



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique



Université Ahmed Draia Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique
Filière : Electrotechnique

Option : Commande électrique
Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :
MASTER

Thème

**Contribution à l'étude d'un filtre triphasé parallèle
par l'amélioration de qualité d'énergie.**

Présenté par :

- ❖ Mr. DELLALI MOHAMMED
- ❖ Mr. TIGHEZI ABDERRAHMANE

Devant le jury :

Encadré par :	Dr. Berbaoui Brahim	M.C. A	Univ.Adrar
Examineurs 1 :	Dr. Dhab. H	M.C. B	Univ.Adrar
Examineurs 2 :	Mme : Menasria. A		Univ.Adrar

SESSION 2022

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne populaire et démocratique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR

BIBLIOTHÈQUE CENTRALE

Service de recherche bibliographique

N°.....B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار

المكتبة المركزية

مصلحة البحث البليوغرافي

الرقم.....م/م.ب.ب/ج.أ/2021

شهادة الترخيص بالإيداع

أنا الأستاذ: برباوي براهيم.

المشرف مذكرة الماستر.

الموسومة ب: المساهمة في دراسة مرشح متوازي ثلاثي الطور من خلال تحسين جودة الطاقة.

من انجاز الطالب: دلالي محمد.

والطالب: تيززي عبد الرحمان.

كلية: علوم وتكنولوجيا

قسم: الهندسة الكهربائية

التخصص: تحكم كهرباء

تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد أن الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية ولإلكترونية استوفت جميع شروطها.

وبإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والإلكترونية (PDF)

امضاء المشرف:

ادرار في

مساعد رئيس القسم:

رباوي براهيم

رئيس قسم علوم التكنولوجيا بكلية

العلوم والتكنولوجيا



Handwritten signature of the supervisor, B. B.

Remerciement

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

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et
n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et
l'encadrement de **Dr Berbaoui Brahim**, on le
remercie pour la qualité de son encadrement.*

*Je tiens également à remercier vivement les
membres de jury pour*

*Nos profonds remerciements vont également à
toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu
de près ou de loin principalement a à tous
l'effectif de l'Université AHMED DRAIA ADRAR*

Dédicaces

*Recevez ce mémoire en témoignage de ma
Profonde gratitude.*

Je dédie ce travail :

*A mes chers père et mère, je les remercie
pour leur amour, et ils m'ont encouragé
pendant mes années étudiantes*

A mes très chers frères chaque son nom.

Et mes très chères sœurs chaque son nom.

A mes oncles, et mes tantes.

A mes collègues et toutes mes amies.

Résumé :

La qualité des réseaux électriques dépend en grande partie des techniques de compensation du niveau des différentes charges non linéaires présentes dans le réseau. Ceci explique pourquoi la qualité des ondes électriques est loin d'être parfaite, du fait de l'utilisation de charges non linéaires qui génèrent des harmoniques de courant et consomment de la puissance réactive. A cet effet, notre thèse porte sur l'étude théorique avec simulation numérique du fonctionnement d'un filtre actif parallèle pour s'affranchir de ces harmoniques de courant. Ce travail est une étude d'amélioration de la qualité du courant au niveau de la source en éliminant le courant polluant (courant harmonique) dans les réseaux électriques à l'aide d'un filtre parallèle actif (PAF) à trois fils.

Le schéma proposé est validé par simulation dans un environnement MATLAB avec la commande MLI sinus-triangle. Les résultats obtenus montrent que la (FAP) est très efficace et très importante pour l'amélioration du Facteur de puissance et filtrage des harmoniques de courant au taux de distorsion.

Mot de Clé : Filtre . actif . parallèle (FAP)

Summary:

The quality of electrical networks largely depends on the techniques for compensating the level of the various non-linear loads present in the network. This explains why the quality of electrical waves is far from perfect, due to the use of non-linear loads which generate current harmonics and consume reactive power. To this end, our thesis focuses on the theoretical study with numerical simulation of the operation of a parallel active filter to overcome these current harmonics. This work is a study of improving the quality of the current at the source level by eliminating the polluting current (harmonic current) in the electrical networks using a parallel active filter (PAF) with three wires.

The proposed scheme is validated by simulation in a MATLAB environment with the sine-triangle MLI control. The results obtained show that the (FAP) is very efficient and very important for the improvement of power factor and filtering of current harmonics at the distortion rate.

key words : Filtre . actif . parallèle (FAP)

ملخص:

تعتمد جودة الشبكات الكهربائية إلى حد كبير على تقنيات تعويض مستوى الأحمال غير الخطية المختلفة الموجودة في الشبكة. وهذا يفسر سبب كون جودة الموجات الكهربائية بعيدة عن الكمال، بسبب استخدام الأحمال غير الخطية التي تولد التوافقيات الحالية وتستهلك الطاقة التفاعلية. تحقيقاً لهذه الغاية، تركز أطروحتنا على الدراسة النظرية مع المحاكاة العددية لتشغيل مرشح نشط متوازي للتغلب على هذه التوافقيات الحالية. هذا العمل عبارة عن دراسة لتحسين جودة التيار عند مستوى المصدر من خلال القضاء على التيار الملوث (التيار التوافقي) في الشبكات الكهربائية باستخدام مرشح نشط متوازي (FAP) بثلاثة أسلاك.

تم التحقق من صحة المخطط المقترح عن طريق المحاكاة في بيئة MATLAB مع تحكم MLI الجيبي المثلث. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن (FAP) فعال للغاية ومهم للغاية لتحسين عامل القدرة وتصفية التوافقيات الحالية بمعدل التشويه.

الكلمات المفتاحية : مرشح . نشط . متوازي

Liste des figures

Chapitre I : perturbation électrique dans le réseau électrique.

1 Fig. I.1 : Creux et coupure de tension.	5
2 Fig. I.2 : Fluctuation de tension.	6
3 Fig. I.3 : Surtension transitoire.....	6
4 Fig. I.4 : Surtension permanente.	7
5 Fig.I.5 : variation de fréquence.	7
6 Fig. I.6 : Cas particulier de déséquilibre du system triphasé.	8
7. Fig. I.7 : harmoniques	8
8 Fig. I.8 : Arrangement des types d'harmoniques.....	9
9 Fig. I.10 : charge non linéaire	11
10 Fig. I.9 : charge linéaire	11
11 Fig. I.11: Diagramme de Fresnel des puissances	12
12 Fig. I.12 : filtre passif connecté au réseau.....	14
13 Fig. I.13 : Filtre passif résonant	14
14 Fig. I.14 : Filtre actif série.....	15
15 Fig. I.15 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif en parallèle.	15
16 Fig. I.16 : Filtre actif série en série avec des filtres passifs parallèles.	16
17 Fig. I.17 : Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.....	16
18 Fig. I.18: Filtre actif parallèle	16

Chapitre II : Étude et modalisation de filtre actif parallèle.

19 Fig. II.1 : Schéma de principe du filtre actif parallèle.....	18
20 Fig. II.2 : Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.	19
21 Fig. II. 3 : Structure général d'un filtre actif parallèle source de tension.....	20
22 Fig. II.4 : Filtre actif parallèle à structure source de tension.....	21
23 Fig. II.5 : Filtre actif parallèle à structure de tension	24
24 Fig. II.6 : Semi –conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en tension	24
25 Fig. II.7 : Filtre actif parallèle à structure de courant.....	26
26 Fig. II.8 : Semi – conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en courant.....	26
27 Fig. II.9 : Réseau électrique triphasé.....	31
28 Fig.II.10 : Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge R, L.	32

29 Fig. II.11 : Filtre actif parallèle.	32
30 Fig. II.12 : Structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux.....	33
31 Fig. II.13 : Position du repère biphasé(α, β) relativement au repère triphasé (a, b, c).....	35
32 Fig. II.14 : Représentation des repères stationnaire (α, β) et tournant (d, q).....	36

Chapitre III : Commande classique du FAP

33 Fig. III.1: Filtrage des signaux dans le domaine temporel, a) Méthode directe, b) Méthode indirecte.	38
34 Fig. III.2: Détection du courant de la charge.	40
35 Fig. III.3: Détection du courant de la source..	41
36 Fig. III.4 : Principe de la méthode p, q.....	44
37 Fig. III.5: Le filtre passe-bas	45
38 Fig. III.6: Principe de la méthode SRF.....	46
39 Fig. III.7: Principe d'estimation du courant de référence de source par la régulation de la tension du bus continu.....	48
40 Fig.III.8 : Écoulement des puissances.....	50
41 Fig. III.9. : Schéma de principe de régulation des courants du FAP	51
42 Fig. III.10: Boucle de régulation des courants du FAP	52
43 Fig.III.11 : Principe de la stratégie sinus-triangulaire.....	57

Chapitre IV : Résultats de simulation

44 Fig. IV.1 : Schéma de simulation du circuit étudié	59
45 Fig. IV.2 : Forme d'ondes du courant de source	59
46 Fig. IV.3 : Allure du courant i_a et la tension V_{sa} de la source	59
47 Fig. IV.4 : Schéma bloc du filtre actif parallèle commande par MLI sinus triangulaire.....	60
48 Fig. IV.5 : Allure de la tension de référence et de la porteuse. ($V_{porteuse}, V_{référence}$.)	60
49 Fig. IV.6 : Allures des courants de la source après compensation.....	61
50 Fig. IV.7 : Structure générale du filtre actif parallèle étudié.....	61
51 Fig. IV.8 : Compensation des courants harmoniques.....	62
52 Fig. IV.9 : Décomposition spectrale, (a) Courant de la charge, (b) Courant injecté par le FAP (c) courant du réseau	63
53 Fig. IV.10 : Régulation de la tension du condensateur du FAP	63
54 Fig. IV.11 : (a) mesure des puissances avant filtrage.	64

Liste des tableaux :

Tableau 1 (II-1) : Tensions en sortie de l'onduleur (repère abc)-----	22
Tableau 2 (II-2) : Tension générées par l'onduleur à structure de tension.-----	25
Tableau 3 (II-3) : Courants générés par l'onduleur à structure de -----	27
Tableau 4 (IV.1) : Valeurs des éléments construisant la structure du FAP étudiée -----	62
Tableau 5(IV.2) : Comparaison du facteur de puissance entre avant et après filtration-----	65

Liste des Acronymes et Symboles :

IGBT	Insulte Gâte Bipolaire Transistor (transistor bipolaire à grille isolée).
FAP	Le filtre actif parallèle.
FAS	Le filtre actif série.
PI	Le régulateur proportionnel intégral.
THD	Total harmonique Distorsion (Taux de distorsion harmonique).
THD_i	THD du courant.
La méthode p-q	La méthode des puissances active et réactive instantanées.
SRF	Synchrones Reference Frame (Méthode du référentiel lié au Synchronisme).
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion (Pulse Wit Modulation).
PLL	Phase Locke Loop (boucle à verrouillage de phase).
R, L, C	Résistance, inductance, et condensateur coté continu.
TDD	Distorsion du courant par rapport à la demande maximale.
S	La puissance apparente.
P	La puissance Active.
Q	La puissance réactive.
D	La puissance déformante.
I_{eff}	Valeur efficace de l'harmonique de rang h.
I_{eff1}	Valeur efficace du courant fondamental.
i_s	Le courant de source (réseau).
i_f	Le courant du filtre actif
i_{h_ch}	Le courant harmonique de la charge.
I_{ref}	Courant de référence

$X_\alpha ; X_\beta$	Valeur dans le repère (α, β)
Sa, Sb, Sc	Les états des signaux de commande.
$S1, S2, \dots, S6$	Les gâchettes de l'onduleur de filtre actif.
V_{eff}	Tension efficace du réseau.
ω	Fréquence angulaire du réseau
δ	Angle d'amorçage des thyristors du redresseur.
I_d	Courant moyen de charge redressé aux bornes du redresseur
\bar{p}, \bar{q}	Puissance continue liée à la composante fondamentale active et réactive du courant
\tilde{p}, \tilde{q}	Puissance alternative liées à la somme des composantes harmonique du courant
K_p, K_i	Gain d'action proportionnelle, et gain d'action intégrale de PI.
\emptyset	Le déphasage entre le courant fondamental et la tension.
DPF	Le facteur de déplacement.

SOMMAIRE :

Introduction Générale.....	1
Chapitre 01 : Perturbation électrique dans le réseau électrique	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Qualité de l'énergie électrique	3
I.2.1. Qualité de la tension	3
I.2.1.1. Amplitude.....	3
I.2.1.2. Fréquence	3
I.2.1.3. Forme d'ond.....	4
I.2.1.4. Symétrie	4
I.3. Caractéristiques des perturbations électriques.....	4
I.3.1. Influences sur l'amplitude	5
I.3.1.1. Creux et coupures de tension	5
I.3.1.2. Fluctuations de tension	5
I.3.1.3. Surtension.....	6
I.3.2. Variation de fréquence.....	7
I.3.3. Déséquilibre du système triphasé de tension	7
I.3.4. Les harmoniques et inter-harmonique	8
I.3.4.1. Types des harmoniques	9
I.3.4.2. Origines des harmoniques	9
I.3.4.3. Décomposition d'un signal périodique.....	10
I.3.4.4. Tensions harmoniques	10
I.3.4.5. Courants harmoniques	10
I.3.4.6. Notion de charges.....	11
I.3.4.7. Caractérisation des Harmoniques.....	11
I.3.4.8 Les effets des harmoniques.....	13
I.4. Solution de dépollution des réseaux électriques.....	13

I.4.1. Les solutions traditionnelles	13
I.4.1.1. Filtrés passifs	13
I.4.1.2. Filtré passif résonant	14
I.4.2. Solutions des modernes	14
I.4.2.1. Filtré actif série (FAS)	15
I.4.2.2. Filtrés hybrides actifs et passifs	15
I.4.2.3. Filtré actif parallèle (FAP)	16
Conclusion	17
Chapitre II : Étude et modalisation de filtré actif parallèle	17
II.1. Introduction	18
II.2. Principe de filtrage actif parallèle de puissance	18
II.3. Structure et caractéristiques du filtré actif parallèle	19
II.3.1. La partie puissance	20
II.3.1.1. L'onduleur de tension	20
II.3.1.2. Le circuit de stockage d'énergie	22
II.3.1.3. Le filtré de sortie	22
II.3.2. La partie contrôle-commande	23
II.3.3. Filtré actif parallèle à structure de tension	23
II.3.4. Filtré actif parallèle à structure de courant	25
II.3.5. Comparaison des structures de filtres actifs parallèle	27
II.4. Modélisation du filtré actif parallèle	31
II.4.1. Modélisation du réseau électrique	31
II.4.2. Modélisation de la charge polluante	31
II.4.3. Modélisation de l'onduleur de tension	32
II.4.4. Modèle du FAP dans le repère triphasé (a, b, c)	34
II.4.5. Modèle du FAP dans le repère stationnaire (α, β)	35
II.4.6. Modèle du FAP dans le repère tournant (d, q)	36

Conclusion	37
Chapitre III : Commande classique du FAP	38
III.1. Introduction.....	38
III.2 stratégies de commande.....	38
III.2.1. Identification des courants de référence.....	38
❖ Les méthodes globales d'extraction.....	38
❖ Les méthodes d'extraction sélectives.....	39
III.2.1.1. Les méthodes d'identification.....	39
III.2.1.1.2. Méthodes du domaine temporel	39
❖ Identification à partir de la détection du courant de la charge Polluante :	40
❖ Identification à partir de la détection du courant de la Source :	40
III.2.1.2. Les méthodes de calcul de courant de référenc.....	41
III.2.1.2.1. Méthode des puissances active et réactive instantanées (Méthode p, q).....	41
III.2.1.2.2. Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF).....	44
III.2.1.2.3. Méthode d'estimation du courant de référence de source par la régulation de la tension du bus continu	46
III.2.2. La poursuite de courant de référence.....	48
III.2.3. La régulation de la tension aux bornes de la source de tension continue	49
III.2.4. Régulation du courant du filtre actif parallèle	50
III.2.5. Filtre de découplage	53
III.2.6. Système de stockage d'énergie	53
III.3. Méthode de régulation par PI.....	54
III.4. Stratégie de commande de l'onduleur du filtre actif parallèle	55
III.4.1 Lois de commande.....	56
III.4.1.1_ Principe de la commande MLI sinus-triangle.....	56
Chapitre IV : Résultats de simulation	37
IV.1. Introduction.....	59

IV.2. Résultat de simulation et analyse	59
IV.2.1. Résultats de simulation sans compensation	59
IV.2.2. Résultats de simulation compensation	60
IV.2.2.1. Structure générale du filtre actif parallèle (Matlab)	61
IV.2.2.2. Interprétation des résul	64
IV.3. Amélioration du facteur de puissance	64
Conclusion	65
Conclusion Générale	66
Bibliographie	67

Introduction Générale

La puissance électrique est distribuée sous la forme d'un système sinusoïdal triphasé, ce qui permet de fournir l'énergie électrique nécessaire à différents récepteurs électrotechniques.

Avec l'utilisation croissante de l'électronique, des équipements embarqués et des technologies d'électronique de puissance. Cette augmentation a entraîné des perturbations dans le réseau électrique, ce qui affecte négativement la qualité de l'énergie et entraîne des effets négatifs sur l'utilisateur.

La plus importante de ces perturbations qui faussent la tension du réseau sont les harmoniques de courant résultant des charges non linéaires, et la distorsion harmonique est produite par les charges non linéaires connectées au réseau qui absorbent les courants non sinusoïdaux.

Ces harmoniques de courant vont, à leur tour, générer des tensions harmoniques aux différents points de connexion du réseau. Il est normal que les distorsions de courant et de tension aient des conséquences négatives sur les équipements électriques, qui peuvent aller d'un fort échauffement ou d'un arrêt brutal des machines tournantes à la destruction complète de ces équipements.

En conséquence, les fournisseurs d'électricité sont contraints de développer des solutions et de se protéger de ces perturbations. Plusieurs solutions ont été proposées pour nettoyer les réseaux électriques, et pour pallier ces problèmes de perturbations diverses solutions de filtrage (traditionnelles et vocales) ont été utilisées.

Dans le premier chapitre, nous présenterons les perturbations, en courant et en tension, des réseaux électriques connectés à des charges dites polluantes. Les origines de cette pollution harmonique, les conséquences et les normes inhérentes à ces perturbations sont examinées.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des filtres actifs parallèles et constitue la solution la plus appropriée. Atténuation supplémentaire des problèmes de pollution harmonique causés par des charges non linéaires, grâce aux avantages offerts par la compensation en temps réel par sélection d'harmoniques.

Dans le troisième chapitre, nous étudierons tout d'abord la structure du filtre actif parallèle triphasé, puis nous validerons la simulation. Sous Matlab/Simulink pour un pur filtre actif parallèle.

Introduction Générale

Enfin dans le quatrième chapitre on a utilisé les résultats du filtre à l'aide de simulations dans Simulink de Matlab, où plusieurs tests seront exécutés pour tester les performances du filtre actif parallèle.

Chapitre 01 :

Perturbation électrique dans le réseau électrique

I.1. Introduction :

Lors de sa transmission et de sa distribution, le signal électrique subit de nombreuses perturbations aux propriétés différentes qui affectent la qualité de cette énergie en fonction de la tension au point de connexion, telles que les déséquilibres de tension et de courant, les distorsions harmoniques, les coupures brèves, les creux de tension, les surtensions passagères, les changements de fréquence et de tension, les surtensions transitoires, etc. Ces perturbations peuvent entraîner des dysfonctionnements, des dommages ou des confusions qui affectent négativement les paramètres de tension suivants du réseau électrique : fréquence, amplitude, symétrie des tensions triphasées et forme d'onde. Dans ce chapitre, nous expliquerons des exemples de perturbations, et nous discuterons des perturbations harmoniques

I.2. Qualité de l'énergie électrique :

L'énergie électrique est principalement distribuée sous la forme d'un système triphasé à tension sinusoïdale. La qualité de l'énergie électrique est donc étroitement liée à la qualité de l'onde de tension et à la nature de la charge (linéaire ou non linéaire). Pour cette raison, la qualité de l'énergie électrique est généralement réduite à celle de la tension.[2]

I.2.1. Qualité de la tension :

L'énergie électrique distribuée sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé, dont les caractéristiques principales sont l'amplitude, la fréquence la forme d'onde et la symétrie.

I.2.1.1. Amplitude :

L'amplitude de la tension a un impact significatif sur la qualité électrique. Il représente généralement l'obligation contractuelle initiale du distributeur d'énergie. Généralement l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est une valeur constante. [1]

I.2.1.2. Fréquence :

Idéalement, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales, avec une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon les pays. Par exemple, une perte importante de production ou un défaut

provoquant une chute de tension pour réduire la charge peut entraîner des changements de fréquence. Cependant, ces changements sont généralement très faibles (moins de 1%) et n'affectent pas le fonctionnement normal des équipements électriques ou électroniques.[1]

I.2.1.3. Forme d'onde :

Dans un système triphasé, la forme d'onde des trois tensions doit être aussi proche que possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques.

I.2.1.4. Symétrie :

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre.[1]

L'équation correspondant à l'interprétation la plus correcte est donc :

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

I.3. Caractéristiques des perturbations électriques :

Les perturbations sont tout phénomène, interne ou externe au réseau, qui a la capacité de modifier momentanément ou durablement l'amplitude et/ou la forme des grandeurs électriques du réseau (courant, tension, fréquence).

Ces perturbations peuvent être classées selon deux critères : la durée de persistance, ou le mode d'affectation c'est-à-dire leurs conséquences sur les grandeurs électriques.

Selon la première classification, on a deux catégories essentielles :

- ✚ Perturbation périodiques (qui durent dans le temps), comme le cas des distorsions harmoniques, chutes de tension dues aux flux de puissance réactive dans le réseau, et les déséquilibres.
- ✚ Perturbations aperiodiques : où l'on a principalement l'ensemble des phénomènes fugitifs souvent très difficiles à prévoir comme les creux de tension ou surtensions transitoires. Selon leurs modes d'affectation, on distingue trois familles principales :
 - ✚ Perturbations sur l'amplitude ou les valeurs efficaces...
 - ✚ Déséquilibre des systèmes triphasés
 - ✚ Distorsions harmoniques.

I.3.1. Influences sur l'amplitude :

Il existe une plage nominale de variation de tension du réseau définie à $\pm 10\%$ de la tension. Nominale, selon la norme EN 50160 élaborée par le Cenelec (Comité Européen pour unification électrotechnique).

I.3.1.1. Creux et coupures de tension :

Une chute de tension est une brève chute de tension (entre 10% et 90% de la tension de référence) qui dure de quelques millisecondes à plusieurs secondes. Les creux de tension sont principalement causés par des courts-circuits non permanents. Tout comme le fonctionnement d'un appareil qui nécessite un courant élevé pour démarrer comme les moteurs, des changements brusques de charge ou encore des phénomènes naturels aléatoires comme la foudre, le contact avec la végétation...etc.

La tension de coupure est une chute de plus de 90 % de la tension de référence. Cela se produit généralement en raison de manœuvres spontanées liées aux réseaux de distribution.

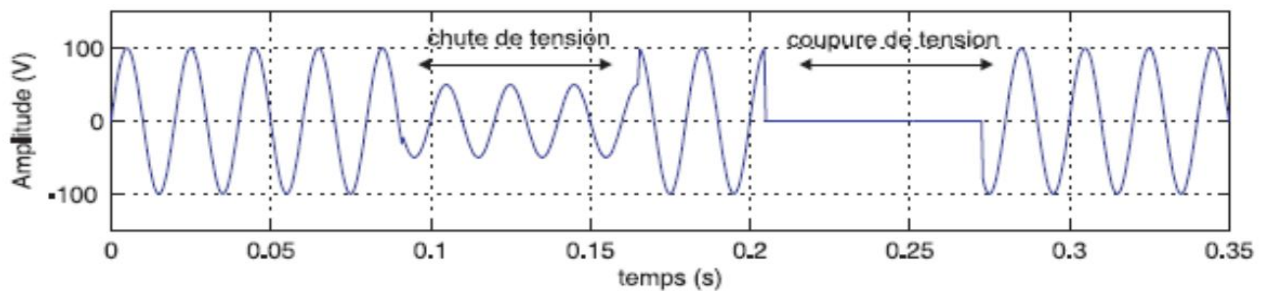


Fig. I.1 : Creux et coupure de tension.

