

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Master

Filière Électrotechnique
Spécialité Machines Électriques

présenté par

KHETTAB Soufian

&

BENDOUMIA Mustapha

Comparaison des Méthodes de Filtrage Actif de Courant dans les Réseaux Electriques.

Proposé par : AKHRIB Djamel & BELAZZOUG Messaoud

Année Universitaire 2018-2019

Remerciements

Nous remercions tout d'abord dieu de nous avoir accordé la force, la patience et le courage d'achever ce travail.

*Nous tenons à remercier très particulièrement notre promoteur M' **AKHRIB Djamel** et notre Co-promoteur M' **BELAZZOUG Messaoud** pour leur assistance, leurs orientation et observations ainsi que leur apport scientifique très précieux pour notre travail.*

*Nous remercions la société **MEI Sonalgaz**, et tout son personnel, pour nous avoir permis de réaliser une partie de ce travail, ainsi que pour leur bienveillance, leur bonne humeur et pour le soutien qu'ils nous ont apporté . En particulier : M' **BARKI Fethi** et M' **DJELAL Sadek**.*

*Nous adressons également notre gratitude au personnel de la société **MTE** pour leurs soutiens. En particulier M' **YAHIAOUI Abdelkader***

Le travail que nous avons élaboré est le fruit résultant des efforts et des cours que tous nos professeurs nous ont apporté tout au long de notre cursus scolaire.

Ainsi nous remercions l'ensemble de nos professeurs.

Nous remercions également les membres du jury pour leur intérêt à notre travail ainsi qu'à leurs observations et leurs questions qui seront très utiles à la mise en application de notre travail.

Avant de terminer, nous tenons à remercier avec cœur, nous parents. Ils ont su nous donner toutes les chances pour réussir. On les remercier pour leurs prières, leurs encouragements sans cesse ainsi que leur soutien moral et financier.

Merci à tous

DÉDICACE

Je dédie ce modeste travail.

A mes parents.

A mes frères et mes sœurs.

Vous vous êtes dépensés pour moi sans compter.

En reconnaissance de tous les sacrifices consentis par tous et chacun pour me permettre d'atteindre cette étape de ma vie.

Avec toute ma tendresse.

A tout ma famille.

A mes cousins et cousines.

Vous avez de près ou de loin contribué à ma formation.

Affectueuse reconnaissance.

Vous avez contribué en fonction de vos moyens à affermir ma formation.

Sincère gratitude.

A tous mes camarades du groupe « électrotechnique » de la faculté des sciences et de la technologie de l'université

SAAD DAHLAB de BLIDA.

SOUFIAN

DÉDICACE

Je dédie mon travail à la mémoire de mon père qui est l'origine de tous mes succès. J'espère que, mon travail soit le fruit de son investissement comme il l'a toujours décrit. J'aurais bien aimé qu'il soit parmi nous. Que Dieu Le Tout-Puissant lui accorde sa Miséricorde

A la plus chère personne du monde qui m'a toujours soutenue et a prié pour ma réussite, ma chère maman.

A mon frère Youcef pour son encouragement et son Assistance.

A ma sœur Meriem qui ma aider et soutenu pour la réalisation de ce travail

Je le dédie également à mes amies de l'université SAAD DAHLAB de BLIDA.

Et à tous mes collègues de la promo « Machines électriques 2019 ».

MUSTAPHA

ملخص: يعد الاستخدام المتزايد للإلكترونيات الطاقة في الصناعة عاملاً رئيسياً في زيادة مستويات التوافقيات الموجودة في شبكات توزيع الطاقة. حيث تؤثر هذه التوافقيات التيار أو الجهد على المعدات المتصلة بالشبكة (المحولات والمحركات والمعدات الصناعية)، سواء من حيث التشغيل أو التعتيق. بدأ من المثير للاهتمام اقتراح حماية فعالة لمكافحة هذا التلوث من خلال التركيز بشكل خاص على محولات التوزيع. يتمحور هذا العمل المقدم في هذه الأطروحة حول دراسة وتطوير طريقة فعالة لتخليص الشبكات الكهربائية باستخدام المرشح النشط الموازي **FAP**.

