s'est avérée très efficace dans le cas de la connexion des charges non-linéaires, pour la commande de l'onduleur triphasé nous utilisons la commande par hystérésis, puisqu'elle est une commande très simple à mettre en œuvre. Concernant la régulateur de bus continu nous avons utilisé un régulateur floue.

Les résultats obtenus uniquement par simulation (dans l'environnement Simulink / Matlab) démontrent que le filtre actif choisi peut réduire les harmoniques de courant à des valeurs inférieures à 5% conformes aux normes internationales; En plus d'une bonne compensation de l'énergie réactive, ce filtre s'adapte aux variations de charge. Le régulateur floue est également plus efficace et plus satisfaisant par rapport au régulateur PI.

Néanmoins le travail présenté dans le cadre de ce mémoire ouvre de larges perspectives dans le domaine de filtrage actif.

Nous pouvons citer :

- Etude du filtrage actif avec un onduleur à quatre fils pour les charges non équilibrés.
- Application d'autre technique de régulation de bus continu dans des méthodes d'intelligence artificielle comme , PSO , Réseau de neurones artificiels....etc.
- Application d'autre méthodes d'identification des courant perturbés .

Bibliographiques

BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Mr Boukadoum Aziz** , «contribution à l'analyse et la réduction de la pollution harmonique dans le réseau électrique» , Thèse Magister , Université badji Mokhtar Annaba , 2007 .
- [2] **Mustapha SARRA** , «contribution a l'étude des filtres actifs hybrides», thèse doctorat , université ferhat abbas – setif 1.
- [3] **Mr HARICI Otmane**, «Etude d'un filtre actif à commande Intelligente», Thèse Magister, Université de Oran , 2012.
- [4] **Tahri Meryem et Zoukha Djemaa** ,«Etude et simulation d'une commande robuste pour filtre actif de puissance à deux Bras a point milieu pour la compensation de courant harmonique» , thèse Master , Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen ,2017 .
- [5] **CHELLI Zoubir**, «Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filter actif d'harmonique», Thèse Doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba,2015.
- [6] **Yahiaoui Merzoug** , « Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS » , Thèse Doctorat, Université Des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf , 2014.
- [7] **OMEIRI AMAR** , «Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant», Thèse Doctorat d'état , Université badji Mokhtar Annaba ,2007.
- [8] **LABBI Imad, ZOBEIDI Smail, DJABALLAH Mounir** , « filtrage actif parallele des reseaux électriques» , Thèse D'ingénieur d'état en génie électrotechnique, Universite de m'sila ,2012.
- [9] **GATTAL BOULAARES** , «méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualite de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension» , Thèse Magister , Université de Batna ,2012.
- [10] **NEKKAR Djamel** , «Contribution à l.Etude des Stratégiesde Commande des Filtres Actifs Triphasés» , Thèse Master , Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras, 2014 .
- [11] **BOUAFIA ABDELOUAHAB** , «techniques de commande prédictive et floue pour les systèmes d'électronique de puissance: application aux redresseurs a mli» ,Thèse Doctorat , université ferhat abbas – setif , 2010.
- [12] **AMROUNE Mourad**, « Commande et diagnostic d'un filtre actif parallèle», Thèse Master, Université Mohamed Boudiaf de M'SILA, 2016.
- [13] **Bedir Zouheir , Rhaskali Walid, Benlebarak Bilal** , «Compensation du courant harmonique génère par une charge non linéaire», Thèse D'ingénieur d'état en génie électrotechnique ,Université de m'sila ,2011.

- [14] **ZELLOUMA Laid**, « Filtrage actif parallèle des harmoniques du courant générés par un pont redresseur triphasé non commandé », Thèse Magister, Université Badji Mokhtar Annaba, 2006.
- [15] **BACHAR Rahima**, « Commande Prédictive Appliquée au Filtre Actif », Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 2019.
- [16] **Djaffar OULD ABDESLAM**, « Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension » Thèse Doctorat, Université de Haute-Alsace, thèse doctorat, 2005.
- [17] **Mr. Galou Elhacène, Melle. Hamani Rachida**, « Contribution à La Commande d'un filtre actif parallèle », Thèse Master, Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA, 2017.
- [18] **DJEDIDI terek, DJOUADI abdelkader**, « Commande Prédictive d'un Filtre Actif Parallèle », Thèse Master, L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued, 2017.
- [19] **Sahli Abdeslem**, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », Thèse Magister, Université ferhat abbas – setif, 2012.
- [20] **SEMAOUI Hammou**, « compensation de l'énergie réactive d'une installation industrielle MT/BT (HTA/BTB) », Thèse Master, Université Mohamed Boudiaf de M'SILA, 2016.
- [21] **HAMOUDA Noureddine**, « Amélioration de la Qualité du Réseau Electrique à l'Aide de Compensateurs Actifs », Thèse Doctorat, université freres mentouri constantine 1, 2018.
- [22] **Kamel DJAZIA**, « Etude des filtres actifs pour réseaux déséquilibrés et distordus », Thèse Doctorat, Université ferhat abbas – setif 1, 2015.
- [23] **Abdelmadjid CHAOUI**, « filtrage actif triphase pour charges non lineaires », Thèse Doctorat, université de ferhat abbas de sétif, 2010.
- [24] **BELHAOUCHET NOURI**, « Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées », Thèse Doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 2011.
- [25] **Mohamed Muftah ABDUSALAM**, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales », Thèse Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2008.
- [26] **Bensalah Wassila, Boutaleb Nour el Houda**, « Etude de la commande des redresseurs MLI », Thèse Master, Centre Universitaire Belhadj Bouchaïb d'Ain-Temouchent, 2016.
- [27] **Melle DJEBBAR Nassima, Mr BENMOUNA Adel**, « Commande par mode glissant d'un redresseur à MLI triphasé », Thèse Master, Université A. MIRA BEJAIA, 2015.