I.3.1.2. Fluctuations de tension :

Les fluctuations de tension sont des changements périodiques soudains ou irréguliers, c'est-à-dire des chutes soudaines pendant de courtes périodes de quelques centièmes de seconde. L'amplitude de la tension existante doit être de l'ordre de $\pm 10\%$ de sa tension absorbée. Ils sont notamment dus à la propagation sur les lignes du réseau de circulation du courant. Importance. L'origine principale de ces courants est le fonctionnement du dispositif dans lequel l'énergie absorbée varie rapidement ; Tels que les fours à arc et les machines à souder. Ces fluctuations entraînent des différences d'intensité qui peuvent être observées dans l'éclairage. Il provoque une gêne visuelle et ce phénomène de clignotement est appelé clignotement.

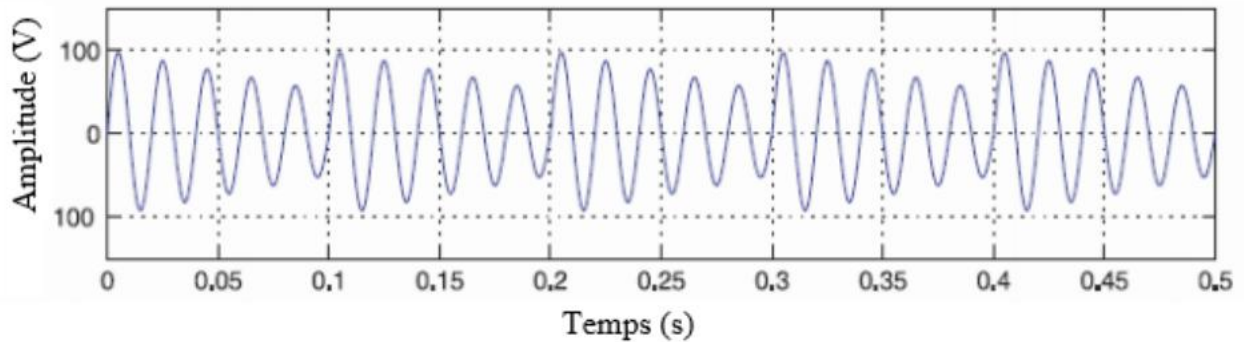


Fig. I.2 : Fluctuation de tension.

I.3.1.3. Surtension :

La surtension est définie comme toute force fournie à un équipement dont la valeur maximale dépasse les limites d'un secteur prescrites par une norme ou une spécification (Ferraci, 2001). Deux formes de surtension peuvent être reconnues en fonction de la longueur de leur cycle.

⚡ Transitoire :

Nous appelons la surtension transitoire, c'est-à-dire le dépassement soudain de l'amplitude de la tension. La fréquence fondamentale est de 50 Hz. Il s'agit d'un phénomène court (d'une durée inférieure à 1 seconde).[3]

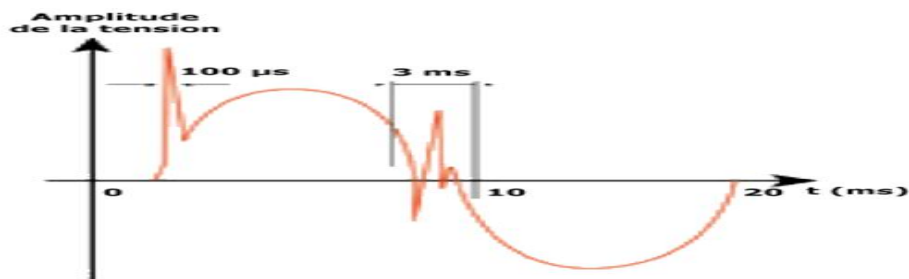


Fig. I.3 : Surtension transitoire.

⚡ Permanente :

On appelle surtension permanente, toute augmentation de la tension au-dessus de 10% de valeur nominale qui est maintenue pendant plusieurs cycles de façon permanente.[4]

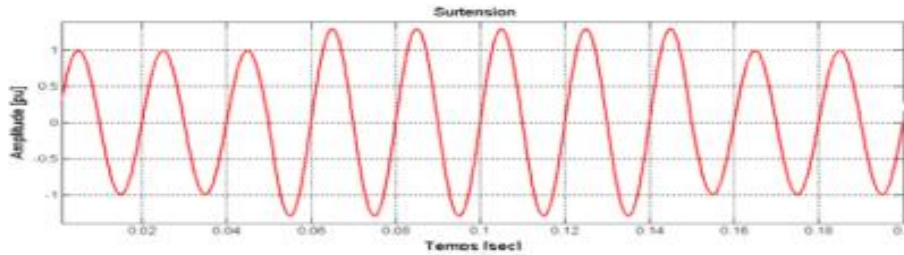


Fig. I.4 : Surtension permanente.

Bien que les équipements électriques soient hautement protégés, les surtensions provoquent leur défaillance. L'équipement est détruit lorsque le pic de tension dépasse une valeur supérieure à celle supportée par l'appareil. Il existe trois formes de surtensions :

- Surtension temporaire.
- Commutation de surtension.
- Surtension atmosphérique.

I.3.2. Variation de fréquence :

Les variations de fréquence Dans les conditions normales, la fréquence du réseau de distribution doit être dans l'intervalle 50 ± 1 Hz. Les variations de la fréquence du système de distribution apparaissent chez les clients qui emploient des sources électriques auxiliaires (on cite par exemple : système solaire, station thermique), voir la **fig. I.5**. Ces variations sont rares et se produisent dans des conditions exceptionnelles comme, les défauts dans les turbines des centrales de production. [5]

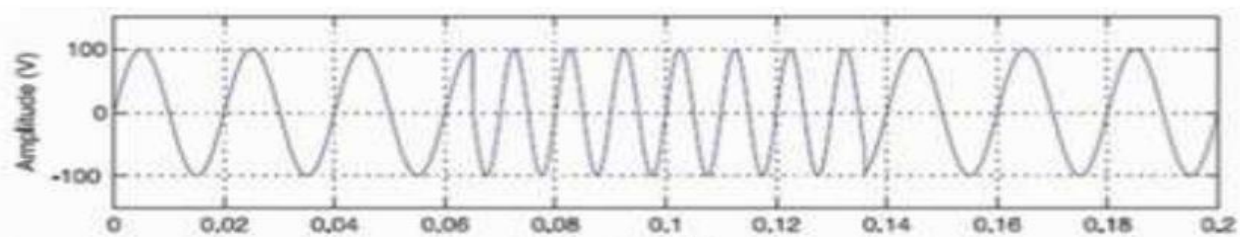


Fig.I.5 : variation de fréquence.

I.3.3. Déséquilibre du système triphasé de tension :

On parle de déséquilibre du système triphasé lorsque les trois tensions ne sont pas similaires en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° l'une par rapport à l'autre. 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.[6][7]

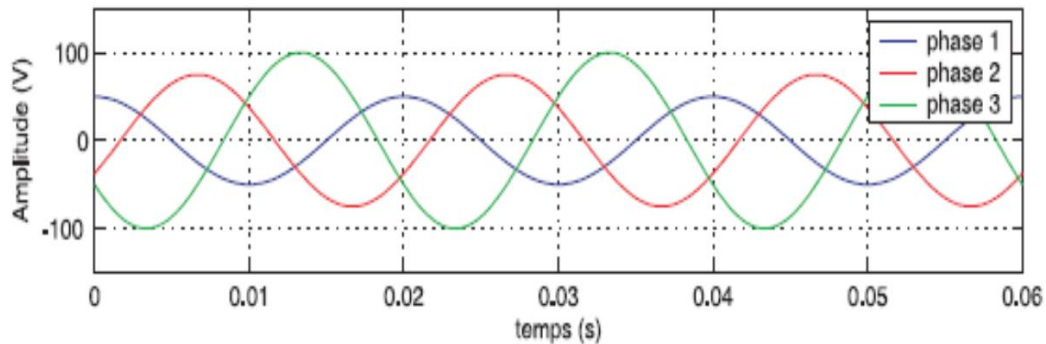


Fig. I.6 : Cas particulier de déséquilibre du system triphasé.

I.3.4. Les harmoniques et inter-harmonique :

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz d'ondes sinusoïdales avec des multiples entiers de la fréquence fondamentale.

La principale source de la présence des harmoniques dans les réseaux électriques est l'utilisation de plus en plus croissante d'équipements de l'électronique de puissance à base de thyristors et de transistors.

Les inters harmoniques se superposent à l'onde fondamentale, mais ne sont pas des multiples entiers de la fréquence fondamentale. Les inters harmoniques sont de plus en plus courants et leurs principales sources comprennent les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres dispositifs de commande électriques.[6]

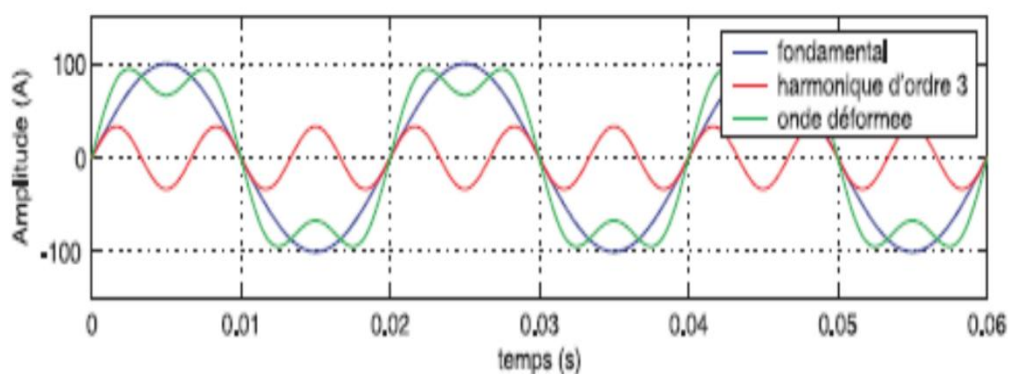


Fig. I.7 : harmoniques

I.3.4.1. Types des harmoniques :

- Les harmoniques se distinguent par leur rang, de type pair ou impair.
- Les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8...), très souvent négligeables en milieu industriel, s'annulent en raison de la symétrie du signal.

Par contre les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, 9...) Sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique. Dans le cas où il y a des variations périodiques ou aléatoires de la puissance absorbée par certains récepteurs, on notera qu'il existe d'autres composantes harmoniques Inter-harmoniques : Ce sont des composantes sinusoïdales qui ne sont pas à des fréquences multiples de celle du fondamental : 130 Hz, 170 Hz, 220 Hz.

Infra-harmoniques : Ce sont des composantes sinusoïdales qui sont à des fréquences inférieures à celle du fondamental : 10 Hz, 20 Hz.[8]

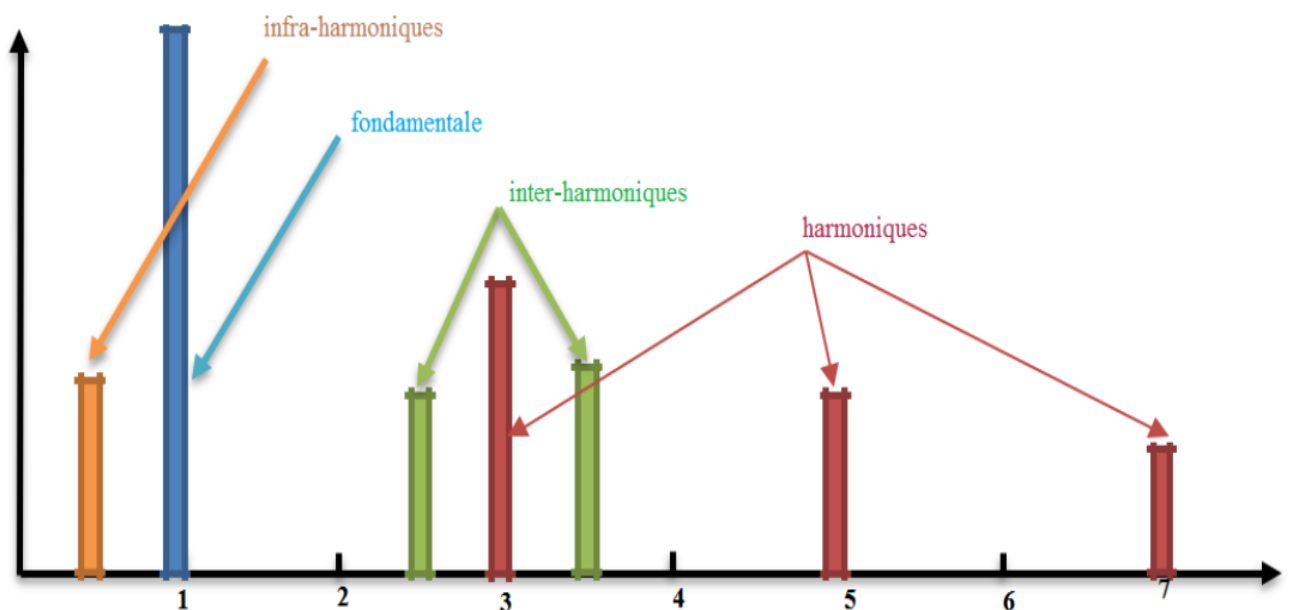


Fig. I.8 : Arrangement des types d'harmoniques

I.3.4.2. Origines des harmoniques :

Les harmoniques sont générées par des charges non linéaires absorbant un courant non sinusoïdal. Actuellement, les équipements à base de thyristors constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils, dont les caractéristiques électriques varient avec la valeur de la tension, sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques : appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc.

I.3.4.3. Décomposition d'un signal périodique :

Fourier a démontré que toute fonction périodique $y(t)$ non sinusoïdale de fréquence F peut être représentée selon la décomposition harmonique sous la forme d'une somme composée :

- D'un terme sinusoïdal à la fréquence F de valeur efficace y_1 . Ce terme est appelé le fondamental ;
- De termes sinusoïdaux dont les fréquences sont égales à n fois la fréquence F du Fondamental et de valeurs efficaces y_n . Ces autres les fréquences multiples du fondamental sont appelées harmoniques ;
- D'une éventuelle composante continue d'amplitude y_0 .

L'expression de ces grandeurs est donnée par le développement de Fourier de la fonction tension ou courant [9]

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}Y_n \sin(n\omega t - \varphi) \quad (I.1)$$

I.3.4.4. Tensions harmoniques :

On peut aussi parler de la source de tension pour décrire l'état du réseau Perturbé par la forte charge non linéaire. En effet, dans ce cas, si nous Il s'intéresse à l'étude de la connexion de son récepteur de faible puissance La connectivité réseau ne change pas le niveau précédent de manière significative.[9]

I.3.4.5. Courants harmoniques :

Dans la plupart des cas, les harmoniques présents sur les réseaux électriques proviennent de l'utilisation de charges non linéaires.

On appelle « charge » un équipement ou une installation connectée au réseau électrique et consommant de l'énergie à 50 Hz. On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50 Hz, elle n'absorbe pas un courant sinusoïdal à 50 Hz.

Ces charges se comportent approximativement comme des sources de courant harmonique, s'est-il- dire que le courant harmonique est fixé par la charge et non par l'impédance ou la tension du réseau auquel elles sont raccordées.[9]

I.3.4.6. Notion de charges :

Les récepteurs peuvent être classés en deux familles principales :

- Les récepteurs linéaires (ou charges linéaires)
- Les récepteurs non linéaires (ou charges non linéaires). Une charge est dite linéaire si alimentée par une tension sinusoïdale, elle consomme un courant sinusoïdal (résistances, capacités et inductances), Cependant le courant et la tension peuvent être déphasés

Lorsque la liaison entre tension et courant n'est plus linéaire, la charge est dite non linéaire. Un courant non sinusoïdal est utilisé par un récepteur alimenté par une tension sinusoïdale. Les charges non linéaires sont courantes avec l'électronique de puissance. Ils sont cependant de plus en plus nombreux et leur part dans la consommation totale d'énergie augmente.

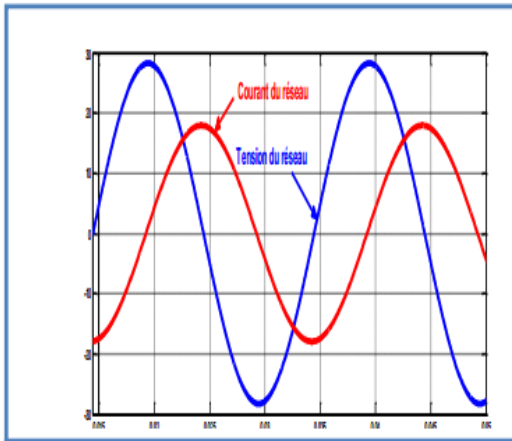


Fig. I.9 : charge linéaire

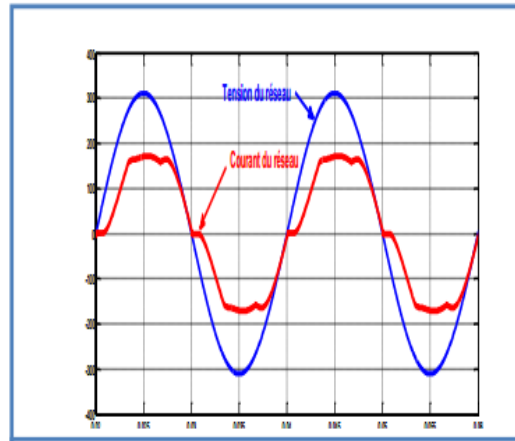


Fig. I.10 : charge non linéaire

I.3.4.7. Caractérisation des Harmoniques :

Différentes grandeurs sont définies pour quantifier les perturbations harmoniques Parmi celles-ci les plus utilisées sont :

✚ Taux Global de Distorsion Harmonique (Total Harmonique Distorsion) :

IL représente le rapport de la valeur efficace des harmoniques (X_n) à la valeur efficace Le THD est défini par :

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{X_n}{X_1}\right)^2} \quad (I.2)$$

✚ Facteur de Puissance :

En présence des harmoniques, la puissance apparente S est composée de trois parties active P , réactive Q et déformante D .

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (I.3)$$

Avec :

$$D = \sqrt{3}U \sqrt{I_{eff}^2 - I_{eff1}^2} \quad (I.4)$$

D : la puissance déformante. D due aux harmoniques du courant est définie par la formule suivante

I_{eff} : Valeur efficace de l'harmonique de rang h .

I_{eff1} : Valeur efficace du courant fondamental.

Alors, le facteur de puissance sera comme suit :

$$FP = \cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (I.5)$$

$$P = \sqrt{3}U I_e \cos \varphi_1 \quad (I.6)$$

$$Q = \sqrt{3}U I_e \sin \varphi_1 \quad (I.7)$$

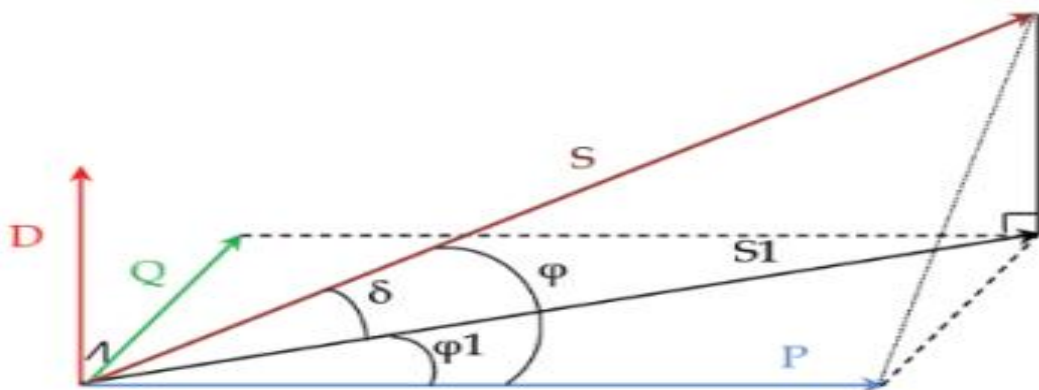


Fig. I.11: Diagramme de Fresnel des puissances

I.3.4.8 Les effets des harmoniques :

La circulation des courants harmoniques dans les réseaux électriques peut avoir des conséquences néfastes sur les réseaux et les équipements électrique ; ils mènent à la déformation de l'onde de tension, et ils causent

- Détérioration du rendement, échauffements excessifs, vibrations et bruit dans les machines tournantes.
- Détérioration du facteur de puissance dans le réseau et augmentation des pertes Joules.
- Échauffement et vieillissement des condensateurs ainsi que la fusion des fusibles de Protection.
- Surcharge du fil du neutre à cause des courants harmoniques de rangs impairs multiples de trois, générées par des charges non linéaires monophasées.
- Abaissement de la précision des appareils de mesure. [10]

I.4. Solution de dépollution des réseaux électriques :

Il existe différentes méthodes de dépollution pour compenser toutes les perturbations des réseaux électrique :

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

I.4.1. Les solutions traditionnelles :

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

I.4.1.1. Filtres passifs :

Ce sont les premiers gadgets qui ont été utilisés pour éliminer les harmoniques. Ils sont constitués d'inductances, de condensateurs et de résistances, qui sont tous des composants passifs.

Les filtres d'harmoniques sont souvent reliés en série avec des charges génératrices d'harmoniques (redresseurs à diodes ou à thyristors, fours à arc électrique...). Le filtre passif

résonnant et le filtre passif amorti ou passe-haut sont deux des dispositifs de filtrage passif les plus largement utilisés.

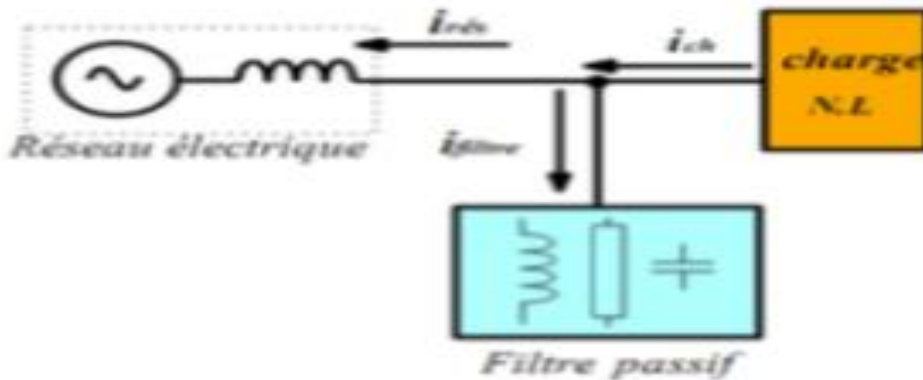


Fig. I.12 : filtre passif connecté au réseau

I.4.1.2. Filtre passif résonant :

C'est un filtre sélectif constitué, d'une résistance, d'un condensateur et d'une bobine en série comme

Décrit sur la figure :

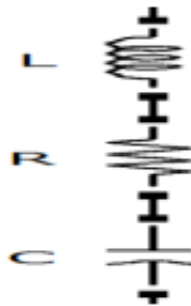


Fig. I.13 : Filtre passif résonant

Son impédance est donnée par :

$$Z_{ep}(w) = \frac{1 - LCw^2 + jRCw}{jCw} \tag{I.8}$$

I.4.2. Solutions des modernes :

Deux raisons principales ont conduit à concevoir une nouvelle structure de filtres moderne et efficace appelée filtre actif. La première raison est due aux inconvénients inhérents des solutions traditionnelles de dépollution qui ne répondent plus à l'évolution des charges et des réseaux

électriques. La seconde raison fait suite à l'apparition de nouveaux composants semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT et MOSFET.

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 des performances des équipements et installations électriques.