كلمات المفاتيح: المرشح النشط الموازي, محول, مرشح متعدد المتغيرات, نسبة تشوه التوافقيات.

Résumé : L'utilisation croissante de l'électronique de puissance dans l'industrie contribue fortement à l'augmentation des taux d'harmoniques présents sur les réseaux de distribution électrique. Ces harmoniques de courant ou de tension vont venir impacter les matériels connectés au réseau (transformateur, moteur et équipement industriel), que ce soit en termes de fonctionnement ou de vieillissement. Il semblait intéressant de proposer une protection efficace pour lutter contre cette pollution en focalisant plus particulièrement sur les transformateurs de distribution. Le travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude et le développement d'une méthode efficaces de dépollution des réseaux électriques à l'aide du filtre actif parallèle FAP.

Mots clés : Filtre actif parallèle, transformateur, FMV (filtre multi variable), taux de distorsion harmonique-THD.

Abstract: The increasing use of power electronics in the industry is a major contributor to the increase in harmonic levels present in power distribution networks. These current or voltage harmonics will affect the equipment connected to the network (transformer, motor and industrial equipment), whether in terms of operation or ageing. It seemed interesting to propose an effective protection to fight against this pollution by focusing more particularly on the distribution transformers. The work presented in this thesis consists in the study and the development of an effective method of depollution of electrical networks using the parallel active filter FAP.

Keywords : Filter Active Parallel (FAP), transformer, FMV (Filter Multi-Variable), Total harmonic distortion (THD).

Listes des acronymes et abréviations

PLL: (En anglais: Phase locked loop).

THD: (En anglais: Total harmonic distortion).

IGBT: (En anglais: Insolated gate bipolar transistor).

NPC: Neutral Point Clamping (point neutre des sources continues M)

MLI: Modulation de largeurs d'impulsions.

UPQC: (En anglais : Unified power quality conditioner).

FPB: Filtre passe-bas.

FMV: Filtre multi-variable.

FAP: Filtre actif parallèle.

FAS: Filtre actif série.

THD : Taux de Distorsion Harmonique

TDD : Taux distorsion totale de la demande

i_{ca}, i_{cb}, i_{cc} : Courant de la charge

v_{sa}, v_{sb}, v_{sc} : Tension de la source

$v_{\alpha,\beta}$: Tension dans le repère α - β (v)

$i_{\alpha,\beta}$: Courant dans le repère α - β (A)

Vdc : tension continu de l'onduleur (V)

P : Puissance active instantané (W)

q : Puissance réactive instantané (VAR)

\bar{p} : Puissance continue liée à la composante fondamentale active du courant (W)

\bar{q} : Puissance continue liée à la composante fondamentale réactive du courant (VAR)

\tilde{p} et \tilde{q} : Puissance alternatives liées à la somme des composantes harmoniques du courant

$\tilde{i}_{\alpha,\beta}$: Les courants de référence harmoniques dans le repère α - β (A)

$i_{aref}, i_{bref}, i_{cref}$: Les courants de référence harmoniques

i_h injecté : Courant généré par le filtre actif

i_s : Courant de source

K : constante du FMV

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I : LA POLLUTION HARMONIQUE ET SON IMPACT

1. INTRODUCTION	3
2. PERTURBATIONS ELECTRIQUES	3
2.1. CREUX ET COUPURES DE TENSION.....	4
2.2. FLUCTUATIONS DE TENSION	4
2.3. DESEQUILIBRE DU SYSTEME TRIPHASE DE TENSION	5
2.4. VARIATION DE FREQUENCE	6
3. LA POLLUTION HARMONIQUE.....	6
3.1. DEFINITION	6
3.2. NORMES STANDARDS.....	7
3.3. CARACTERISTIQUES D'UN SIGNAL.....	8
3.3.1. Rang d'une harmonique	9
3.3.2. Représentation spectrale.....	9
3.3.3. Décomposition d'un signal en série de FOURIER :.....	9
3.3.4. Distorsion harmonique	10
4. NOTION DE CHARGE	11
5. HARMONIQUES DE COURANT ET DE TENSION.....	11
5.1. Harmonique de courant.....	11
5.2. Harmonique de tension	12
6. ORIGINES DE LA POLLUTION HARMONIQUE	12
7. L'IMPACT DUE AUX HARMONIQUES.....	13
7.1. Moteurs à induction	13
a. Perturbations mécaniques	13
b. Influence sur les pertes	13
c. Augmentation de la température de fonctionnement	13
d. Réduction de la durée de vie.....	14