[28] **yousfi abdelkader** , «Amelioration De La Qualite D'energie Electrique En Utilisant Un Onduleur De Tension A Cinq Niveaux »,Thèse Magister , Universite hassiba benbouali de chlef , 2008.

[29] **BENNAIDJA Tarek**, « Filtrage actif pour les réseaux déséquilibrés et distordus» , Thèse Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF-1- , 2014.

[30] **Sabir OUCHEN**, «Intitulé Contribution à la Commande Directe de Puissance Dédiée au Filtrage Actif, Associé à une Source Photovoltaïque», Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra .

[31] **ANOUAR NASRI**,«LA COMMANDE PREDICTIVE D'UN FILTRE ACTIF PARALLEL » , Thèse Master , Université Larbi Ben M'hidi Oum-El-Bouaghi,2019.

[32] **ZOUAK Abdessamed DECHOUCHA Kheirddinne** , «COMMANDE PAR LOGIQUE FLOUE D'UN FILTRE ACTIF PARALLELE» , Thèse Master, Universite Mohamed Boudiaf - M'sila , 2019 .

[33] **Barkat Fathi** , « Contribution à l'étude de la Commande de Filtre Actif parallèle par régulateur PI et logique floue» , Thèse Master , Universite Ahmed Draia Adrar , 2017 .

[34] **TETBIRTAissa** , **BOUGHAR Abdelkhalek** ,« Commande d'un filtre actif shunt trois niveaux par logique floue» , Thèse Master , Universite De Djilali Bounaama-Khemis Miliana , 2015

[35] **Mr HAMITI Tarik** , **Mlle GAOUA Celia** , «Commande d'un filtre actif d'harmonique à trois fils» , Thèse Master , Universite A.Mira-Bejaia , 2018 .

[36] **monsieur TOUFOUTI RIAD** ,«Contribution a la commande Directe du couple De la machine asynchrone» Thèse Doctorat , Université Mentouri Constantine , 2008 .

[37] **YETTOU miloud** , **DEBLA nacer Eddine** , «Commande d'un Filtre Actif Parallèle À trois niveaux (NPC) Par différentes stratégies de commande» , Thèse Master , Université Mohamed Boudiaf - M'sila , Université Mohamed Boudiaf - M'sila , 2018 .

[38] **Tidjani MAHNI** , «Etude et Conception d'un Filtre Actif Parallèle Triphasé a Quatre Fils en vue de sa Commande par des Méthodes d'Intelligence Artificielle» , Thèse Doctorat , Université Mohamed Khider - Biskra , 2017 .

[39] **Doukhi Nacer** , «Contribution à l'Étude de la Qualité de L'Énergie» , Thèse Magister , Université El-Hadj Lakhdar Batna , 2016 .

[40] **Soumia Larabi & Juma Shabani Amani** , «Etude et simulation d'une commande d'un filtre actif de puissance basé sur les ondelettes» Thèse Master , Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen , 2017 .

- [41] **GHADBANE ISMAIL** ,«Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs» , Thèse Magister , Université Mohamed Kheider – Biskra , 2011 .
- [42] **Melle Hind Djeghloud** ,«Filtrage actif de puissance» , Thèse Doctorat ,Université Mentouri Constantine ,2007.
- [43] **Telli Abdelwahab ,Chouidira Ibrahim** ,«Commande par logique floue d'un Filtre actif parallèle avec correction du facteur de puissance» , Thèse Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila ,2017.
- [44] **Mokeddem Diab** ,«Contrôle Flou des Processus Biotechnologiques à Base d'Algorithmes Génétiques», Thèse Doctorat ,Université Ferhat Abbas De Setif , 2010 .
- [45] **Talbi Nesrine** , «Conception des Systèmes d'Inférence Floue par des Approches Hybrides : Application pour la Commande et la Modélisation des Systèmes Nonlinéaires» , Thèse Doctorat Université de Constantine 1, 2014 .
- [46] **ALIA Imane** , « Étude et Réalisation d'un Filtre Actif Parallèle de Puissance Commandé par DSPACE1104» ,Thèse Master , Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued , 2019.
- [47] **Laid ZELLOUMA** , «Contribution à l'étude du filtrage des harmoniques des réseaux de distribution à l'aide du filtre actif» , Thèse Doctorat , Université Badji Mokhtar Annaba ,2010.