I.4.2.1. Filtre actif série (FAS) :

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

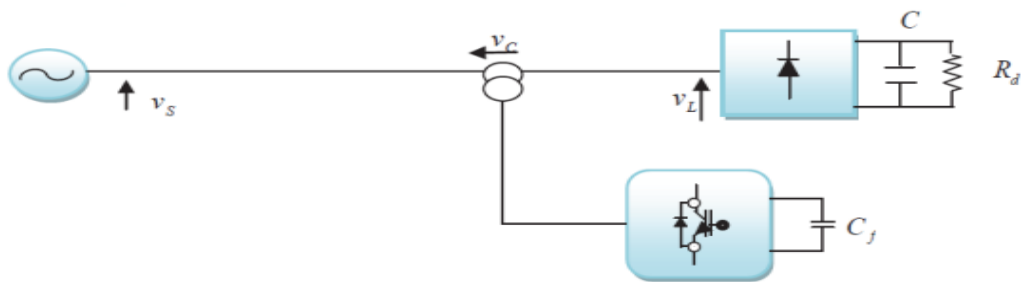


Fig. I.14 : Filtre actif série

I.4.2.2. Filtres hybrides actifs et passifs :

Pour réduire le volume et le coût du filtre actif, un filtre passif lui est attaché. Le rôle du filtre passif est d'éliminer les fréquences spécifiques permettant une réduction de la taille du filtre actif qui compensera le reste des perturbations. Les formations les plus étudiées dans la littérature sont

A- Filtre actif parallèle avec un filtre passif parallèle :

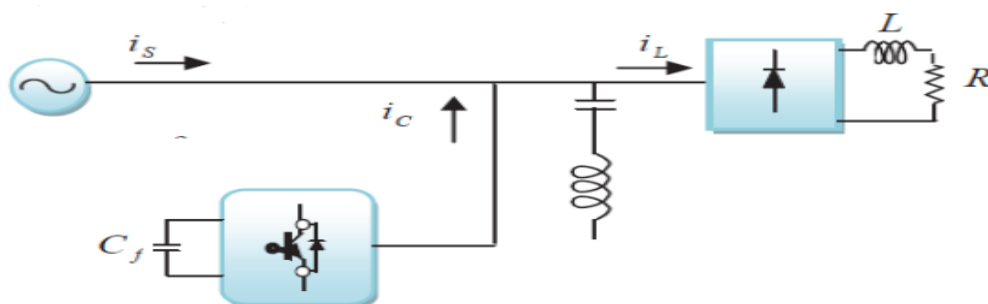
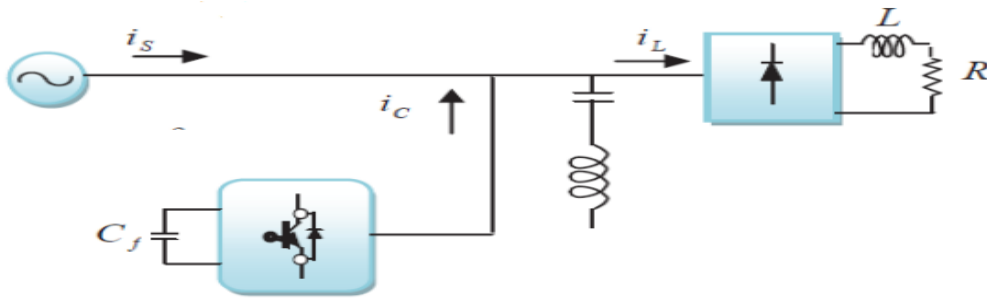
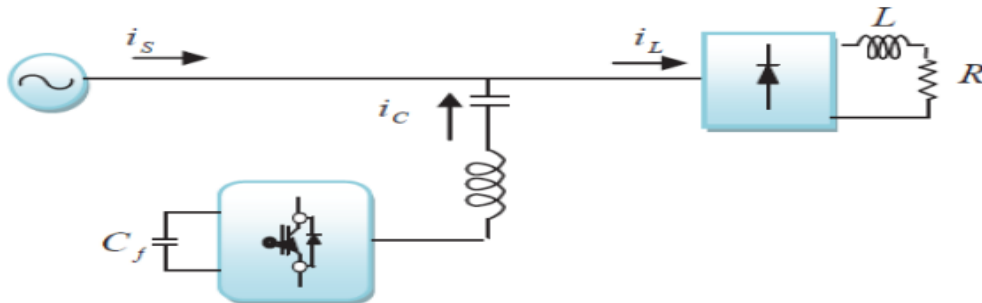
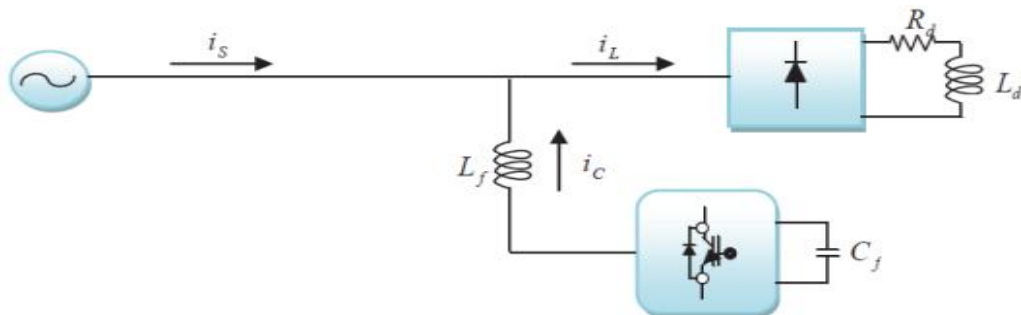


Fig. I.15 : Filtre actif parallèle avec un filtre passif en parallèle.

B-Filtre actif série avec des filtres passifs parallèles :**Fig. I.16 :** Filtre actif série en série avec des filtres passifs parallèles.**C-Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles :****Fig. I.17 :** Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles.**I.4.2.3. Filtre actif parallèle (FAP) :**

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 polluante, mais en opposition de phase avec ceux-ci. Dans le chapitre 2 ce filtre sera traité en détail.

**Fig. I.18:** Filtre actif parallèle

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté différents types de perturbations affectant l'onde de tension du réseau électrique. La chute de tension et ses fluctuations, qui y conduisent, détériorent son état dans les deux grandeurs. Comme nous l'avons expliqué, beaucoup d'harmoniques et de temps de voisinage et ces virus peuvent vous empêcher de créer des équipements. Nous avons également montré que la plupart des méthodes de résolution des problèmes de solution classiques se font sur des filtres manuels en termes de volume et de résonance.

Dans le chapitre suivant, nous étudierons avec détails le filtre actif parallèle

Chapitre II :

**Étude et modalisation
de filtre actif parallèle.**

II.1. Introduction

L'objectif du chapitre est d'étudier la structure générale du filtre actif parallèle, ce dernier est un onduleur de tension à modulation de largeur d'impulsions, il injecte dans le réseau des courants harmoniques égaux absorbe à cause de l'opposition de phase une charge polluante. Cette structure a pour vocation d'éliminer de façon active tout ou une partie des harmoniques de courant.

II.2. Principe de filtrage actif parallèle de puissance :

Le schéma de principe du filtre actif parallèle est représenté sur la **Fig. II.1**, il doit fournir la puissance déformante et la puissance réactive. Ainsi, le réseau fournit uniquement la puissance active.

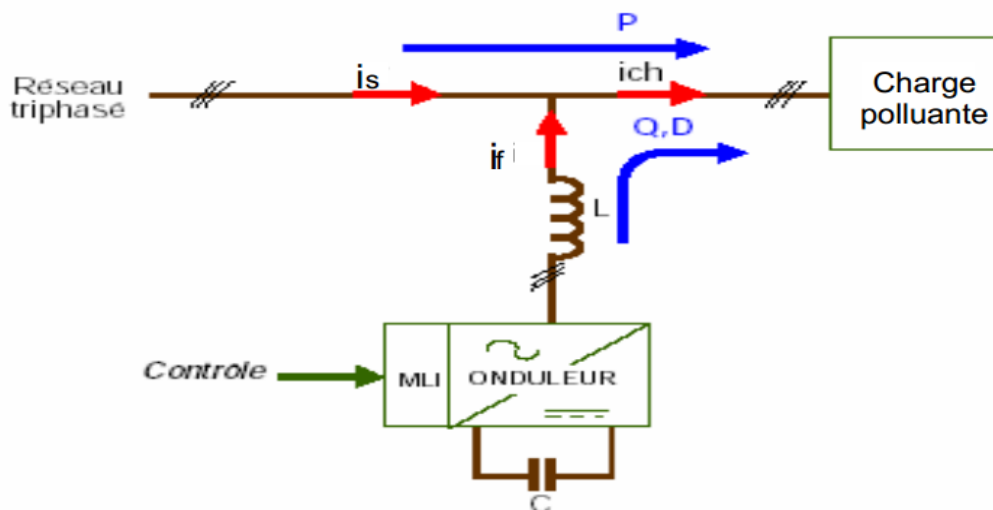


Fig. II.1 : Schéma de principe du filtre actif parallèle.

Pour ce faire, le circuit de commande doit imposer la valeur instantanée du courant produit par l'onduleur, en fonction de la consigne MLI, afin que le courant du réseau soit sinusoïdal et en phase avec la tension simple appropriée. Au sens le plus large. Dans le cas général, le courant absorbé par la charge comporte une composante active (i_{cha}) une composante réactive (i_{chr}) et une composante harmonique ($\sum_{n=1}^{\infty} i_{chn}$).

$$i_{ch} = i_{cha} + i_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} i_{chn} \quad (\text{II.1})$$

Le compensateur actif ne peut absorber ou fournir de la puissance active puisqu'il ne comporte pas :

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{i}_{ch} - \mathbf{i}_f \quad (\text{II. 2})$$

La source fournit la puissance active absorbée par la charge :

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{i}_{cha} \quad (\text{II. 3})$$

Le filtre actif parallèle fournit la puissance réactive et déformante :

$$\mathbf{i}_f = \mathbf{i}_{chr} + \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{i}_{chn} \quad (\text{II. 4})$$

Pour illustrer le principe de filtrage actif, considérons l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif (**fig. II.2**). La charge polluante est constituée d'un pont triphasé à diodes débitant sur un circuit RL.[11]

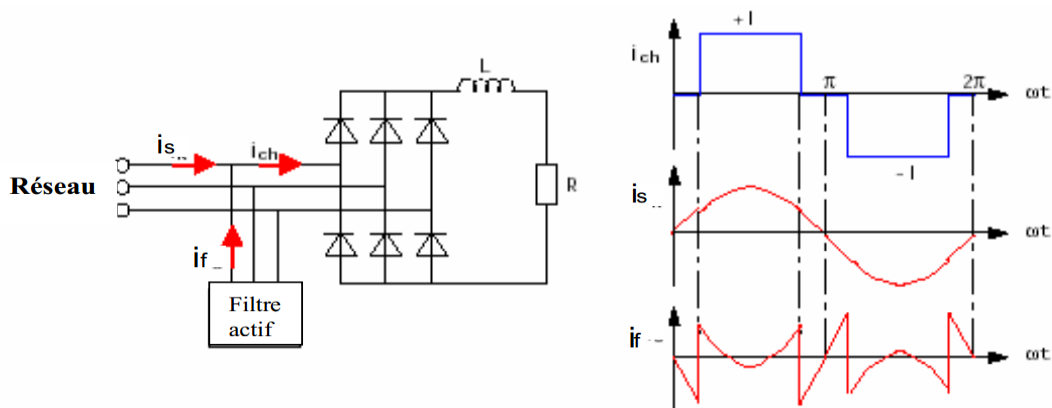


Fig. II.2 : Schéma de principe de l'ensemble réseau électrique, charge polluante et filtre actif et formes d'ondes des courants respectifs.

Alors que le courant absorbé par la charge polluante est non sinusoïdal, le filtre actif injecte un courant de telle manière que le courant absorbé par le réseau doit être sinusoïdal.

II.3. Structure et caractéristiques du filtre actif parallèle :

La **Fig.II.3**. illustre le filtre actif parallèle à structure de tension, laquelle se présente sous la forme de deux blocs : La partie puissance et la partie contrôle- commande

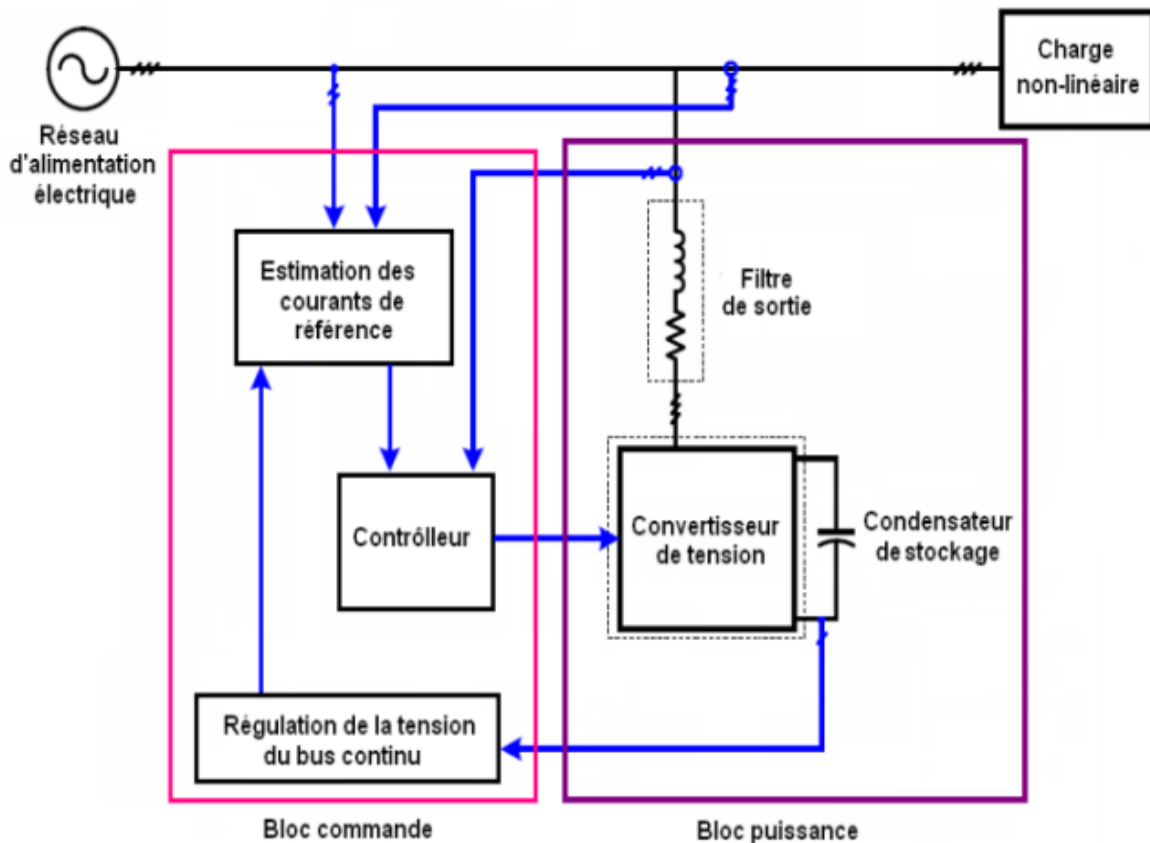


Fig. II. 3 : Structure général d'un filtre actif parallèle source de tension

II.3.1. La partie puissance :

La partie puissance est constituée d'un onduleur de tension, d'un circuit de stockage d'énergie, et d'un filtre de sortie.

II.3.1.1. L'onduleur de tension :

Les interrupteurs de courant bidirectionnels constituent l'onduleur triphasé. Ils sont constitués de semi-conducteurs réglables en ouverture et en fermeture (souvent de type IGBT) et sont mis en antiparallèle avec une diode. Nous devons respecter les limitations suivantes pour cette structure :

- À un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension.
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible, d'où la mise en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteur.

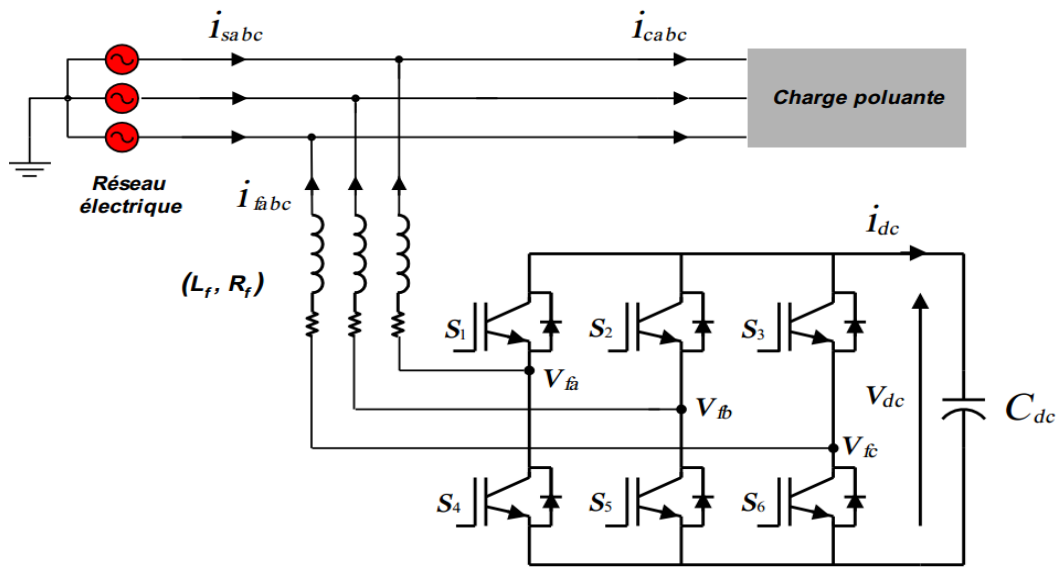


Fig. II.4 : Filtre actif parallèle à structure source de tension

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 **Fig. II.4**, dépendent de l'état de trois signaux de commande ($S_a; S_b; S_c$), définis ci-dessous :

$$\begin{aligned}
 S_a &= \begin{cases} 1 & S_1 \text{ ferme et } S_4 \text{ ouverte} \\ 0 & S_4 \text{ ferme et } S_1 \text{ ouverte} \end{cases} \\
 S_b &= \begin{cases} 1 & S_2 \text{ ferme et } S_5 \text{ ouverte} \\ 0 & S_5 \text{ ferme et } S_2 \text{ ouverte} \end{cases} \\
 S_c &= \begin{cases} 1 & S_3 \text{ ferme et } S_6 \text{ ouverte} \\ 0 & S_6 \text{ ferme et } S_3 \text{ ouverte} \end{cases}
 \end{aligned} \tag{II.5}$$

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 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 S_a , S_b , et S_c on obtient huit cas possibles pour les tensions de sortie du filtre actif V_{fi} (référéncées par rapport au neutre de la source) comme le montre le tableau. [12]

C_{asn}^0	S_a	S_b	S_c	$\frac{V_{fa}}{V_{dc}}$	$\frac{V_{fb}}{V_{dc}}$	$\frac{V_{fc}}{V_{dc}}$
0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3
2	0	0	1	-1/3	2/3	-1/3
3	1	0	1	1/3	1/3	-2/3
4	0	1	1	-1/3	-1/3	2/3
5	1	1	1	1/3	-2/3	1/3
6	0	1	1	-2/3	1/3	1/3
7	1	1	1	0	0	0

Tableau (II-1) : Tensions en sortie de l'onduleur (repère abc)


II.3.1.2. Le circuit de stockage d'énergie :

Le stockage de l'énergie est réalisé coté continu à l'aide d'un système de stockage capacitif, représenté par un condensateur C_{dc} jouant un rôle d'une source de tension continue V_{dc} . Le choix des paramètres du système de stockage (V_{dc}^* et C_{dc}) a une influence directe sur la dynamique de FAP et sur ses performances de compensation d'une part, une tension V_{dc}^* élevée améliore la dynamique du FAP. D'autre part, les ondulations de la tension continue V_{dc} causées par les courants engendrés par le FAP et limitées par le choix de la valeur de C_{dc} peuvent dégrader la qualité de compensation du FAP. Une valeur élevée de C_{dc} réduit les ondulations de V_{dc} mais augmente le coût et la taille du FAP.[13]

II.3.1.3. Le filtre de sortie :

Le filtre de sortie est un filtre passif utilisé pour connecter l'onduleur de tension au réseau électrique.

Le filtre de sortie est dimensionné afin de satisfaire à trois critères :

 Assurer la dynamique en courant, définie par :

$$\frac{d\bar{i}_f}{dt} = \frac{d\bar{i}_{h, ch}}{dt} \quad (\text{II. 6})$$

Avec i_f le courant du filtre actif, et $i_{h, ch}$ le courant harmonique de la charge.

- ✚ Empêcher la propagation sur le réseau électrique des harmoniques générés par les commutations.
- ✚ Limiter la chute de tension au courant maximal à une valeur inférieure à 20% de la tension coté source.

Un filtre de sortie du premier ordre est le plus souvent utilisé dans la littérature, il est composé d'une inductance L_f comportant une résistance interne R_f . Une valeur relativement faible de L_f permet d'obtenir une bonne dynamique du FAP en satisfaisant l'égalité. Cependant, une faible valeur de L_f permet à la majorité des harmoniques induits par les commutations, de passer du côté réseau et d'affecter ainsi les installations et les équipements électriques. Inversement, une valeur relativement élevée de L_f empêche ces harmoniques de se propager sur le réseau électrique mais nécessite une tension V_{dc} plus élevée afin de garantir les performances du filtre actif.[13]

II.3.2. La partie contrôle-commande :

- ✚ La méthode d'identification des courants perturbés.
- ✚ La régulation de la tension.
- ✚ La commande de l'onduleur de tension.

II.3.3. Filtre actif parallèle à structure de tension :

Le filtre actif parallèle à structure de tension est illustré à la Figure 2-4. Cette structure est caractérisée par une capacité et une inductance de couplage. La capacité C , qui doit produire une tension à une valeur quasi constante, sert de source d'énergie. La volatilité de cette tension devrait être faible.

Elle ne doit pas dépasser la limite de tension supportable par les semi-conducteurs.

De plus, pour une inductance L_f donnée, cette tension ne doit pas être inférieure à une certaine limite, car cela affecterait les performances de compensation action du filtre actif [14][15]. L'inductance par laquelle l'onduleur est relié au réseau sert à filtrer les courants harmoniques hautes fréquences.

Ces courants harmoniques sont causés par les impulsions de tension générées par l'onduleur.

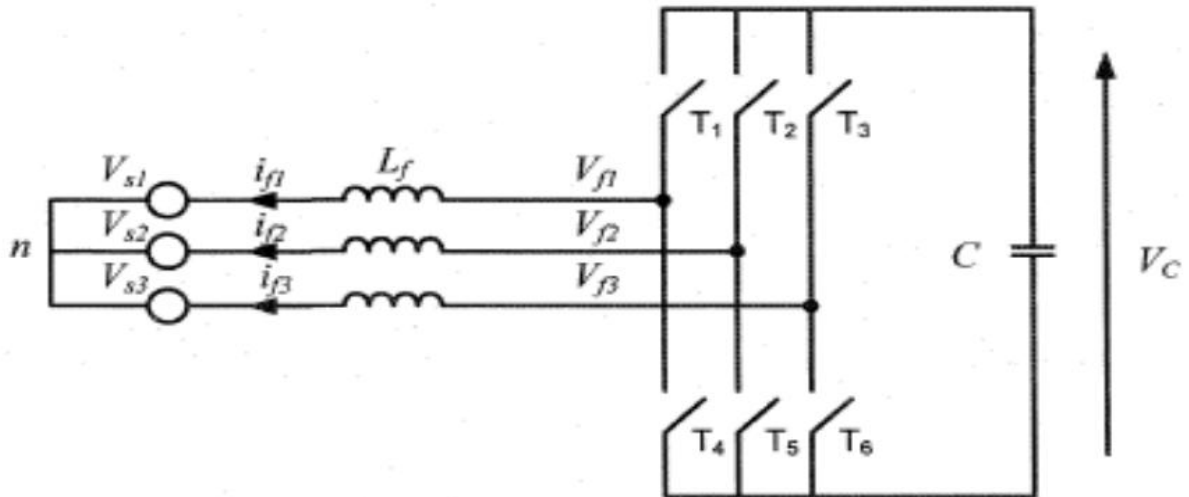


Fig. II.5 : Filtre actif parallèle à structure de tension

Pour la structure de tension, les interrupteurs sont unidirectionnels en tension et doivent être réversibles en courant.

Pour y parvenir, les éléments semi-conducteurs composant l'onduleur doivent être associés en parallèle avec des diodes.

Ces semi-conducteurs sont commandés à la fermeture et à l'ouverture.