e. Généralité.....	15
7.2. L'impact sur les différents matériels électriques.....	15
a. Relais de commande statique.....	15
b. Banc de capacités	15
c. Protections électriques.....	15
7.3. Transformateurs.....	17
a. Influence sur les pertes du transformateur.....	17
b. Augmentation de la température de fonctionnement	20
c. Réduction de la durée de vie.....	20
d. Conclusion	22
CONCLUSION	23

CHAPITRE II : LES FILTRES ANTI-HARMONIQUES

1. INTRODUCTION	25
2. LES FILTRES ANTI-HARMONIQUES.....	25
2.1. FILTRE PASSIF	25
2.1.1. Filtre résonant.....	26
2.1.2. Filtre amorti.....	26
2.2. FILTRE ACTIF.....	27
2.2.1. Filtre actif parallèle.....	28
2.2.2. Filtre actif série.....	28
2.2.3. Combinaison parallèle-série de filtres actifs	29
2.3. FILTRE HYBRIDE	30
2.3.1. Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif parallèle	31
2.3.2. Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif série	31
2.3.3. Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle.....	32
2.3.4. Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle.....	32
3. LE FILTRE ACTIF PARALLELE(FAP)	33
3.1. DEFINITION	33
3.2. TYPE DU FILTRE ACTIF PARALLELE.....	33
3.2.1. Filtre actif parallèle à trois niveaux à structure NPC.....	33

3.2. 2. Filtre actif parallèle à cinq niveaux à structure NPC	35
4. IDENTIFICATION DES HARMONIQUES DE COURANTS DE REFERENCE ..	36
4.1. DEFINITION	36
4.2. METHODES D'IDENTIFICATION DES HARMONIQUES DE COURANTS DE REFERENCE ...	37
4.2.1. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées	37
a. Commande à l'aide de FPB	37
b. Commande à l'aide de FMV	39
4.2.2 METHODE DU REFERENTIEL SYNCHROME (PLL).....	43
5. COMMANDE DE L'ONDULEUR.....	45
a. Commande par MLI	45
b. Commande par hystérésis	46
CONCLUSION.....	47

CHAPITRE III : SIMULATION ET INTERPRETATION

1. INTRODUCTION	48
2. PARAMETRE DE SIMULATION.....	49
3. PARAMETRE FILTRE ACTIF PARALLELE.....	49
4. SIMULATION CHARGE R-L & R-C NIVEAUX TROIS.....	50
4.1. CHARGE R-L.....	50
4.1.1. Simulation de la charge R-L séries polluante avant filtrage	50
4.1.2. Simulation de la charge R-L séries polluante après filtrage.....	52
a. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FPB ..	52
b. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV	53
c. Méthode du référentiel synchrone (PLL)	54
4.2. CHARGE R-C.....	55
4.2.1. Simulation de la charge R-C parallèle polluante avant filtrage.....	55
4.2.2. Simulation de la charge R-C parallèle polluante après filtrage	56
a. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FPB ..	57
b. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV	58
c. Méthode du référentiel synchrone (PLL)	59