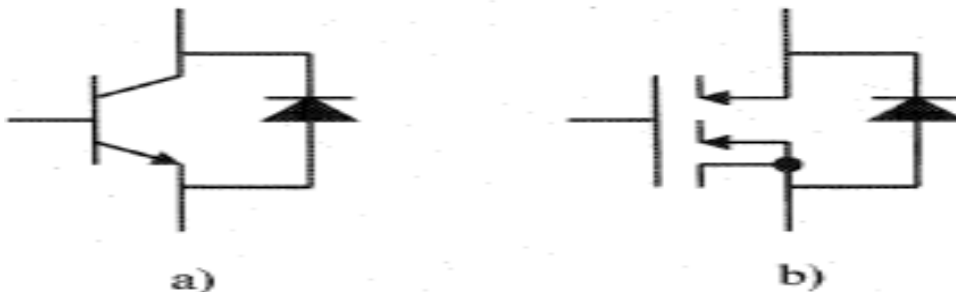


Fig. II.6 : Semi-conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en tension

a) transistor bipolaire, b) transistor IGBT

Cette structure ne permet pas la fermeture simultanée des semi-conducteurs d'un même bras sous peine de court-circuiter le condensateur.

Par contre, dans certains cas, ils peuvent être tous les deux ouverts (temps mort). La continuité des courants est alors assurée par la mise en conduction d'une des diodes d'un même bras.

En pratique, on commande les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre.

Les états des interrupteurs équivalents ne dépendent pas du sens des courants.

Ils sont uniquement contrôlés par la commande. Le mode où les semi -conducteurs d'un même bras sont ouverts tous les deux n'existent que durant les commutations afin d'éviter les courts-circuits.

Le tableau (II-2) montre les combinaisons possibles des tensions V_{f1} , V_{f2} , et V_{f3}

Numéro de L'état	Interrupteurs Fermes	V_{f1}	V_{f2}	V_{f3}
1	$T_4; T_5; T_6$	0	0	0
2	$T_1; T_5; T_6$	$2V*3$	$-V*3$	$-V*3$
3	$T_2; T_4; T_6$	$-V*3$	$2V*3$	$-V*3$
4	$T_1; T_2; T_6$	$V*3$	$V*3$	$-2V*3$
5	$T_3; T_4; T_5$	$-V*3$	$-V*3$	$2V*3$
6	$T_1; T_3; T_5$	$V*3$	$-2V*3$	$V*3$
7	$T_2; T_3; T_4$	$-2V*3$	$V*3$	$V*3$
8	$T_1; T_2; T_3$	0	0	0

Tableau (II-2) : Tension générées par l'onduleur à structure de tension.

II.3.4. Filtre actif parallèle à structure de courant :

Le filtre actif parallèle avec structure de courant est illustré dans le schéma ci-dessous. Cette structure est définie par l'inductance et le filtre passe-bas du second ordre. L'inductance (L_{df}), qui doit fournir un courant continu de valeur quasi constante, sert de source d'énergie. Tout comme le filtre à structure de tension, la présence du filtre de couplage sert à filtrer les tensions harmoniques générées par les courants de l'onduleur. Les harmoniques près de la fréquence de résonance du filtre passent – bas LFCF sont amplifiés et peuvent causer de graves dommages au montage. Dans le but de prévenir ce phénomène indésirable, des résistances peuvent être insérées dans le filtre passe-bas ou un contrôle approprié du courant, qui tient en compte la dérivée du courant instantané du filtre actif, peut être adopté [14].

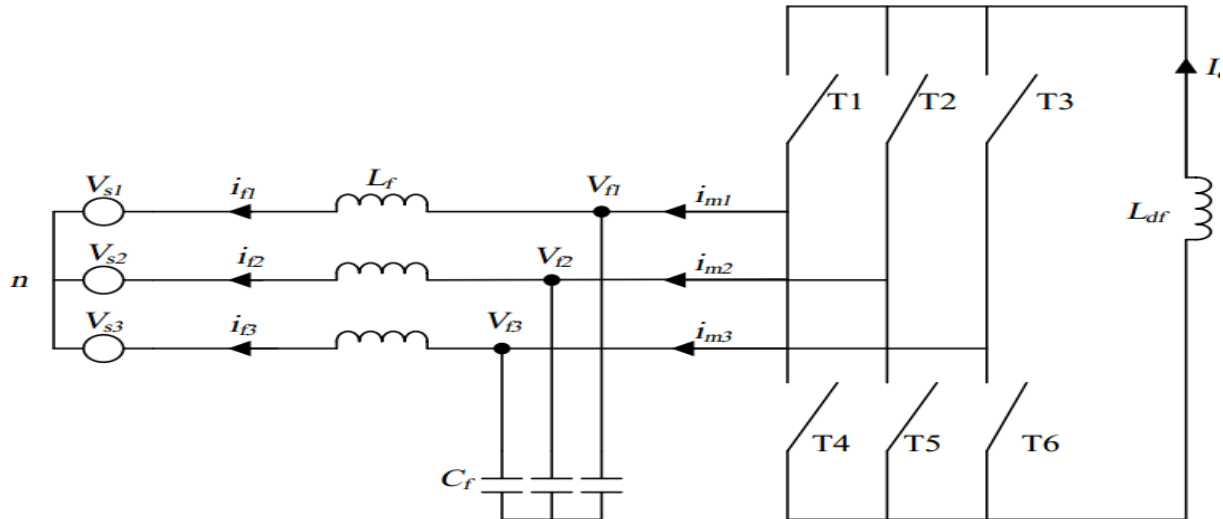


Fig. II.7 : Filtre actif parallèle à structure de courant

Les semi-conducteurs servant d'interrupteur à l'onduleur sont unidirectionnels en courant, mais bidirectionnels en tension. Ces semi-conducteurs se commandent en fermeture en ouverture.

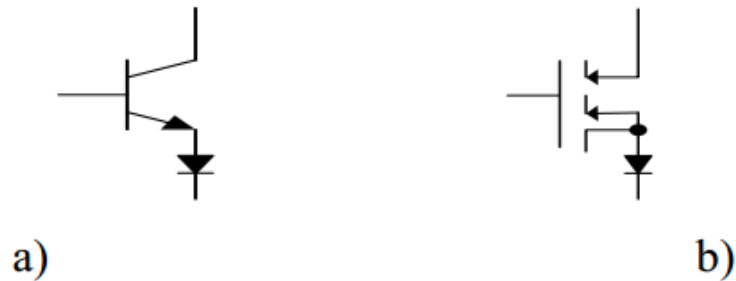


Fig. II.8 : Semi – conducteurs servant d'interrupteur au filtre actif en courant

a) transistor bipolaire, b) transistor IGBT

Pour que les états des interrupteurs ne dépendent que des signaux de contrôle, il faut commander un seul composant par demi- pont. Le mode où il y a deux composants d'un demi-pont simultanément conducteurs existe uniquement lors des passages de courant d'une phase à l'autre. Des trois interrupteurs reliés à la même borne de la source de courant continu, il faut qu'il y en ait toujours un fermé pour que cette source de courant ne soit jamais en circuit ouvert [16]. Le tableau (II-3) montre les combinaisons possibles des courants i_{m1} , i_{m2} , i_{m3}

Numéro de L'état	Interrupteurs Fermes	i_{m1}	i_{m2}	i_{m3}
1	$T_1; T_5$	I_{df}	$-I_{df}$	$-I_{df}$
2	$T_1; T_6$	I_{df}	0	$-I_{df}$
3	$T_2; T_6$	0	0	0
4	$T_2; T_4$	$-I_{df}$	0	I_{df}
5	$T_3; T_5$	0	$-I_{df}$	I_{df}
6	$T_1; T_4$	0	0	0
7	$T_2; T_5$	0	0	0
8	$T_3; T_6$	0	0	0

Tableau (II-3) : Courants générés par l'onduleur à structure de Courant

II.3.5. Comparaison des structures de filtres actifs parallèle :

a) Élément de stockage

L'élément de stockage (C ou L_{df}) qui sert de source d'alimentation en tension ou en courant de l'onduleur est choisi en fonction de la capacité du filtre actif à suivre sa référence. La source d'alimentation doit être dimensionnée de manière à ce que la tension ou le courant qu'elle fournit soit stable.

Dans le cas du filtre actif à structure de tension, pour assurer la continuité de courant à tout instant, la tension V_{cmoy} doit être au moins égale à 3/2 de la valeur maximale de la tension fondamentale du côté alternatif du réseau. Pour assurer la contrôlabilité du filtre durant les commutations du redresseur, V_{cmoy} doit respecter la condition (3.1) pour un réseau triphasé avec un redresseur commandé six pulsations comme charge polluante [14][15]:

$$\bullet V_{cmoy} \geq \sqrt{\sqrt{3}\pi V_{eff} \sqrt{\cos(\alpha)^2 + [(K+1)\sin(\alpha) - \delta K]^2}} \quad (\text{II.7})$$

$$\bullet K = \frac{L_f}{L_s + L_c} \quad (\text{II.8})$$

$$\bullet \delta = \sqrt{6} \frac{(L_s - L_c)}{\pi V_{eff}} \omega I_d \quad (\text{II.9})$$

Où :

V_{eff} : Tension efficace du réseau.

ω : Fréquence angulaire du réseau

δ : Angle d'amorçage des thyristors du redresseur.

I_d : Courant moyen de charge redressé aux bornes du redresseur

Une fois la tension V_{Cmoy} fixée, la dimension de la capacité peut être calculée en considérant une ondulation de tension ΔV_c acceptable :

$$C = \frac{\tilde{p}}{\bar{\omega} V_{Cmoy} \Delta V_c} \quad (\text{II.10})$$

Où :

\tilde{p} : Puissance harmonique générée par le filtre actif.

La puissance harmonique (\tilde{p}) du filtre actif est responsable de la fluctuation de l'énergie stockée dans le condensateur, et donc de la tension continue. Lorsque l'amplitude de l'impulsion de puissance est plus grande et que la fréquence est plus faible, la fluctuation est amplifiée. De ce fait, il peut être calculé en ne considérant que les courants harmoniques des rangs supérieurs[15].

Tout comme le filtre actif à source de tension, les échanges d'énergie entre le réseau et le filtre actif à source de courant font varier la valeur du courant I_{df} de la source d'énergie. Pour assurer la continuité de courant à tout instant, le courant I_{dfmoy} doit être supérieur aux courants harmoniques générés par le filtre actif. Comme pour le cas précédent, la valeur de l'inductance L_{df} est déterminée par une ondulation de courant ΔI_{df} acceptable pour chaque cycle d'opération :

$$\bullet \quad L_{df} = \frac{\tilde{p}}{\bar{\omega} I_{dfmoy} \Delta I_{df}} \quad (\text{II.11})$$

Les équations (II.10) et (II.11) nous montrent que pour avoir une faible oscillation de la tension ou du courant et également pour améliorer les performances du filtre actif, de larges capacités ou inductances doivent être utilisées. Ceci a pour conséquence d'augmenter le coût du filtre actif.

Cependant, dans les applications de faibles et moyennes puissances, l'élément de stockage d'énergie capacitif s'avère plus efficace et moins coûteux que l'élément de stockage d'énergie inductif.

De façon complémentaire, l'élément de stockage d'énergie inductif composé d'une bobine supraconductrice est plus fiable dans les applications de haute puissance.

b) Filtrage des Harmoniques Générées par le Découpage de l'onduleur :

Le filtre actif doit être connecté au réseau de distribution à travers un filtre passif de découplage.

Le dimensionnement de ce filtre doit tenir compte de deux points importants :

- 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.

Le filtre actif à structure de tension est couplé au réseau d'alimentation généralement par le biais d'un filtre passe-bas de premier ordre. Ce filtre est réalisé par une simple inductance de grande valeur. Cependant, une trop grande valeur d'inductance peut détériorer l'efficacité du filtrage si la tension du côté continu de l'onduleur n'est pas assez élevée. Afin de pallier à ce problème, un filtre passe-haut de troisième ordre servant à éliminer les harmoniques en haute fréquence peut être installé si nécessaire [14]. Il est à noter cependant qu'avec cette solution, le filtre produit deux fréquences de résonance, ce qui complique le contrôle du filtre actif.

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

c) Type de semi-conducteurs utilisés :

Les semi-conducteurs de l'onduleur se distinguent par leur capacité à supporter une tension et un courant élevés. Comme ce dernier impose les tensions et courants des interrupteurs, la taille de ces nombres dépend des circuits de part et d'autre de l'onduleur (continu et alternatif).[14][15][16].

L'onduleur de tension utilise des semi-conducteurs réversibles en courant et unipolaires en tension.

La tension que doivent supporter les semi-conducteurs composant l'onduleur de tension est limitée par la valeur V_c de la tension V_c . L'intensité du courant qu'ils doivent supporter est imposée par le courant maximal généré par le filtre actif.

Ils doivent être capables de supporter la valeur maximale du courant harmonique à compenser tout en tenant compte des courants harmoniques dus aux découpages. Le semi-conducteur le plus approprié dans la conception de l'onduleur est le transistor IGBT avec une diode antiparallèle.

Il est à noter que les thyristors classiques avec le circuit auxiliaire d'extinction ne sont plus très utilisés, on leur préfère ceux que l'on peut commander en ouverture et en fermeture comme les MOSFET, les IGBT et les GTO. Dépendamment de l'utilisation requise, le MOSFET est utilisé pour les faibles puissances, le transistor bipolaire ou IGBT, pour les courants moyens et le thyristor GTO pour les grandes puissances.

De façon antagoniste, l'onduleur de courant utilise des semi-conducteurs réversibles en tension et unipolaires en courant.

La valeur α du pourcentage de courant limite l'intensité du courant qu'ils doivent supporter, tandis que la tension qu'ils doivent supporter doit être au moins égale à celle de la ligne d'alimentation. Le thyristor GTO ou le transistor IGBT avec une diode connectée en série à la cathode faisant office de protection contre les surtensions sera le semi-conducteur de choix dans ce mode de fonctionnement.

d) Commande Et Protection :

Le courant de compensation généré par l'onduleur est régulé par les tensions du même onduleur dans la structure de tension. Par conséquent, la commande est plus lente.

C'est une bonne idée d'inclure une période morte entre deux interrupteurs sur le même bras par mesure de sécurité.

Pour le filtre à structure de courant, la commande est rapide et précise.

Cette structure ne nécessite pas, de façon générale, de protection contre l'ouverture simultanée des interrupteurs d'un demi-point [14][16][17]

II.4. Modélisation du filtre actif parallèle :

Le FAP est une structure de tension connectée en parallèle au réseau est représenté sur la Fig. (II.11)

II.4.1. Modélisation du réseau électrique :

Le réseau est assimilable à une source de tension sinusoïdale en série avec une impédance dite de court-circuit, Fig.9.

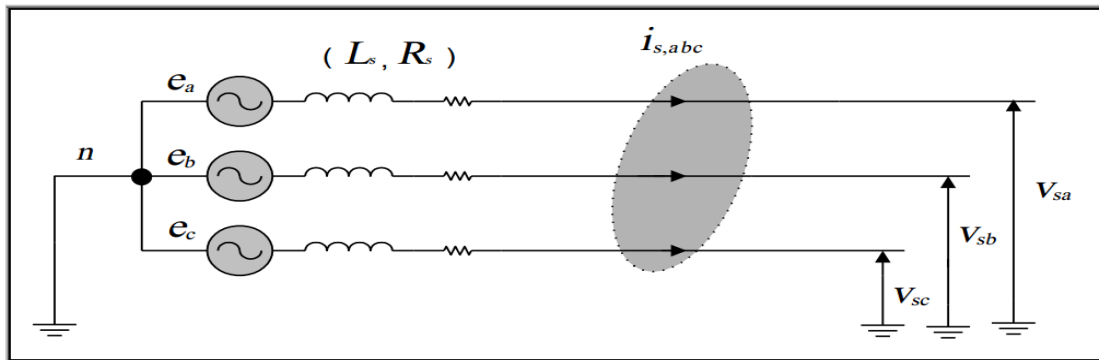


Fig. II.9 : Réseau électrique triphasé.

Les tensions du réseau électrique sont données par :

$$e_a = \sqrt{2}v \sin(\omega t) \quad (\text{II. 12})$$

$$e_b = \sqrt{2}v \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II. 13})$$

$$e_c = \sqrt{2}v \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{II. 14})$$

Où $\omega = 2\pi fs$: pulsation du réseau.

II.4.2. Modélisation de la charge polluante :

La charge polluante est un redresseur de tension triphasé à diodes (pont de **Graëtz**) connecté au réseau par l'intermédiaire d'une impédance de ligne ($R_c \cdot L_c$) et alimentant une charge inductive ($R_d \cdot L_d$) coté continu, Fig.II.10.

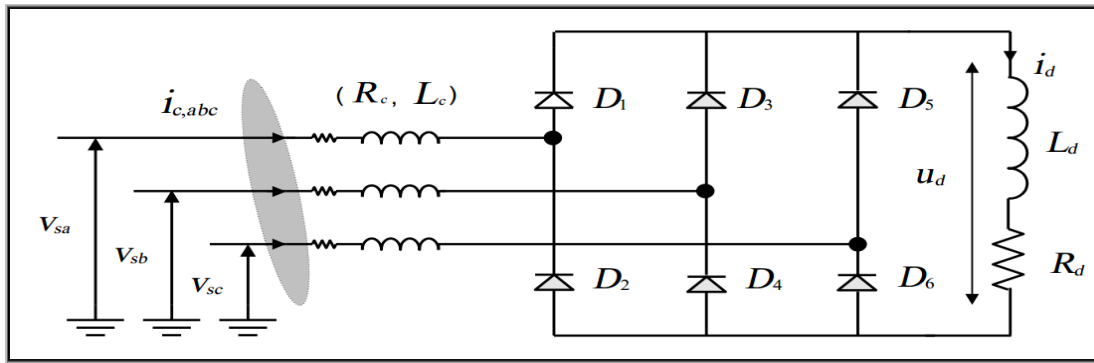


Fig.II.10 : Redresseur à diodes (pont de Graëtz) avec charge R, L .

II.4.3. Modélisation de l'onduleur de tension :

Le schéma de l'onduleur montré dans la Fig. II.11, représente un onduleur que l'on appelle à deux niveaux, la sortie de cet onduleur peut prendre deux niveaux de tension ($+V_{dc} \cdot -V_{dc}$), en pratique la commande de deux semi-conducteur d'un même bras se fait de façon complémentaire, la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre, l'ouverture et la fermeture des interrupteurs de l'onduleur dépendent de l'état des signaux de commande ($S_a \cdot S_b \cdot \text{et } S_c$), comme défini ci-dessous:

$$\begin{aligned}
 S_a &= \begin{cases} 1 & S_1 \text{ ferme et } S_4 \text{ ouverte} \\ 0 & S_1 \text{ ferme et } S_4 \text{ ouverte} \end{cases} \\
 S_b &= \begin{cases} 1 & S_2 \text{ ferme et } S_5 \text{ ouverte} \\ 0 & S_2 \text{ ferme et } S_5 \text{ ouverte} \end{cases} \\
 S_c &= \begin{cases} 1 & S_3 \text{ ferme et } S_6 \text{ ouverte} \\ 0 & S_3 \text{ ferme et } S_6 \text{ ouverte} \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{II. 15}$$

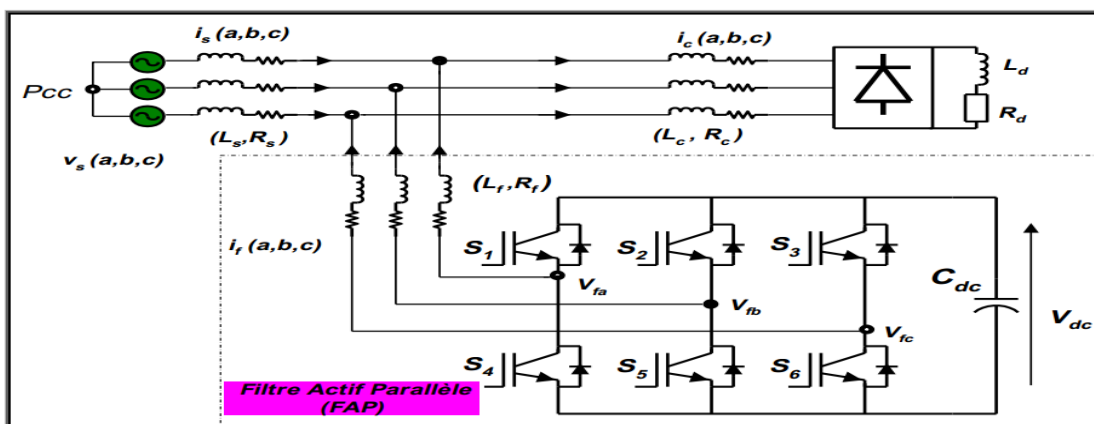


Fig. II.11 : Filtre actif parallèle.

À partir de la **Fig. II.12**, on peut dériver les tensions de l'onduleur en fonction des états des interrupteurs, les potentiels des nœuds **A**, **B**, **C** de l'onduleur par rapport au point milieu imaginaire **M** sont donnés par les équations :

$$\begin{cases} V_{AM} = U_c(2S_a - 1) \\ V_{BM} = U_c(2S_b - 1) \\ V_{CM} = U_c(2S_c - 1) \end{cases} \quad (\text{II. 16})$$

Avec :

$$U_c = \frac{V_{dc}}{2} \quad (\text{II. 17})$$

Les tensions composées de l'onduleur s'expriment en fonction des états des interrupteurs comme suit

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AM} - V_{BM} = 2U_c(S_a - S_b) \\ V_{BC} = V_{BM} - V_{CM} = 2U_c(S_b - S_c) \\ V_{CA} = V_{CM} - V_{AM} = 2U_c(S_c - S_a) \end{cases} \quad (\text{II. 18})$$

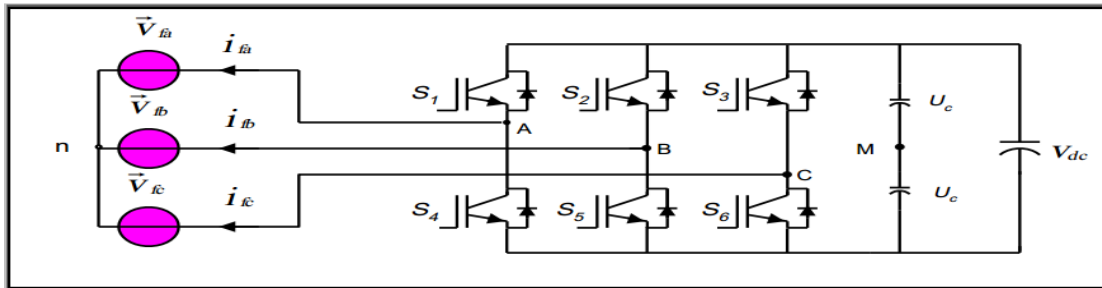


Fig. II.12 : Structure de l'onduleur triphasé à deux niveaux

Et en fonction des tensions simples de l'onduleur :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{An} - V_{Bn} \\ V_{BC} = V_{Bn} - V_{Cn} \\ V_{CA} = V_{Cn} - V_{An} \end{cases} \quad (\text{II. 19})$$

Ce qui donne :

$$\begin{cases} V_{AB} - V_{CA} = V_{An} - (V_{Bn} + V_{Cn}) + V_{An} \\ V_{BC} - V_{AB} = V_{Bn} - (V_{Cn} + V_{An}) + V_{Bn} \\ V_{CA} - V_{BC} = V_{Cn} - (V_{An} + V_{Bn}) + V_{Cn} \end{cases} \quad (\text{II. 20})$$

Dans un système équilibré, la somme des tensions est nulle, alors :

$$\mathbf{V}_{An} + \mathbf{V}_{Bn} + \mathbf{V}_{Cn} = \mathbf{0} \quad (\text{II. 21})$$

À partir de la relation (II. 21), on peut écrire [18] :

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{An} = -(\mathbf{V}_{Bn} + \mathbf{V}_{Cn}) \\ \mathbf{V}_{Bn} = -(\mathbf{V}_{An} + \mathbf{V}_{Cn}) \\ \mathbf{V}_{Cn} = -(\mathbf{V}_{An} + \mathbf{V}_{Bn}) \end{cases} \quad (\text{II. 22})$$

En remplaçant le système (II. 22) dans (II. 20), on peut trouver les tensions simples de l'onduleur en fonction de celles composées [19]:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{AB} = \frac{\mathbf{V}_{AB} - \mathbf{V}_{CA}}{3} \\ \mathbf{V}_{BC} = \frac{\mathbf{V}_{BC} - \mathbf{V}_{AB}}{3} \\ \mathbf{V}_{CA} = \frac{\mathbf{V}_{CA} - \mathbf{V}_{BC}}{3} \end{cases} \quad (\text{II. 23})$$

À partir des systèmes (II. 18) et (II. 23), les tensions simples de l'onduleur peuvent s'écrire en fonction des états \mathbf{S}_a . \mathbf{S}_b . **et** \mathbf{S}_c et de la tension \mathbf{V}_{dc} comme suit,[20]:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{fa} = \mathbf{V}_{An} = 2\mathbf{U}_c \frac{2\mathbf{S}_a - \mathbf{S}_b - \mathbf{S}_c}{3} = \mathbf{V}_{dc} \frac{2\mathbf{S}_a - \mathbf{S}_b - \mathbf{S}_c}{3} \\ \mathbf{v}_{fb} = \mathbf{V}_{Bn} = 2\mathbf{U}_c \frac{2\mathbf{S}_b - \mathbf{S}_a - \mathbf{S}_c}{3} = \mathbf{V}_{dc} \frac{2\mathbf{S}_b - \mathbf{S}_a - \mathbf{S}_c}{3} \\ \mathbf{v}_{fc} = \mathbf{V}_{Cn} = 2\mathbf{U}_c \frac{2\mathbf{S}_c - \mathbf{S}_a - \mathbf{S}_b}{3} = \mathbf{V}_{dc} \frac{2\mathbf{S}_c - \mathbf{S}_a - \mathbf{S}_b}{3} \end{cases} \quad (\text{II. 24})$$

Ainsi, on pourra exprimer huit cas possibles de tension de sortie du filtre actif, (**Tab. II. 2**).

II.4.4. Modèle du FAP dans le repère triphasé (a, b, c) :

Les équations des tensions de trois phases du filtre actif parallèle illustrés par la **Fig. II.12**. Sont données par :

$$\mathbf{L}_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{fa} \\ \mathbf{i}_{fb} \\ \mathbf{i}_{fc} \end{bmatrix} = -\mathbf{R}_f \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{fa} \\ \mathbf{i}_{fb} \\ \mathbf{i}_{fc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{fa} \\ \mathbf{v}_{fb} \\ \mathbf{v}_{fc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{sa} \\ \mathbf{v}_{sb} \\ \mathbf{v}_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 25})$$

Pour le coté continu :

$$\mathbf{C}_{dc} \frac{d\mathbf{V}_{dc}}{dt} = \mathbf{S}_a \mathbf{i}_{fa} + \mathbf{S}_b \mathbf{i}_{fb} + \mathbf{S}_c \mathbf{i}_{fc} \quad (\text{II. 26})$$

Le système d'équation définissant le filtre actif dans le repère triphasé est donné par :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_a}{dt} = -R_f i_{fa} + v_{fa} - v_{sa} \\ L_f \frac{di_b}{dt} = -R_f i_{fb} + v_{fb} - v_{sb} \\ L_f \frac{di_c}{dt} = -R_f i_{fc} + v_{fc} - v_{sc} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_{fa} + S_b i_{fb} + S_c i_{fc} \end{cases} \quad (\text{II. 27})$$

II.4.5. Modèle du FAP dans le repère stationnaire (α, β) :

Le repère stationnaire est un repère biphasé fixe peut-être obtenu au moyen d'une transformation dite transformation de Concordia, le repère stationnaire (α, β) et son orientation, relativement au système triphasé (a, b, c) est présenté dans la **Fig.II.13** :

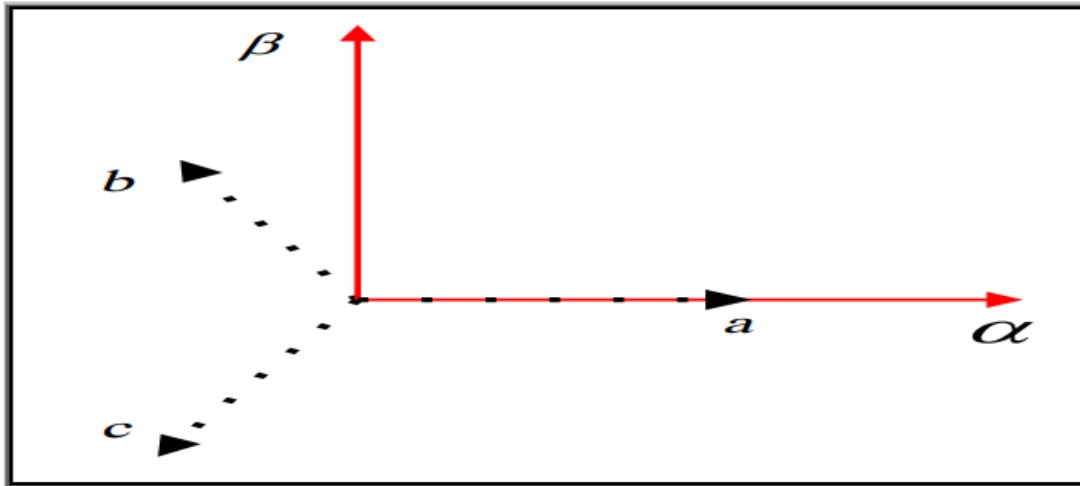


Fig. II.13 : Position du repère biphasé(α, β) relativement au repère triphasé (a, b, c).

À partir du modèle du filtre actif dans le repère triphasé, et en appliquant la transformée de Concordia sur ce modèle, le modèle triphasé précédent peut être réaménagé dans une représentation biphasée comme suit :

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{f\alpha}}{dt} = -R_f i_{f\alpha} + v_{f\alpha} - v_{s\alpha} \\ L_f \frac{di_{f\beta}}{dt} = -R_f i_{f\beta} + v_{f\beta} - v_{s\beta} \\ C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = S_\alpha i_{f\alpha} + S_\beta v_{f\beta} \end{cases} \quad (\text{II. 28})$$

Où les tensions du réseau, les courants et les tensions du filtre sont donnés par [21] :

$$\begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 29})$$

$$\begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} V_{dc} \quad (\text{II. 30})$$

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha} \\ i_{f\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{fa} \\ i_{fb} \\ i_{fc} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 31})$$

$$\begin{cases} S_\alpha = \frac{1}{\sqrt{6}} (2S_a - S_b - S_c) \\ S_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}} (S_b - S_c) \end{cases} \quad (\text{II. 32})$$

II.4.6. Modèle du FAP dans le repère tournant (d, q) :

Ce repère tournant est obtenu en appliquant une rotation sur le repère stationnaire (α, β) d'un angle ωt où ω c'est la vitesse angulaire de la source (Fig.II.14).

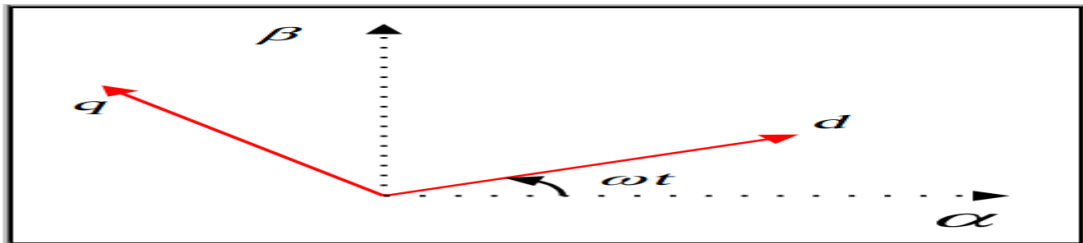


Fig. II.14 : Représentation des repères stationnaire (α, β) et tournant (d, q).

Dans ce cadre, les grandeurs sinusoïdales tournant à la même fréquence angulaire deviennent des constantes, et les variables indiquées dans ce cadre sont respectivement liées au flux de puissance active et réactive dans le système.[22]. Appliquons-la transforme de Park sur le système, nous obtiendrons le modèle de l'onduleur dans le repères synchrone (d, q) [23]:

$$\begin{cases} L_f \frac{di_{fd}}{dt} = -R_f i_{fd} + v_{fd} - v_{sd} \\ L_f \frac{di_{fq}}{dt} = -R_f i_{fq} + v_{fq} - v_{sq} \\ C_{dc} \frac{dv_{dc}}{dt} = S_d i_{fd} + S_q v_{fq} \end{cases} \quad (\text{II. 33})$$

$$\begin{cases} S_d = S_\alpha \cos wt + S_\beta \sin wt \\ S_q = -S_\alpha \sin wt + S_\beta \cos wt \end{cases} \quad (\text{II. 34})$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe du filtre actif parallèle comme une solution de dépollution des courants harmonique et énergies réactif produite par des charges non-linéaires. La partie puissance et la partie commande ont été présenté d'une manière Détaillée.

Afin nous avons présenté modélisation du filtre actif parallèle ont été présenté d'une manière Détaillée.

Chapitre III :
Commande classique
du FAP

III.1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons étudié la structure du filtre actif parallèle et ses mécanismes d'action, car il a été constaté qu'il est divisé en deux parties, une partie de puissance et une partie de contrôle. La partie puissance est toujours constituée d'un onduleur

Cette partie est consacrée à une étude plus détaillée du filtre actif parallèle, à savoir son pilotage, afin d'atteindre l'objectif premier d'amélioration des performances de compensation lorsque les conditions de fonctionnement du réseau électrique sont sévères.

III.2 stratégies de commande :

III.2.1. Identification des courants de référence :

La fonction d'identification est une méthode d'extraction d'harmoniques qui fournit les références de courant que l'onduleur doit imposer pour effectuer l'opération de filtrage actif. Il existe des méthodes d'extraction globale (toutes les harmoniques à corriger sont présentes dans la référence) et des méthodes d'extraction sélective (seules les harmoniques à compenser sont incluses dans la référence) (les harmoniques à compenser sont choisies et limitées) [24]

❖ Les méthodes globales d'extraction :

Le but de ces stratégies est de créer autant de courants sinusoïdaux que possible. Pour cela, mesurer les courants de charge puis les filtrer pour obtenir le courant de référence à injecter. FIGURE. III.1 montre les deux techniques alternatives directes ou indirectes, employant chacune deux types de filtres distincts [25]. Ces approches permettent de mettre en évidence les caractéristiques fréquentielles des courants, mais elles nécessitent des filtres d'ordre élevé, à la fois coûteux et compliqués à mettre en place.

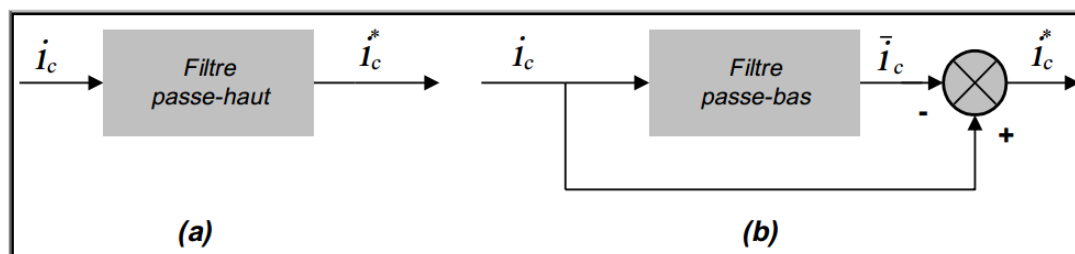


Fig. III.1: Filtrage des signaux dans le domaine temporel, a) Méthode directe, b) Méthode indirecte.

❖ Les méthodes d'extraction sélectives :

Parmi les méthodes sélectives qui existent pour calculer les courants de référence, on peut évoquer[26]:

- L'utilisation de filtre résonnant sur les harmoniques à considérer, plusieurs manuscrits adoptant cette technique : Le filtre **Notch**, les intégrateurs généralisés en repère fixe, ...
- La transformée de Fourier discrète : Elle est basée sur le calcul d'un vecteur issu des N points enregistrés sur une séquence, on obtient alors le spectre de chaque raie harmonique **TFD(k)**
- La transformée de Fourier discrète récursive : Elle se base sur la **TFD** mais prend en compte les termes calculés aux instants précédents et actuels soit **TFD(k)** et **TFD(k + 1)**.
- Le filtre de **Kalman** : Il s'agit de faire une prédiction à l'instant **k + 1** des références en utilisant un modèle d'état du signal.

III.2.1.1. Les méthodes d'identification :

Le choix de la stratégie de génération de la référence de courant, qui oblige le bloc de génération de référence à acquérir les informations d'amplitude et de phase du courant de charge pour alimenter génère la référence de courant du compensateur harmonique et réactif, est l'un des facteurs d'influence les plus importants les performances d'un filtre de puissance active.[27]. On trouve plusieurs méthodes qui décrivent différents algorithmes d'identification possibles. Ces méthodes se classifient dans deux groupes selon le domaine temporel ou fréquentiel de l'outil mathématique développé :

III.2.1.1.1. Méthodes du domaine fréquentiel :

Pour trouver les harmoniques de courant, les approches dans le domaine fréquentiel utilisent l'analyse de Fourier (transformée discrète, transformée rapide, transformée discrète récursive, etc.). Les résultats transitoires moyens et le volume de calcul substantiel et l'allocation de mémoire sont les inconvénients les plus importants de ces approches.[24].

III.2.1.1.2. Méthodes du domaine temporel :

Par rapport aux approches antérieures, les méthodes du domaine temporel fournissent une réponse plus rapide et nécessitent moins de processus. Le fondamental ou une harmonique

spécifique est séparé du reste des harmoniques via le filtrage de cette manière. La stratégie d'identification dans le domaine temporel se base sur la détection des courants perturbateurs dans le domaine temporel. Trois possibilités d'identification des courants perturbateurs ont déjà été proposées : Identification à partir de la détection du courant de la charge polluante ; Identification à partir de la détection du courant de la source ; et Identification à partir de la détection de la tension de source [27]. Les deux premières méthodes sont les plus utilisées :

❖ **Identification à partir de la détection du courant de la charge Polluante :**

Le courant de charge est détecté et comparé à une référence sinusoïdale pour obtenir le courant de compensation d'harmonique de référence dans cette approche, comme illustré à la Fig. III.2. Le courant de compensation d'harmonique de référence sera ensuite comparé au courant de compensation réel injecté par le FAP, le résultat de la compensation étant fourni à un contrôleur pour créer les impulsions de la porte de l'inverseur FAP.

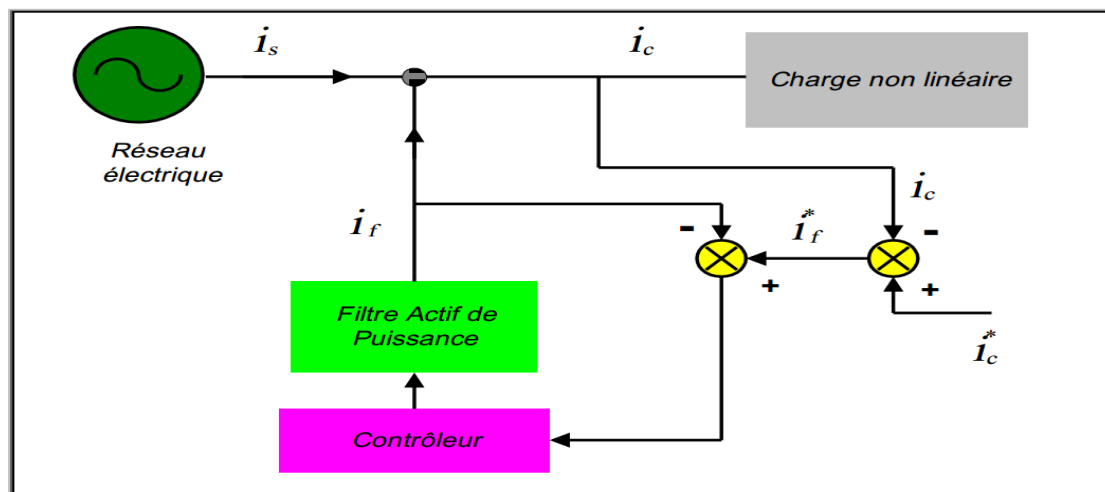


Fig. III.2: Détection du courant de la charge.

❖ **Identification à partir de la détection du courant de la Source :**

Cette approche, illustrée à la Fig. III.3, consiste à détecter le courant source et à le comparer à un courant source sinusoïdal de référence en phase avec la tension source afin de générer un courant de filtrage en opposition de phase avec les harmoniques du courant source afin de retirez-les.

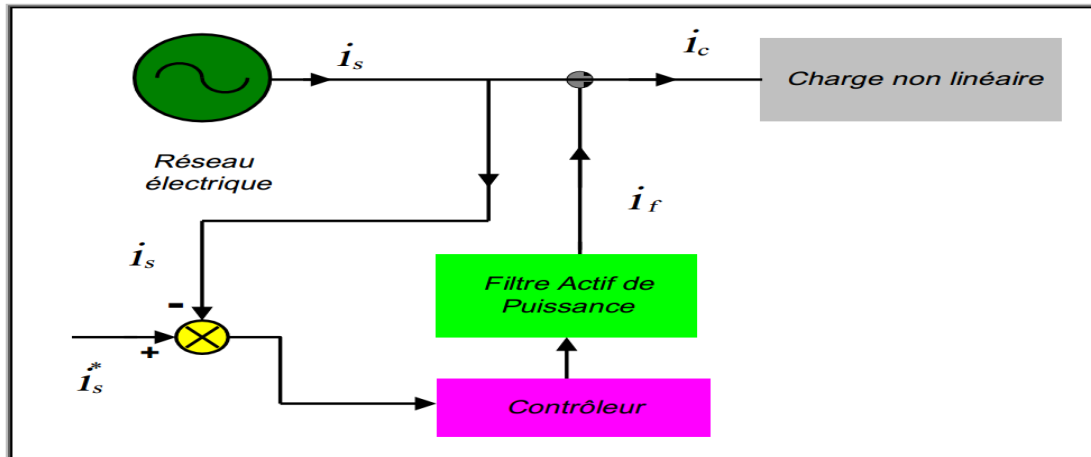


Fig. III.3: Détection du courant de la source.

III.2.1.2. Les méthodes de calcul de courant de référence :

Les méthodes de calcul de courant de référence dans le domaine temporel les plus importantes sont :

III.2.1.2.1. Méthode des puissances active et réactive instantanées (Méthode p, q) :

La méthode des puissances active et réactives instantanées (méthode p.q. abrégée) a été développée par Akagi et utilise la transformation Concordia des tensions phase-neutre et des courants de ligne. Pour calculer les puissances active et réactive instantanées. La composante fondamentale est transformée en composante continue et les composantes harmoniques en composantes alternatives. En éliminant la composante continue de la puissance active instantanée à l'aide d'un simple filtre passe-bas (Fig. III.4), les composantes harmoniques peuvent être identifiées [27] ;[25]. Soient respectivement les tensions simples d'un réseau triphasé et les courants de charge, notés V_{sa} , V_{sb} , V_{sc} , i_{ca} , i_{cb} , i_{cc} . La transformation de Concordia permet d'écrire, la relation des tensions suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = C_0 \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 1})$$

Et la relation des courants ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \\ i_{c0} \end{bmatrix} = C_0 \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 2})$$

Où :

$$C_0 = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 3})$$

C_0 Est matrice de **concordai**

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

$$P(t) = v_{sa}i_{ca} + v_{sb}i_{cb} + v_{sc}i_{cc} = p(t) + p_0(t) \quad (\text{III. 4})$$

Avec :

$$\begin{cases} P(t) = v_{s\alpha}i_{c\alpha} + v_{s\beta}i_{c\beta} \\ P_0(t) = v_{s0}i_{c0} \end{cases} \quad (\text{III. 5})$$

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

$$q(t) = -\frac{1}{\sqrt{3}} [(v_{sa} - v_{sb})i_{cc} + (v_{sb} - v_{sc})i_{ca} + (v_{sc} - v_{sa})i_{cb}] = v_{s\alpha}i_{c\beta} - v_{s\beta}i_{c\alpha} \quad (\text{III. 6})$$

La puissance q a une signification plus large que la puissance réactive habituelle. Qui ne considère que la fréquence fondamentale, la puissance imaginaire prend en compte toutes les composantes harmoniques de courants et de tension. C'est pourquoi on lui donne une autre dénomination (puissance imaginaire) avec comme unité le voltampère imaginaire (**VAI**). À partir des relations (III. 4). (III. 5) et (III. 6), nous pouvons établir la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & v_{s\beta} \\ -v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 7})$$

Dans le cas général, chacune des puissances p et q comporte une partie continue et une partie relative, ce qui nous permet d'écrire l'expression ci-dessous [28]

$$\begin{cases} \mathbf{p} = \bar{\mathbf{p}} + \tilde{\mathbf{p}} \\ \mathbf{q} = \bar{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{q}} \end{cases} \quad (\text{III. 8})$$

Avec :

$\bar{\mathbf{p}}$: Une puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant et de la tension.

$\bar{\mathbf{q}}$: Une puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant et de la tension.

$\tilde{\mathbf{p}}$ Et $\tilde{\mathbf{q}}$: Des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

La fréquence des pulsations des puissances instantanées créées à partir de la relation (III.8) doit être connue exactement afin d'isoler les puissances actives et réactives classiques. Le réseau analysé est constitué de trois fils, ce qui empêche les composants homopolaires d'y circuler.

Il est possible d'utiliser un circuit composé d'un filtre passe-bas et d'un soustracteur. La dynamique de l'approche d'identification est définie par l'ordre du filtre passe-bas. En Inversant là L'ordre de filtre passe-bas définit la dynamique de la méthode d'identification. En Inversant la relation (III. 7) nous pouvons recalculer dans le repère (α, β) comme le montre l'équation (III. 9) :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{c\alpha} \\ \mathbf{i}_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \mathbf{q} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 9})$$

En considérant les équations (III. 8) et (III. 9) 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 :

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{p}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{\text{courant alternatif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{\mathbf{q}} \end{bmatrix}}_{\text{courant reactif}} + \underbrace{\frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} & -v_{s\beta} \\ v_{s\beta} & v_{s\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{p}} \\ \tilde{\mathbf{q}} \end{bmatrix}}_{\text{courants harmoniques}} \quad (\text{III. 10})$$

Avec $\Delta = v_{s\alpha}^2 + v_{s\beta}^2$ supposé constant dans l'hypothèse d'une tension sinusoïdale Equilibré Du réseau électrique [29], [30] Cette expression montre donc que l'identification différent des composantes du courant dans le repère (α, β) revient à séparer des termes continus

des puissances réelle et imaginaire instantanées. Les courants perturbateurs triphasé qui représentent les courants identifiées, dits courants de références du filtre i_f^* sont calculés à partir de la transformation (α, β) inverse donnée par la relation (III. 11) [31] ;[32]:

$$\begin{bmatrix} i_{f,a}^* \\ i_{f,b}^* \\ i_{f,c}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(III.11)}$$

La Fig. III.4 représente le schéma de principe de la méthode des puissances Instantanées.

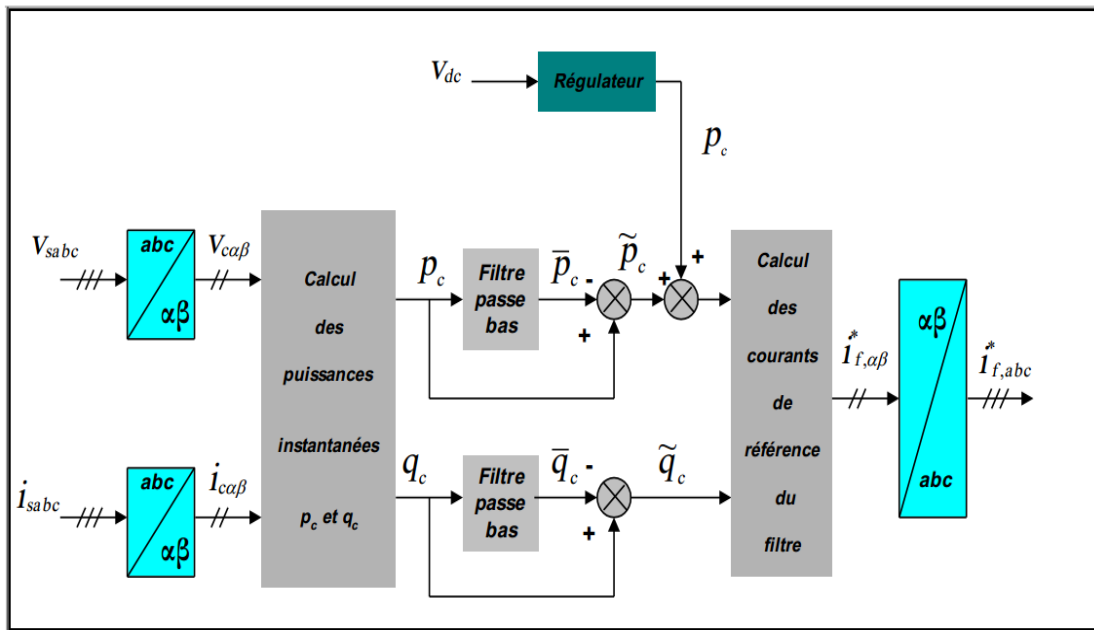


Fig. III.4 : Principe de la méthode p, q.

III.2.1.2.2. Méthode du référentiel lié au synchronisme (SRF) :

L'idée de la méthode SRF (Synchrones Frame Reference) est illustrée à la Fig.II.6. Tout d'abord, le courant est transformé en un cadre tournant à l'aide de la transformation de Park.[33].

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \quad \text{(III. 12)}$$

Ainsi, les courants sont composés d'une composante alternative, liée au fondamental, et une composante alternative liée aux harmoniques, qui peuvent être séparées en utilisant un filtre passe-bas **fig. III.5**, de fonction de transfert :

$$W(p) = \frac{w_0^2}{p^2 + 2\xi_0 w_0 p + w_0^2} \tag{III. 13}$$

$W_0=2\pi f_0$, f_0 : La fréquence de coupure du filtre.

P : L'opérateur de **Laplace**.

ξ_0 : Le dépassement

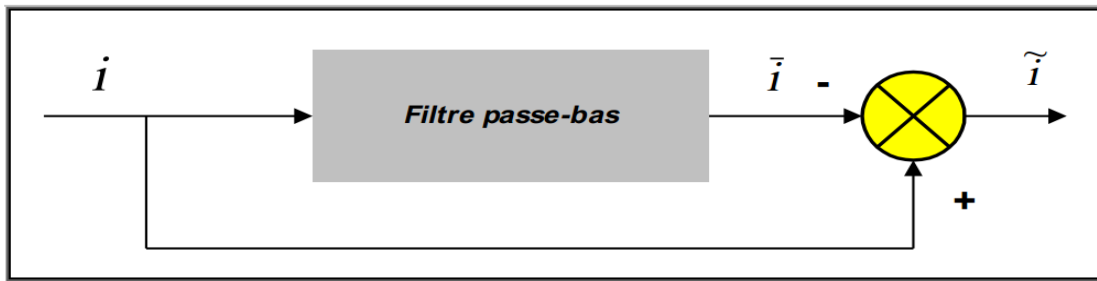


Fig. III.5: Le filtre passe-bas

Cependant, les composantes des courants de la charge dans le repère **(d, q)** s'obtiennent par la transformé de **Park**, tel que l'angle de transformation est Θ qui représente l'angle instantané du vecteur de tension de la composante fondamentale directe :

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \tag{III. 14}$$

Avec :

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{v_{s\beta}}{v_{s\alpha}} \right) \tag{III. 15}$$

Ainsi les courants i_{cd} et i_{cq} sont décomposés en deux termes, continu et oscillatoire :

$$i_{cd} = \bar{i}_{cd} + \tilde{i}_{cd} \tag{III. 16}$$

$$i_{cq} = \bar{i}_{cq} + \tilde{i}_{cq} \tag{III. 17}$$

Les courants de référence suivant les axes α et β sont :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha,ref} \\ i_{\beta,ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d + i_{dc} \\ i_q \end{bmatrix} \quad (III. 18)$$

Finalement les courant de référence suivant les axes **a**, **b** et **c** :

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \\ i_0^* \end{bmatrix} \quad (III. 19)$$

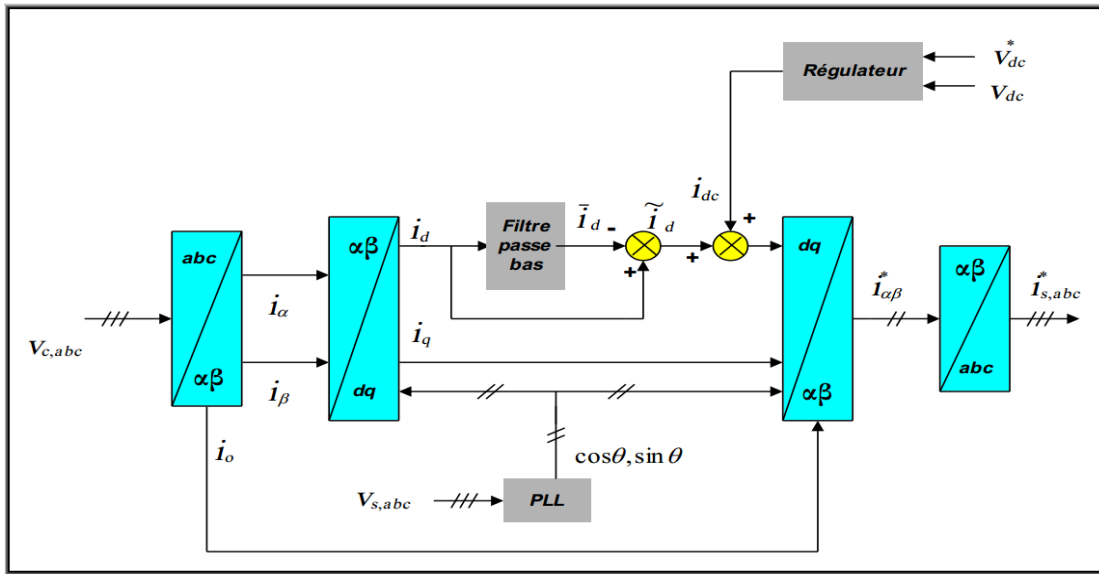


Fig. III.6: Principe de la méthode SRF.

III.2.1.2.3. Méthode d'estimation du courant de référence de source par la régulation de la tension du bus continu :

Cette approche (Fig. III.7) est basée sur le concept d'équilibrage énergétique dans le condensateur qui correspond au condensateur de stockage d'énergie. La valeur de la tension de référence v_{dc}^* s'inscrit dans l'énergie stockée.[34]:

$$E_{dc}^* = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^{*2} \quad (III. 20)$$

Et l'énergie instantanée dans le condensateur s'écrit en fonction de la tension $V_{dc}(t)$

$$e_{dc}(t) = \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}^2(t) \quad (III. 21)$$

Donc l'écart entre la quantité instantanée et sa référence (La perte de l'énergie au niveau du condensateur) sera :

$$\Delta E_{dc}(t) = E_{dc}^* - e_{dc}(t) = \frac{1}{2} C_{dc} V_{dc}^{*2} - \frac{1}{2} C_{dc} v_{dc}^2(t) \quad (\text{III. 22})$$

$$\Delta E_{dc}(t) = E_{dc}^* - e_{dc}(t) = \frac{C_{dc}}{2} \left(\frac{V_{dc}^* - v_{dc}(t)}{\cong 0} \right) \left(\frac{V_{dc}^* + v_{dc}(t)}{\cong 2V_{dc}^*} \right) \quad (\text{III. 23})$$

$$\Delta E_{dc}(t) \cong C_{dc} V_{dc}^* (V_{dc}^* - v_{dc}(t)) \quad (\text{III. 24})$$

Cette perte d'énergie doit être fournie par la source de tension. La valeur de crête du courant de charge I_{sc} peut être calculée par la suite :

$$\int_0^T V_{sm} \sin(\omega t) I_{sc} \sin(\omega t) dt = \Delta E_{dc}(t) \quad (\text{III. 25})$$

$$\Rightarrow V_{sm} \cdot I_{sc} \int_0^T \sin^2(\omega t) dt = \Delta E_{dc}(t) \quad (\text{III. 26})$$

$$\frac{V_{sm} \cdot I_{sc}}{2} \int_0^T \left[1 - \frac{\cos(2\omega t)}{2} \right] dt = \Delta E_{dc}(t) \quad (\text{III. 27})$$

$$\frac{V_{sm} \cdot I_{sc} T}{2} = \Delta E_{dc}(t) \quad (\text{III. 28})$$

$$I_{sc} = \frac{2}{TV_{sm}} \Delta E_{dc}(t) \quad (\text{III. 29})$$

$$I_{sc} = \frac{2}{TV_{sm}} C_{dc} V_{dc}^* (V_{dc}^* - v_{dc}(t)) \quad (\text{III. 30})$$

L'équation (III. 30) montre que on peut contrôler la tension aux bornes du condensateur de stockage v_{dc} par la l'ajustement (régulation) de l'amplitude du courant de source. Le courant maximum(crête) fourni par la source de tension sera [35]

$$I_{sm} = I_s + I_{sc} \quad (\text{III. 31})$$

Par la multiplication I_{sm} Par $\sin(\omega t)$, on peut obtenir le courant de référentiel de source [36]

$$I_{sm}^*(t) = I_{sm} \cdot \sin \omega t \quad (\text{III. 32})$$

Alors à la lumière de ce raisonnement on peut employer un détecteur de crête pour trouver la valeur de l'amplitude des tensions de source V_{sm} , et avec la division de multiplication de trois sinus unitaires par la valeur crête de courant de référence de la source i_{sm} [37].

$$V_{sm} = \sqrt{\frac{2}{3}(v_{sa}^2 + v_{sb}^2 + v_{sc}^2)} \tag{III. 33}$$

En effet, la tension du réseau doit être saine (sinusoïdale et équilibrée) pour que cette approche de détection de crête fonctionne. Parce que les tensions du réseau sont fréquemment interrompues et/ou déformées, et afin d'étendre l'applicabilité de cette approche d'identification que nous avons développée à toute sorte de tension, l'utilisation de la boucle à verrouillage de phase (phase- locked-loop, **PLL**) est indispensable pour la synthèse des trois sinus unitaires [38] ; [39]. La détermination des courants de référence sinusoïdaux du réseau nécessite une régulation de la tension du bus continu du **FAP**, non seulement pour générer l'amplitude des courants de référence mais aussi bien pour :

- Maintenir cette tension à un niveau fixe tout en assurant une compensation des pertes dans le filtre actif.
- Limiter ses variations en régime dynamique afin de ne pas détériorer les performances du filtre actif.

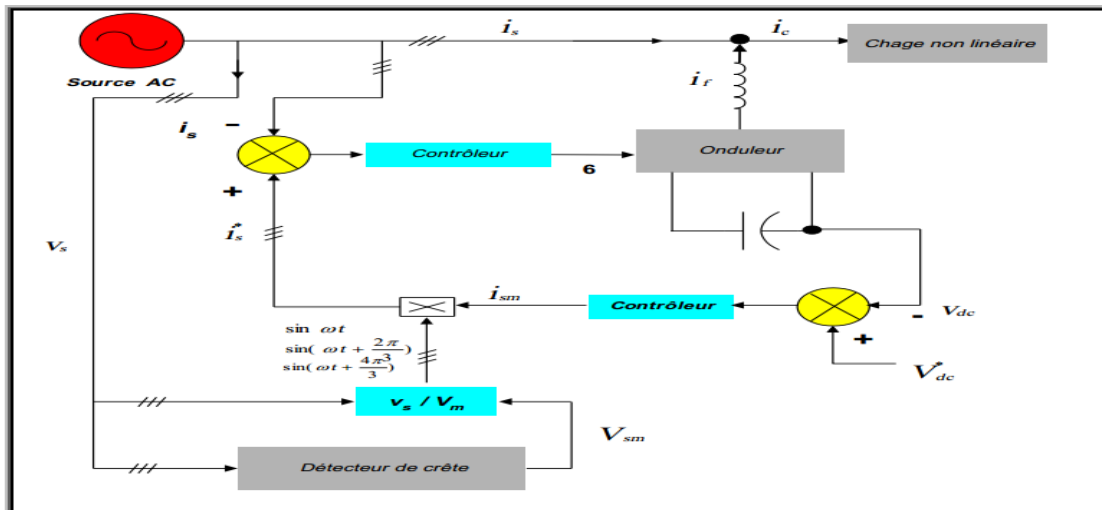


Fig. III.7: Principe d'estimation du courant de référence de source par la régulation de la tension du bus continu

III.2.2. La poursuite de courant de référence :

Le but d'une commande FAP est de contrôler les courants de sortie du FAP de manière à ce qu'ils suivent au plus près leurs références. Le principe de cette poursuite est basé sur la comparaison entre le courant généré par le FAP, i_f et le leur référence, i_f^* (La commande est dite directe), ou la comparaison entre le courant de source, i_s et leur référence, i_s^* (La commande est dite indirecte) [40], afin d'en déduire les ordres de commande des interrupteurs de puissance. Les deux principales familles de contrôleurs sont les suivantes[38] :

- Contrôle par hystérésis.
- Contrôle par modulation de largeur d'impulsion (MLI).

III.2.3. La régulation de la tension aux bornes de la source de tension

continue :

La tension aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. Les éléments à l'origine de la variation de la tension moyenne v_{dc} aux bornes du condensateur sont les suivants

- Les pertes statistiques et dynamiques dans les semi-conducteurs de puissance de l'onduleur.
- Les pertes dans les inductances de découplage L_f .
- L'injection des courants fondamentaux pendant les régimes transitoires de la charge polluante [41]

La **Fig. III.7**, représente l'écoulement des puissances entre les différents organes Du FAP. Si $p_s(t)$ est la puissance active délivrée par la source, et $p_c(t)$ la Puissance active instantanée absorbée par la charge polluante, alors la puissance instantanée $p_f(t)$ injectée par le filtre parallèle est donnée par :

$$p_f(t) = p_f - \tilde{p}_f(t) = p_c(t) - p_s = p_c + \tilde{p}_c - p_s \quad (\text{II. 40})$$

$$p_f = p_c - p_s \quad (\text{II. 41})$$

$$\tilde{p}_f(t) = \tilde{p}_c(t) \quad (\text{II. 42})$$

Pendant les états transitoires, l'équation **II.41** représente l'échange de puissance active, la charge polluée, le réseau et le filtre actif. Le transfert de puissance se traduit par une modification de la tension continue aux bornes du condensateur. En régime permanent, le filtre actif n'échange pas de puissance active avec le réseau d'alimentation $p_f = 0$. $p_c = p_p$, la

fluctuation de puissance à la sortie du filtre $\tilde{p}_f(t)$ est dans ce cas égale à la puissance harmonique de la charge [34]

$$\tilde{p}_f(t) = \tilde{p}_c(t) \tag{II. 43}$$

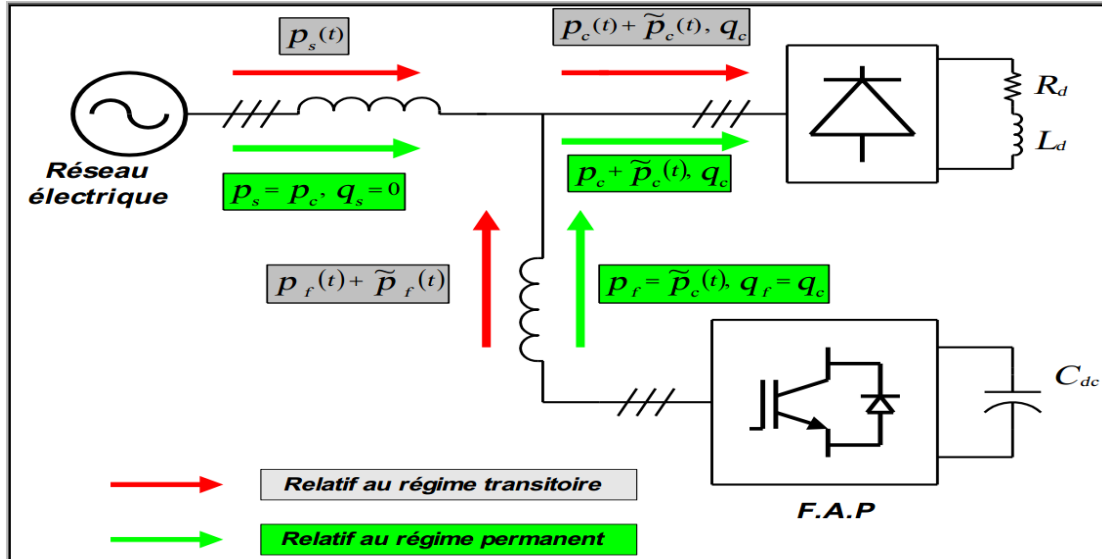


Fig.III.8 : Écoulement des puissances.

En régime permanent, la puissance active fournie par la source doit être égale à la Puissance demandée par la charge, lorsqu'un déséquilibre de puissance active se produit dans le système, le condensateur de stockage d'énergie doit fournir la différence de puissance entre le réseau et la charge.

Il en résulte alors une variation de la tension continue aux bornes du condensateur C_{dc}

- Si la puissance active fournie par le réseau est inférieure à celle absorbée par la charge ($p_f > 0$) alors la valeur moyenne de la tension aux bornes du condensateur diminue.
- Dans le cas contraire ($p_f < 0$) la valeur moyenne de la tension aux bornes du condensateur augmente.

III.2.4. Régulation du courant du filtre actif parallèle :

En négligeant les effets du condensateur C_f et des résistances du filtre de sortie sur le courant de référence i_{inj} (pour les harmoniques basses fréquences qui sont loin de la fréquence de commutation), nous pouvons écrire la relation suivante caractérisant le courant du filtre actif $i_{inj} : C_f$

$$L_f \frac{d}{dt} I_{inj} = V_f - V_s \quad (III.7)$$

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

$$\Delta I_f = I_{ref} - I_{inj} \quad (III.8)$$

Des équations (III.7) et (III.8) nous obtenons l'expression ci-dessous :

$$L_f \frac{d}{dt} \Delta I_f = (V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref}) - V_f \quad (III.9)$$

Le premier terme de la partie droite de la relation (III.9) peut être défini comme tension de référence (V_{f-ref}), ce qui nous donne l'expression suivante :

$$V_{f-ref} = V_s + L_f \frac{d}{dt} I_{ref} \quad (III.10)$$

L'écart entre V_{f-ref} et V_f produit alors une erreur sur le courant. Selon la relation (III.10), la tension de référence est composée de deux termes à fréquences différentes. Le premier représente la tension du réseau V_s directement mesurable. Le second est égal à la chute de tension aux bornes de l'inductance L_f , lorsque celle-ci est traversée par un courant égal à celui de la référence. Ce terme doit être élaboré par un régulateur de courant, comme le montre la Fig. (III.9).[42]

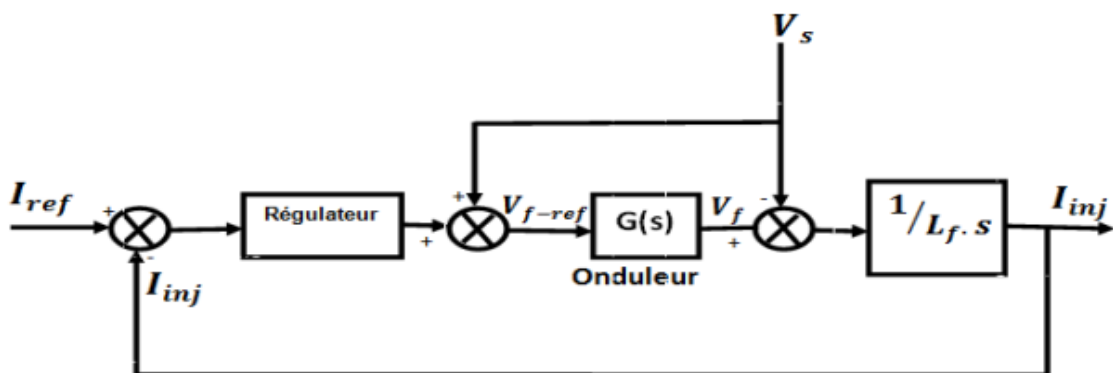


Fig. III.9. : Schéma de principe de régulation des courants du FAP

Dans la gamme des fréquences des courants harmoniques à compenser, l'onduleur de tension à commande MLI peut être grossièrement modélisé par un gain G_0 comme suit :

$$G_0 = \frac{V_{dc}}{V_p} \quad (III.11)$$

Avec :

V_{dc} : La tension cotée continu de l'onduleur

V_p : L'amplitude de la porteuse triangulaire.

Pour que V_f soit égale à V_{f-ref} , nous choisissons G_0 égale à 1. Le schéma de la régulation de ce courant peut alors se simplifier, comme montre la **fig. (III.10)** :

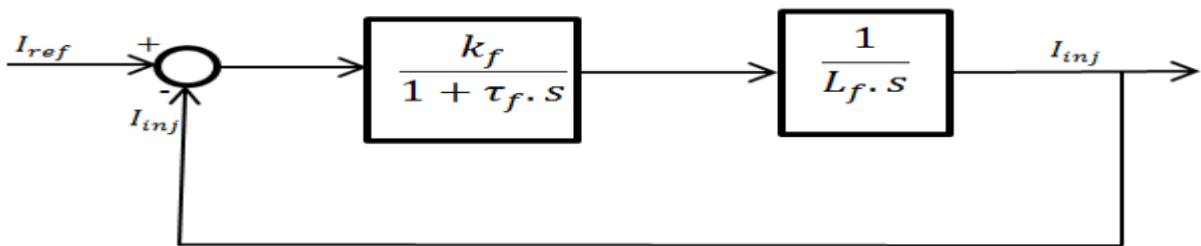


Fig. III.10: Boucle de régulation des courants du FAP

La fonction de transfert en boucle fermée du schéma simplifié est :

$$F_i(s) = \frac{k_f / \tau_f \cdot L_f}{s^2 + \frac{1}{\tau} s + \left(\frac{k_f}{\tau_f \cdot L_f} \right)} \quad (III.12)$$

Cette dernière est identique à celle d'un système du second ordre donné par :

$$F_{pi}(s) = \frac{w_i^2}{s^2 + 2\varepsilon_i w_i s + w_i^2} \quad (III.13)$$

Ce qui donne les valeurs des paramètres K_f et τ_f du régulateur PI :

$$w_i = \sqrt{k_f / \tau_f \cdot L_f} \quad (III.14)$$

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} \sqrt{L_f / k_f \cdot \tau_f} \quad (III.15)$$

III.2.5. Filtre de découplage :

La fonction du filtre de découplage est de permettre le raccordement de l'onduleur de tension au réseau électrique, souvent considéré comme une source de courant créant des courants harmoniques à partir du différentiel de tension entre la sortie du pont onduleur et le réseau. Ce filtre est un filtre qui restreint la dynamique du courant mesuré tout en provoquant la propagation des composantes sur le réseau électrique du fait des commutations.[43]

III.2.6. Système de stockage d'énergie :

Pour les petites et moyennes puissances, le stockage de l'énergie côté courant continu via un condensateur de capacité (C_{dc}) de tension (V_{dc}) est plus efficace et moins coûteux.[44] [45]. Le condensateur a deux fonctionnalités principales, en régime transitoire, est un réservoir qui fournit l'énergie nécessaire, et en régime permanent, il assure à la tension un faible taux d'ondulation [44].

Nous avons utilisé une grande valeur de (V_{dc}) pour avoir une dynamique décente du filtre tout en respectant les limitations du commutateur et la contrôlabilité de l'onduleur. Elle est généralement choisie au moins deux fois plus grande que le max de la tension simple du réseau [46]

Dans notre cas, la valeur efficace de la tension simple du réseau est V_s Ce qui correspond à une tension maximale de V_{smax}

On choisit une tension $V_{dc} = 2,5 \times V_{smax}$

Le (C_{dc}) est choisie selon l'augmentation de la composante fondamentale du courant de la charge, l'énergie stockée dans le condensateur doit être libérée immédiatement pour compenser l'augmentation de la puissance consommée par la charge[44]

Il y a plusieurs méthodes pour dimensionner la valeur de (C_{dc}), dans notre étude nous avons utilisé une méthode qui se base sur l'utilisation du raisonnement du calcul du rapport des puissances apparentes [44] (voir Annexe)

$$\frac{S_{filtre}}{S_{charg}} = \frac{\sqrt{Q_c^2 + D_c^2}}{\sqrt{P_c^2 + Q_c^2 + D_c^2}} \quad (III.1)$$

En choisissant la période de l'ondulation de la tension aux bornes du condensateur six fois inférieure à celle de la tension du réseau [47], et en fixant le taux d'ondulation de la tension continue à $\Delta V_{dc} = 2\%$, la relation est la suivante :

$$C_{dc} \geq \frac{2 \cdot 0.3036 P_c}{6 F_r (V_{dc \max}^2 - V_{dc \min}^2)} \quad (\text{III.2})$$

Tel que :

- F_r Est la fréquence fondamentale du réseau.
- P_c Est la puissance active absorbée par la charge.
- $0,3036 P_c = \sqrt{Q_c^2 + D_c^2}$ est la puissance apparente du filtre (calculé depuis (III.2))
- $V_{dc \max} = V_{dc} + \frac{\Delta V_{dc}}{2}$
- $V_{dc \min} = V_{dc} - \frac{\Delta V_{dc}}{2}$

III.3. Méthode de régulation par PI :

On va prendre l'exemple d'un réflexe humain pour une régulation PI manuelle de la vitesse d'une voiture à 100 Km/h sur une autoroute, l'acte de régulation est intuitif, on accélère si on est en dessous de la vitesse voulue, on lâche l'accélérateur si on en est en dessus (action proportionnelle à l'erreur), et on essaye de rester autour de 100Km/h avec le plus de précision possible (action proportionnelle à la somme des erreurs) [48].

L'action proportionnelle est un gain proportionnel à l'erreur commise, c'est-à-dire proportionnel à la différence entre la valeur voulue et la valeur réelle, le régulateur proportionnel seulement, a une commande qui s'écrit [48]

$$\text{Commande} = K_p \times \text{erreur} \quad (\text{III.16})$$

Avec K_p le coefficient de proportionnalité de l'erreur, on le règle généralement expérimentalement (après plusieurs essais).

L'action intégrale est un gain proportionnel à la somme des erreurs ou encore à l'intégrale des erreurs commise au cours du temps.

On définit la commande d'un PI alors comme la combinaison linéaire de l'erreur et de la somme des erreurs du système, et elle s'écrit

$$\text{Commande} = K_p \times \text{erreur} + K_i * \int \text{erreurs} \quad (\text{III. 17})$$

Avec K_i le coefficient de proportionnalité de la somme des erreurs, et dans le cas d'un régulateur classique il est réglable manuellement.

On obtient alors un asservissement avec une erreur statique finale nulle. On peut écrire aussi cette formulation du régulateur PI en fonction de la variation de la commande [48]:

$$\text{Variation Commande} = K_p \times \text{erreur} + K_i * \text{erreurs} \quad (\text{III. 18})$$

Afin de faciliter l'écriture de la loi de commande de ce régulateur et sa variation, dont nous aurons besoin dans les parties suivantes, nous allons adopter les notations suivantes :

- $U(t)$: le command à l'instant t
- ΔU : la variation du command $[u(t) - u(t-1)]$
- C : est le signal de référence à suivre, il est aussi dit " consigne "
- Y : est la réponse du système à la référence donné
- $E(t)$: la variation de l'instant t , $[e = c - y]$

On réécrit (III. 19) avec ces notations :

$$\Delta U = u(t) - u(t-1) = K_p * \Delta e + K_i * e \quad (\text{III. 19})$$

On peut alors écrire la formule de la commande du régulateur PI en fonction de la variation de commande qui est écrite de son tour en fonction de l'erreur et de la variation d'erreur (III. 20):

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u \quad (\text{III. 20})$$

III.4. Stratégie de commande de l'onduleur du filtre actif parallèle:

Le contrôle de l'onduleur a pour but de contrôler les courants en sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe repose sur la comparaison des courants en sortie du filtre actif et de leurs références calculées à partir de différentes méthodes d'extraction et de régulation des courants harmoniques et de tension d'un condensateur de stockage d'énergie.

Pour maintenir le courant en sortie du filtre actif autour de sa référence, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, notamment :

- a) **La commande par hystérésis** : également appelé contrôle marche/arrêt, est un contrôle non linéaire qui utilise la différence de courant créée par l'onduleur et le courant de référence. L'erreur est comparée au modèle de bande d'hystérésis. Une instruction de contrôle est délivrée aux commutateurs pour faire l'erreur à l'intérieur de la bande dès que l'erreur atteint la limite inférieure ou supérieure. Le principal avantage de cette stratégie est sa facilité d'application. La fréquence de commutation, par contre, est incontrôlée (aléatoire), donc les commutations évoluent librement dans la bande d'hystérésis.[49]
- b) **Commande par MLI vectorielle** : La technique MLI vectorielle est largement utilisée dans le contrôle de l'onduleur car elle peut améliorer la valeur maximale de la tension de sortie de l'onduleur tout en ayant un taux de distorsion harmonique inférieur à l'approche MLI sinusoïdale. Pour contrôler l'onduleur ou le redresseur, de nombreuses méthodes utilisent le vecteur MLI. Tous les schémas de modulation visent à réduire les pertes de commutation et les harmoniques tout en offrant un contrôle précis.[50]
- c) **Commande MLI sinus-triangle** : Dans cette technique la fréquence de commutation est fixe, le réglage s'effectue par variation du rapport cyclique des signaux de commande.

III.4.1 Lois de commande :

Pour étude de notre cas, nous avons opté par l'exploitation des caractéristiques de la **MLI sinus-triangle** pour développer notre commande, à cet effet, nous devons en premier lieu définir la (MLI).

III.4.1.1_ Principe de la commande MLI sinus-triangle :

Son principe général est de comparer une tension de référence à une porteuse triangulaire ou en dent de scie (figure III-11).

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation m est défini comme le rapport de la fréquence de modulation f_p de la porteuse à la fréquence f de la tension de référence

$$\left[m = \frac{f_p}{f} \right] \quad ; \quad m > 1$$

- Le coefficient de réglage ou le taux de modulation r est le rapport de l'amplitude (valeur crête) V_m de la tension de référence à l'amplitude U_{pm} de la porteuse

$$\left[r = \frac{V_m}{U_{pm}} \right], \quad 0 < r < 1$$

On note qu'une M.L.I est synchrone si m est entier. Dans ce cas, la grandeur de sortie est périodique de période $\frac{1}{\text{fréquence}}$. Elle est dite asynchrone dans le cas contraire, en particulier quand l'onde de référence varie continûment (commande vectorielle ...) Pour le redresseur triphasé la porteuse la plus adaptée aux onduleurs (redresseurs) est la triangulaire bipolaire.

Le principe de génération des impulsions de commande d'un bras k d'un redresseur à et l'algorithme de cette stratégie est illustré par la figure (III.11).

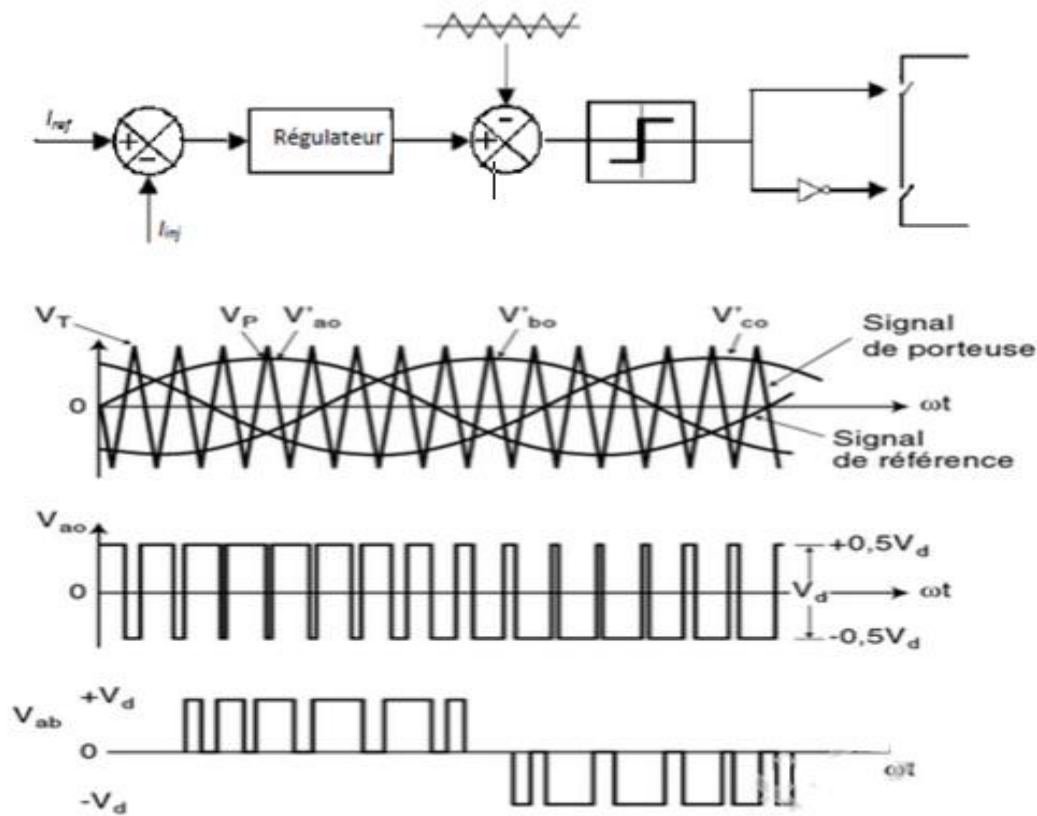


Fig.III.11 : Principe de la stratégie sinus-triangulaire.

En modulation synchrone, si m est impair, on trouve dans le spectre de la tension uniquement des harmoniques impairs. Dans le cas de m pair, on trouve une valeur moyenne non nulle (signal non symétrique) et des harmoniques pairs et impairs. C'est pourquoi, on choisit des indices de modulation impairs.

Pour le triphasé, les harmoniques de rang multiple de trois des tensions simples et composées sont nuls, ainsi afin d'annuler les raies de fréquence m_f , $3m_f$, $5m_f$, ... etc., on choisit pour le triphasé des indices de modulation impairs et multiples de trois.

On montre qu'avec cette stratégie l'augmentation de m rejette les premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées, facilitant ainsi le filtrage. Cependant m est limitée par les temps de commutation des interrupteurs et donc par la largeur minimale des impulsions. Si m est assez grand ($m > 6$), la valeur efficace V_1 du fondamental de la tension d'entrée du redresseur V_a est pratiquement égale à l'onde de référence pour $r = 1$

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} r \frac{u_c}{2} \quad (\text{III.21})$$

Donc par action sur r on peut théoriquement accroître l'amplitude du fondamental de 0 jusqu'au maximum. Les tensions de référence du redresseur triphasé permettant de générer un système de tension triphasé équilibré direct ou inverse sont :

$$\begin{cases} V_{ref1} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{ref2} = V_m \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ V_{ref3} = V_m \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{III.22})$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous introduisons les mécanismes de contrôle du filtre actif parallèle et pour la détermination des courants harmoniques, nous reprenons les différentes méthodes les plus couramment utilisées. Nous avons également étudié trois types de commande pour le contrôle du courant du filtre actif, à savoir : la commande par hystérésis, la commande par modulation de largeur d'impulsion ou MLI et en fin la commande vectorielle MLI. Dans le chapitre suivant nous validerons l'étude théorique présentée par simulation numérique procurèrent.

Chapitre IV :

Résultats de simulation

IV.1. Introduction :

Après avoir étudié dans le chapitre précédent les stratégies de contrôle du filtrage actif parallèle dans le chapitre ci-dessus

Dans ce chapitre, nous allons présenter des simulations sous MATLAB pour notre modèle d'étude, dans le but d'assurer la compensation des courants harmoniques.

IV.2. Résultat de simulation et analyse :

IV.2.1. Résultats de simulation sans compensation :

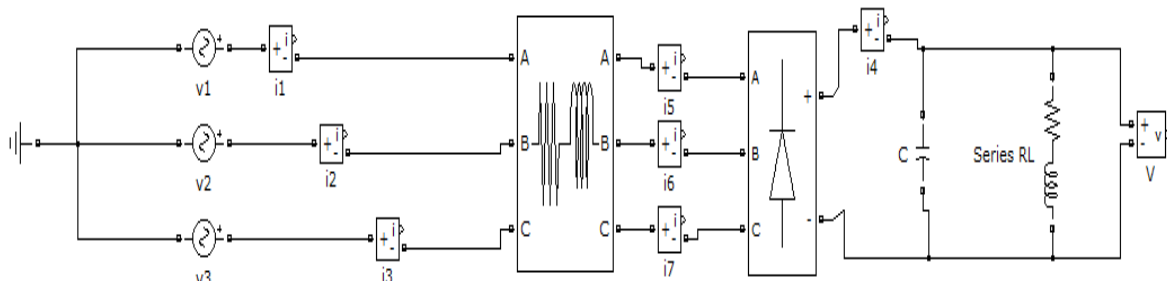


Fig. IV.1 : Schéma de simulation du circuit étudié

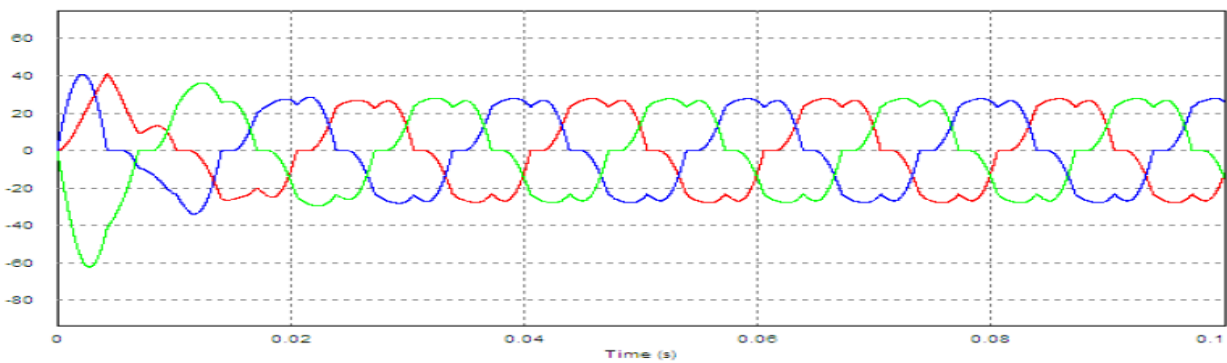


Fig. IV.2 : Forme d'ondes du courant de source

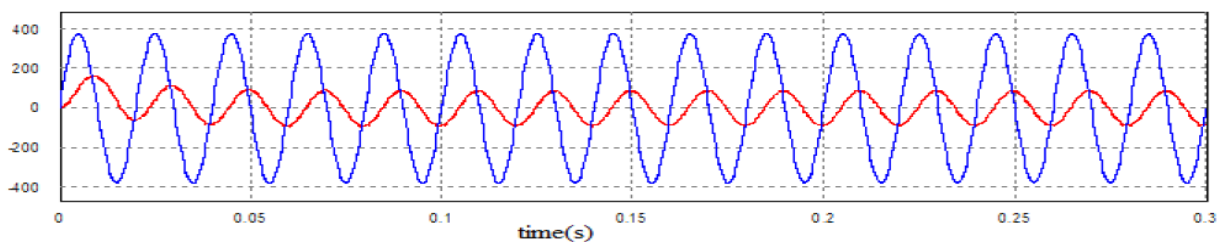


Fig. IV.3 : Allure du courant Ia et la tension Vsa de la source

La figure (IV.2) : montre la forme actuelle de la source. Comme on peut le voir, la source de courant est particulièrement riche en harmoniques système ; Ainsi, le filtre actif doit être connecté au réseau pour l'éliminer, et pour améliorer le THD de ce signal.

La figure (IV.3) : représente le courant et la tension de la source. On remarque que la tension n'est pas en phase avec le courant ce qui entraîne une consommation de l'énergie réactive et une dégradation du facteur de puissance.

IV.2.2. Résultats de simulation compensation :

➤ Régulation de courant par MLI sinus –triangulaire.

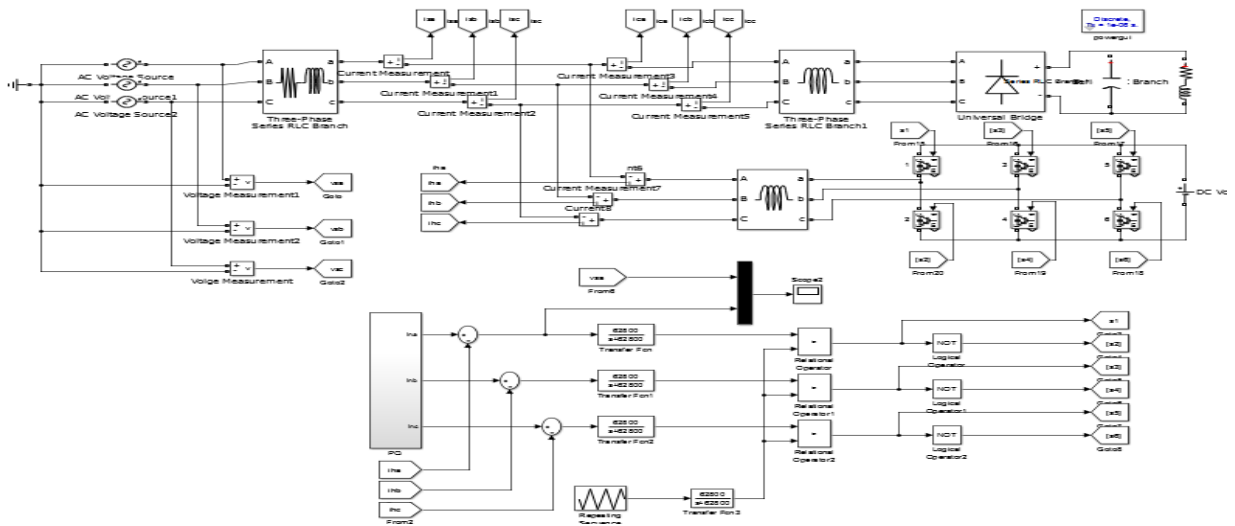


Fig. IV.4 : Schéma bloc du filtre actif parallèle commande par MLI sinus triangulaire

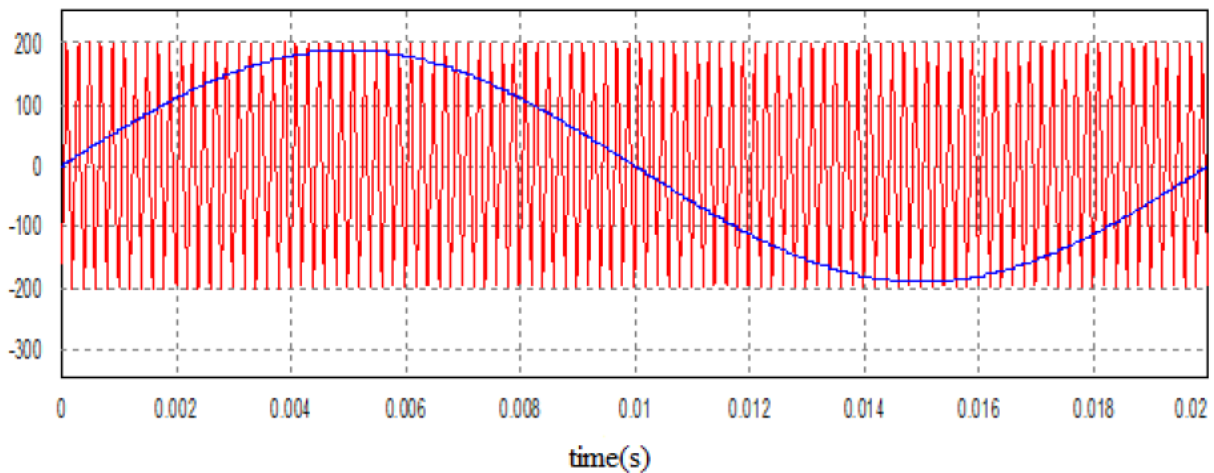


Fig. IV.5 : Allure de la tension de référence et de la porteuse. ($V_{porteuse}$, $V_{référence}$.)

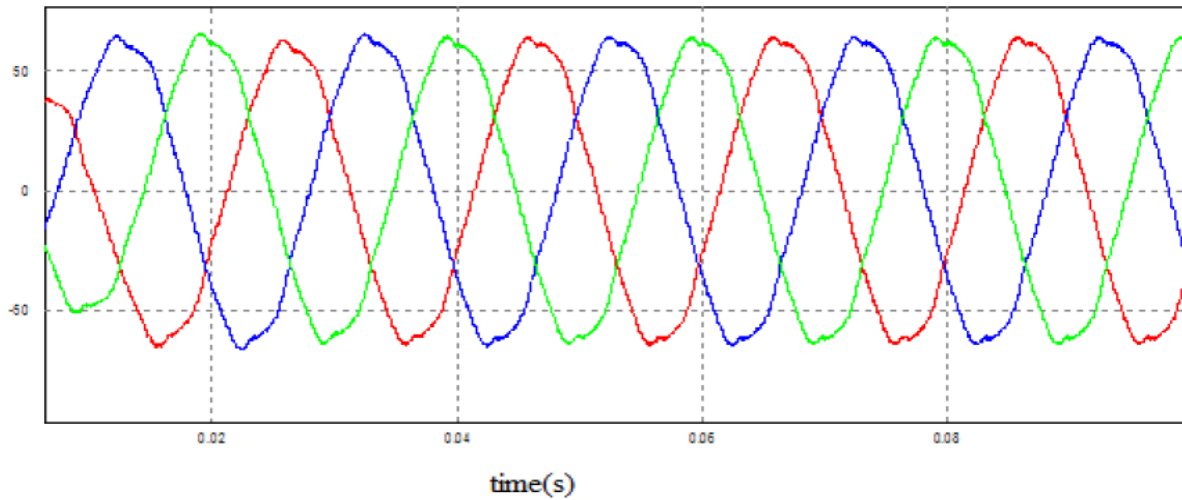


Fig. IV.6 : Allures des courants de la source après compensation.

La figure IV.6 : représente les allures des courants de la source dans le cas où l'onduleur est commandé par MLI sinus-triangulaire. On constate que la forme est sinusoidale, ce qui minimise les harmoniques.

IV.2.2.1. Structure générale du filtre actif parallèle (Matlab) :

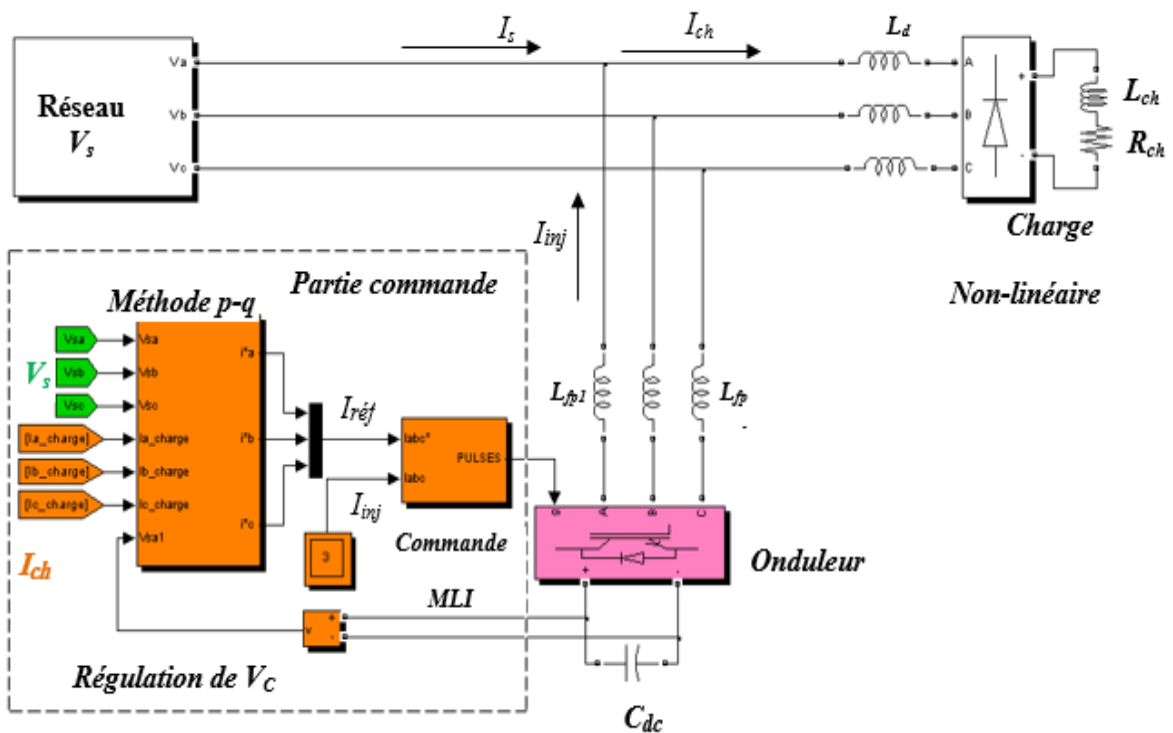


Fig. IV.7 : Structure générale du filtre actif parallèle étudié

Réseau électrique	
$S_{cc} / S_{ch} = 3000$	
Charges perturbatrices	
Charge non linéaire	80 kVA
L_d	0,1 mH
Filtre actif parallèle	
V_c	850V
C_{dc}	4.4mF
L_{fp}	1mH
Technique de commande de l'onduleur	Commande par MLI
Méthode d'identification des courants perturbés	Méthode p-q

Tableau (IV.1) : Valeurs des éléments construisant la structure du FAP étudiée

Tableau Compensation des courants harmoniques

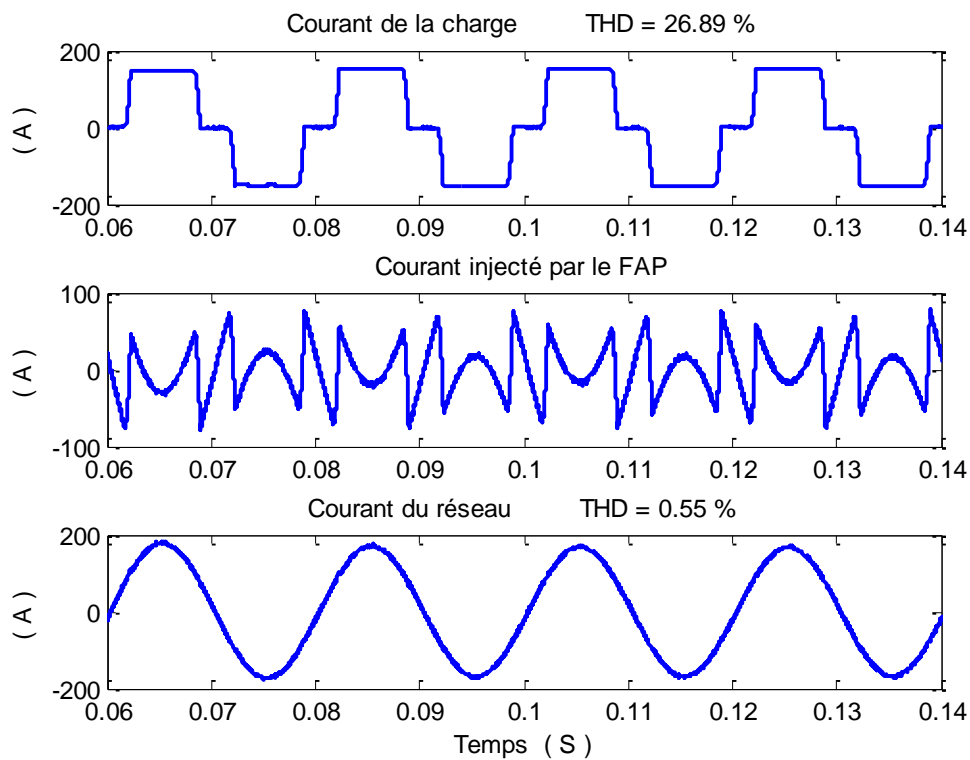


Fig. IV.8 : Compensation des courants harmoniques

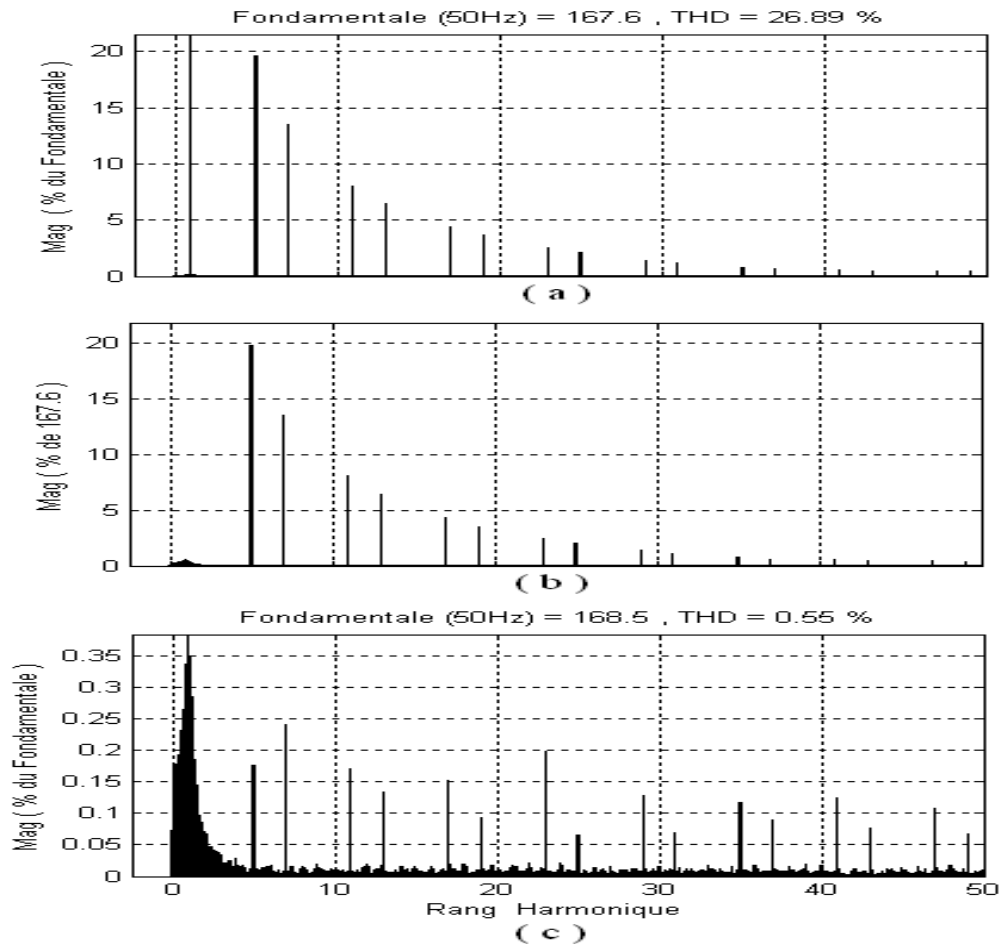


Fig. IV.9 : Décomposition spectrale, (a) Courant de la charge, (b) Courant injecté par le FAP (c) courant du réseau

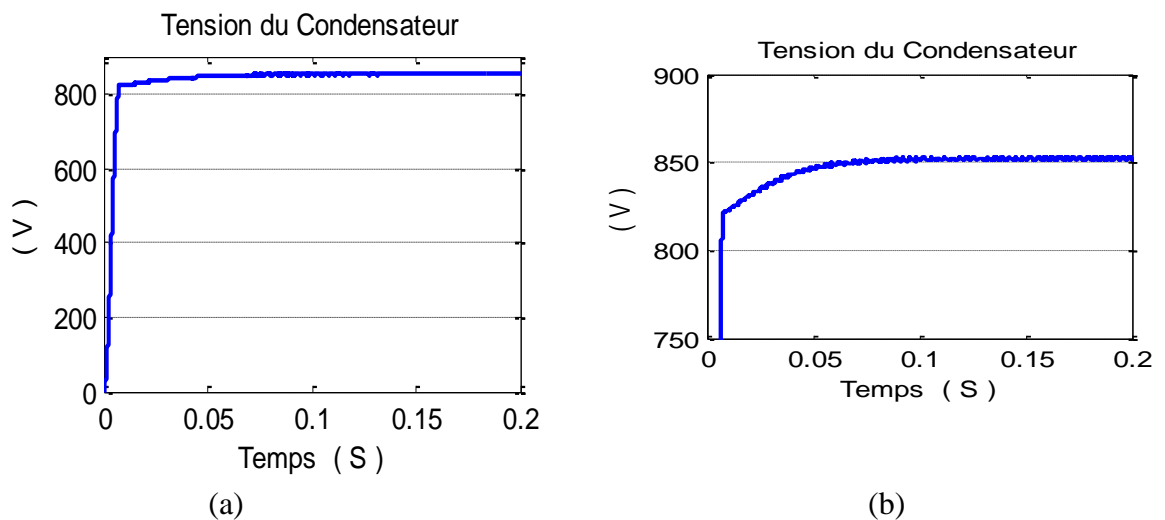


Fig. IV.10 : Régulation de la tension du condensateur du FAP

- (a) Tension aux bornes du condensateur
- (b) Zoom de la tension aux bornes du condensateu

IV.2.2.2. Interprétation des résultats :

Le graphique. (IV.8) présente un examen temporel de la phase (a) du courant de charge (I_{ch}), des courants injectés par FAP (I_{inj}) et du courant de réseau après filtrage (i_s). On peut voir clairement que La forme du courant du réseau après filtrage est quasi sinusoïdale et l'analyse

La figure (IV.9) présente la spectroscopie. donne un THD de 0.55 % ce qui est selon la norme IEEE 519-1992 est très satisfaisant donc on peut conclure que le FAP est très efficace pour le filtrage des harmoniques.

La régulation de la tension du condensateur DPF est illustrée à la Fig. (IV.10). Nous pouvons affirmer que nous avons une bonne régulation puisque la boucle de régulation de la tension continue a une réaction rapide, pas de dépassement ou d'oscillations, et presque pas d'erreur statique.

IV.3. Amélioration du facteur de puissance :

La fonction principale du MLI est de rediriger les harmoniques vers des fréquences plus élevées, permettant un filtrage plus facile. De plus, en contrôlant l'amplitude et la phase du courant fondamental, elle permet d'améliorer le facteur de puissance.

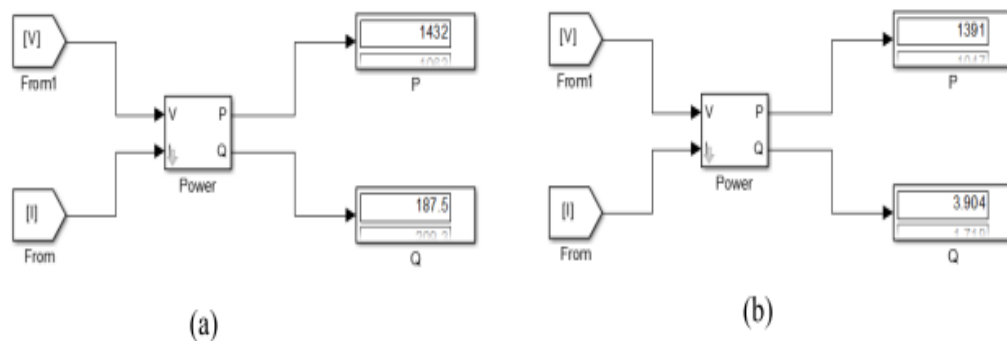


Fig. IV.11 : (a) mesure des puissances avant filtrage.

(b) mesure des puissances après filtrage.

La figure (IV.11) montre la puissance active et réactive prise avant et après Compensation du filtre actif parallèle, où nous notons que la puissance réactive est élevée 187,5VAR (A), et nous remarquons qu'après avoir activé le filtre, elle a diminué à 3,904 VAR, tandis que la puissance active est restée presque constante, ce qui indique que le filtre compensera seulement les courants harmoniques.

- **Facteur de puissance**

	Avant filtrage	Après filtrage
$\cos(\varphi)$	0.85	0.95

Tableau (IV.2) : Comparaison du facteur de puissance entre avant et après filtration

Avec :

$$\tan(\varphi) = \frac{Q}{P}$$

D'après le tableau, nous remarquons une amélioration du facteur de puissance après l'installation du filtre actif parallèle, Donc en régime non sinusoïdal, les harmoniques créent une puissance déformante qui diminue le facteur de puissance. Tandis que, en régime sinusoïdal équilibré, la puissance déformante est nulle.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié le filtre actif parallèle en termes de réduction des harmoniques dans le réseau électrique, à cet effet la méthode des courants a été utilisée pour déterminer les courants harmoniques et en ajoutant le régulateur de courant, le THD est meilleur car il réduit les perturbations causées par commutateurs de commutation

Les résultats de la simulation ont montré les performances acceptables en termes de réduction des harmoniques pour cette méthode ainsi que sa simplicité.

Conclusion Générale :

Ce travail s'inscrit dans les études menées sur la commande des dispositifs d'électronique de puissance pour l'amélioration de la qualité de l'énergie, et pour la minimisation de la perturbation harmonique des réseaux électriques. Il a été consacré à l'étude et la simulation d'un filtre actif parallèle pour la compensation et de rééquilibrage dynamique de la tension d'un réseau triphasé. Nous avons structuré le contenu de notre travail en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différentes de la qualité de l'énergie, et après l'analyse des perturbations harmoniques et leurs effets sur le réseau électrique, on a présenté les solutions traditionnelles pour les réduire, notamment le filtrage passif. Le filtrage actif est une nouvelle solution pour la dépollution harmonique. Un filtre actif peut être connecté sur le réseau en série ou en parallèle et avoir deux structures électrotechniques différentes ; tension ou courant. En raison de la simplicité de sa commande.

Dans le deuxième chapitre, on a étudié et modélisation le filtre actif qui a déjà fait l'objet de plusieurs publications montrant sa capacité et sa performance dans le domaine de la compensation des courants harmonique. Après une présentation détaillée de la conception du filtre parallèle à structure tension et c'est la raison principale pour laquelle on a retenu cette structure.

Ensuite, La troisième chapitre a été consacré à l'étude de la méthode de commande qui consiste d'abord en l'identification des courants harmoniques génèrent par la charge non linéaire. Et utilise le technique MLI pour la commande l'onduleur.

Dans le quatrième chapitre nous avons étudié le filtre actif shunt ou la méthode des courants sont utilisées pour identifier les courants perturbateurs. Nous avons présenté les résultats de simulation utilise les méthodes PI, et qui montrent l'aptitude de notre filtre à améliorer le THD qui fut dégradé à cause des courants harmoniques engendrés par la charge non linéaire.

En fin, il serait intéressant de reprendre le travail en vue de son amélioration par l'emploi d'autres techniques d'identification et de commande du filtre et de comparer les différentes méthodes.

Bibliographie

- [1] : Mohamad Alaï Eddine Allai" Contribution à l'Etude des Compensateurs Actifs des Réseaux Electriques Basse Tension " thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 12 Septembre 2002.
- [2] : H. Kouara, "Contribution au contrôle d'un filtre actif parallèle triphasé à quatre fils dans un milieu perturbé," Thèse de Doctorat en Électrotechnique" Université de Batna, Algérie, 2015
- [3] : <http://blog.formatis.pro/map607> « Formation, MAP607 », consulté le 23-02-2019
- [4] : VanyaIgnatova, « Méthodes D'analyse De La Qualité De L'énergie Électrique Application Aux Creux De Tension Et À La Pollution Harmonique », thèse de doctorat Université Joseph Fourier, France, 20 Octobre 2006.
- [5] : Boussaid, A., & Khezzar, A. (2017). Filtrage actif des harmoniques dans les réseaux électriques. Contribution à l'amélioration de l'énergie électrique (Doctoral dissertation).
- [6] : 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 haut alsace, 2005.
- [7] : OMEIRI AMAR 'Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de courant' diplôme de DOCTORAT D'ETAT ; UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA ANNEE 2007.
- [8] : Thèse de Doctorat LMD en : Génie Electrique Spécialité (Option) : Commande des Systèmes Energétiques Intitulé Contribution à la Commande Directe de Puissance Dédiée au Filtrage Actif,2010 Associé à une Source Photovoltaïque Présentée par : Sabir OUCHEN Université Mohamed Khi de Biskra Faculté des Sciences et de la technologie Département : Génie électrique.
- [9] : Friekh Abdelaziz "Filtrage Actif des harmoniques dans un réseau de transport de l'énergie électrique" Mémoire Master UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA ,2019
- [10] : Chaouia Abdelmadjid « Filtrage Actif Triphasé Pour Charge Non Linéaires » Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Université De Ferhat ABBAS De Sétif, Algérie, Octobre 2010
- [11] : FRIEKH Abdelaziz : " Filtrage Actif des harmoniques dans un réseau de transport de l'énergie électrique", thèse de Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, Electronique, 2019

Bibliographie

- [12] : V. Ignatova : "Méthodes d'analyse de la Qualité de L'énergie Électrique-Application aux Creux de Tension et à la Pollution Harmonique", Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, 2006.
- [13] : S. Karimi : " Continuité de Service des Convertisseurs Triphasés de Puissance et Prototypage « FPGA in the Loop » : Application au Filtre Actif Parallèle ", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2009.
- [14] : L. Banchait, S. Saadate et A. Salem Nia, « A comparaison of voltage source and curent Source shunt active filtre by simulation and expérimentation », IEEE trans. Power System., Vol. 14, pp. 642-647, Mai 1999.
- [15] : J. Xu, « Filtrage actif parallèle des harmoniques des réseaux de distribution D'électricité ». Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lauriane, 1994.
- [16] : S. Mouttou, « Nouvelles approches de commande d'un filtre actif parallèle à source de courant », Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Octobre 2002.
- [17] : H.L Yunus, R.M. Bass, « Comparison of VSI and CSI topologies for single-phase Active power filters », Proc. 1996 27th Annula IEEE Power Electronics Spécialistes Conférence., Vol. 2, pp. 1892-1898,1996.
- [18] : Jiangyuan Le, Yunxiang Xie, Zahi Zhang, Lin Cheng : "A Nonlinear Control Stratégie for Shunt Active Power Filtre", IEEE, 2009.
- [19] : F. Defaÿ : "Commande Prédicitive Directe d'un Convertisseur Multicellulaire Triphasé pour Une Application de Filtrage Actif ", Thèse de Doctorat, l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Université de Toulouse, 2008.
- [20] : A. S. Toledo : "Commande Directe et Observation des Convertisseurs de Puissance Application à l'Onduleur de Tension Triphasé", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 28 novembre 2000.
- [21] : C. Lott, O. Lapierre, H. Pouliquen et S. Sadate : " Filtrage actif des harmoniques En courant et en tension des réseaux électriques : modélisation, simulation numérique et expérimentation ", J. Phys III France 7 (1997) 2433-2457

Bibliographie

- [22] : A. Chaoui : " Filtrage Actif Triphasé pour Charges non Linéaires", Thèse de Doctorat Université de Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [23] : Salim : "Étude, Modélisation et Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle", Thèse de Doctorat en sciences, Université Mohamed Khi der-Biskra, 2013.
- [24] : A. L. D. H. Bermeo : "Commandes Avancées des Systèmes Dédiés à l'Amélioration De la Qualité de l'énergie : de la Basse Tension à la Montée en Tension ", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.
- [25] : S. R. D. Naoussi : " Implantation de Réseaux Neuromimétriques Sur Cible FPGA- Application à L'intégration d'un Système de Filtrage Actif ", Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg, 2011.
- [26] : D. O. Abdeslam : "Techniques Neuromimétiques pour la Commande dans les Systèmes Électriques - Application au Filtrage Actif Parallèle dans les Réseaux Électriques Basse Tension", Thèse de Doctorat, Université de Haute-Alsace, 2005.
- [27] : M. A. E. Alali, " Contribution à l'Étude des Compensateurs Actifs des Réseaux Électriques Basse Tension", Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 2002.
- [28] : Moleykutty G. and K. P. Basu: " Modeling and Control of There-Phase Shunt Active Power Filtre", American Journal of App lied Sciences 5 (8): 1064-1070, 2008.
- [29] : J. Afonso, C. Couton, J. Martins: " Active Filtres with Control Based on the P-Q Theory IEEE Industrialo Electronics Society Newsletter, vol. 47, n° 3, Sept. 2000, ISSN: 0746-1240, pp. 5-10.
- [30] : E. H. Watanabe, H. Akagi, M. Arides: "The P-Q Theory for Active Filtre Control: Somme Problèmes and Solutions ", Journal of control and automation/Vol.15 no.1/Jan., Fév. e Marco 2004.
- [31] : J. Schonek : "Les singularités de l'harmonique 3", Cahier technique n° 202, Collection Technique de Schneider Electric, Edition 2000.
- [32] : H. Akagi, Fellow, IEEE : "New Trends in Active Filtres for Power Conditionna", IEEE Transactions on Industrie Applications, Vol 32, No 6, Novembre/Décembre 1996.

- [33] : Rejil C, Anzari M and Arun Kumar R: "Design and Simulation of Three Phase Shunt Active Power Filter Using SRF Theory ", Advance in Electronica and Electric Engineering. ISSN 2231-1297, Volume 3, Numbers 6 (2013), pp. 651-660.
- [34] : A. Chaoui, J. P. Gaubert, F. Krim, L. Rabaul: "Three-phase shunt Active power filter for power improvement quality ", IEEE Industrial Electronics Conference IECON 2006, Paper 348043, pp. 2384-2389.
- [35] : S.K. Jain, P. Agrawal and H.O. Gupta: "Fuzzy Logic Controlled Shunt Active Power Filter for Power Quality Improvement ", IEEE Proceedings on Electric Power Application Vol.149, No.5, pp.317-328, Sep. 2002.
- [36] : G. Bhatewara, S. Mittal: "Shunt Active Filter Algorithms for a Three Phase System International Journal of Science and Research (IJSR), Volume 3 Issue 9, September 2014.
- [37] : A. Hamadi : " Contribution à L'étude des Filtrés Hybrides de Puissance Utilisés pour Améliorer la Qualité de L'énergie dans le Réseau Électrique de Distribution ", Thèse de Doctorat, École de Technologie Supérieure, Montréal, Université du Québec, 2010.
- [38] : B. Nouri : "Fonctionnement à Fréquence de Commutation Constante des Convertisseurs de Puissance en Utilisant des Techniques de Commande Avancées Application : Amélioration de la Qualité de l'Énergie", Thèse de Doctorat, Université de Ferhat Abbas de Sétif, 2011.
- [39] : S. Swan: "Simulation and Experimental Realization of Adaptive Controller for Shunt Active Power Filter to Improve power Quality", Master of Technology (Research) in Electric Engineering, Département of Electric Engineering National Institute of Technology, Rourkela, ORISSA, INDIA June 2014.
- [40] : B. N. Singh : " Lidingö Mode Control Technique for Indirect Current Controller Active Filter", IEEE, 2003.
- [41] : M. M. Abdusalam : "Structures et Stratégies de Commande des Filtrés Actifs parallèles et Hybrides Avec Validations Expérimentales", Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy - I, 2008.

Bibliographie

- [42] : Omeiri Amar « Simulation d'un filtre actif parallèle de puissance pour la compensation des harmoniques de Courant », Thèse de Doctorat d'Etat, Université Badji Mokhtar d'Annaba, 2007.
- [43] : Mohamed Meftah Abdousslam, « Structures et stratégies de commande des filtres actifs parallèle et hybride avec validations expérimentales ».de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I.2008.
- [44] : Magraoui Mohamed, « Validation De Techniques De Commande D'un filtre Actif Parallèle », Mémoire pour l'obtention de la maîtrise en génie électrique, École de Technologie Supérieure Université du Québec, Montréal, le 17 septembre 2007.
- [45] : CEI 61000-2-2 Compatibilité électromagnétique (CEM) - Partie 2-2 : Environnement - Niveaux de compatibilité pour les perturbations conduites à basse fréquence et la transmission des signaux sur les réseaux publics d'alimentation basse tension. Deuxième édition 2002-03.
- [46] : Elferd Hamza et Zegaar Mourad, « Fonctionnement En Mode Dégrade D'un Onduleur Multi Niveaux Application Au Filtre Actif Parallèle », Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 2016 /2017.
- [47] : Ghadbane Ismail, 'Commande d'un Filtre Actif Triphasé Parallèle Par Différents Régulateurs ', Mémoire de Magistère, Université Mohamed KH eider - Biskra, 24 /02/2011.
- [48] : <http://www.ferdinandpiette.com/blog/2011/08/implementer-un-pid-sans-faire-de-calculs/>, Consulté le 28/05/2019.
- [49] : MOHAMMED Alaa, "Contribution A l'Etude Des Compensateurs Actifs Des Réseaux Electriques Basse Tension", Thèse Doctorat, L'université Louis Pasteur –Strasbourg, 2002.
- [50] : A. Med elhadi "Étude comparative de différente méthode de compensation actif D'énergie électrique" mémoire d'ingénierie université M'sila 2012 / 2013.