4.3. COMPARAISON ET DISCUSSION.....	60
5. SIMULATION CHARGE R-L & R-C NIVEAUX CINQ.....	62
5.1. SIMULATION DE LA CHARGE R-L SERIES POLLUANTE APRES FILTRAGE.....	62
a. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV	63
5.2. SIMULATION DE LA CHARGE R-C PARALLELE POLLUANTE APRES FILTRAGE.....	64
a. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV	65
5.3. COMPARAISON ET DISCUSSION.....	66
6. ALGORITHME DE COMMANDE BASE SUR LES PUISSANCES	
INSTANTANEEES A L'AIDE DE FMV MODIFIEE	66
6.1. SIMULATION CHARGE R-L & R-C NIVEAUX TROIS.	67
6.1.1. Simulation de la charge R-L séries polluante après filtrage.....	67
6.1.2. Simulation de la charge R-C parallèle polluante après filtrage.....	68
6.2. COMPARAISON ET DISCUSSION.....	69
CONCLUSION.....	70
CONCLUSION GENERALE.....	71
ANNEXE.....	73
Bibliographie.....	101

Liste des Figures

Figure I. 1. Creux et coupures de tension.....	4
Figure I. 2. Fluctuations de tension.....	5
Figure I. 3. Déséquilibre du système triphasé de tension.....	5
Figure I. 4. Variation de fréquence.....	6
Figure I. 5. Représentation de l'effet d'un harmonique.....	7
Figure I. 6. Décomposition spectrale d'un signal $S(t)$ en fréquence.....	9
Figure I. 7. (a) charge linéaire.....	11
Figure I. 8. Exemple de courant harmonique consommé par une charge non linéaire (R-C).....	12
Figure I. 9. Courbes de durée de vie en fonction de la température de fonctionnement.....	14
Figure I. 10. Circuit magnétique d'un wattmètre à induction.....	17
Figure I. 11. Diagramme des pertes d'un transformateur.....	17
Figure I. 12. Température de l'huile et du point chaud du transformateur.....	20
Figure II. 1. Filtre passif résonant.....	26
Figure II. 2. Filtre passif amorti.....	27
Figure II. 3. Filtre actif parallèle.....	28
Figure II. 4. Filtre actif série.....	29
Figure II. 5. Combinaison parallèle-série de filtres actifs.....	29
Figure II. 6. Classification des filtres hybrides.....	30
Figure II. 7. Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle.....	31
Figure II. 8. Filtre actif parallèle avec filtre passif série.....	31
Figure II. 9. Filtre actif série avec filtre passif parallèle.....	32
Figure II. 10. Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle.....	32
Figure II. 11. Principe de FAP.....	33
Figure II. 12. Filtre actif parallèle à trois niveaux à structure de tension.....	34
Figure II. 13. Filtre actif parallèle à cinq niveaux à structure de tension.....	35
Figure II. 14. Filtrage de la composante de la puissance continue.....	38
Figure II. 15. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FPB dans Matlab / Simulink.....	39
Figure II. 16. Diagramme de Bode d'un FMV.....	41
Figure II. 17. Schéma de circuit du FMV.....	41

Figure II. 18. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV dans Matlab / Simulink.	42
Figure II. 19. Méthode du référentiel synchrone à l'aide de FMV dans Matlab / Simulink.	44
Figure II. 20. Principe de commande par MLI.	45
Figure II. 21. Principe de la commande du courant par hystérésis.	46
Figure III. 1. La charge R-L série polluante avant filtrage.	50
Figure III. 2. Courants de source (i_h) et son spectre harmonique avant compensation.	51
Figure III. 3. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique avant compensation.	51
Figure III. 4. Modèle du filtre actif parallèle à trois niveaux avec la charge polluante R-L séries.	52
Figure III. 5. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h	52
Figure III. 6. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.	53
Figure III. 7. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.	53
Figure III. 8. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecté par le filtre i_h	53
Figure III. 9. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.	54
Figure III. 10. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.	54
Figure III. 11. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h	54
Figure III. 12. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.	55
Figure III. 13. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.	55
Figure III. 14. La charge R-C parallèle polluante avant filtrage.	55
Figure III. 15. Courants de source (i_h) et son spectre harmonique avant compensation.	56
Figure III. 16. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique avant compensation.	56
Figure III. 17. Modèle du filtre actif parallèle à trois niveaux avec la charge polluante R-C parallèle.	57
Figure III. 18. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h	57

Figure III. 19. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.	58
Figure III. 20. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.	58
Figure III. 21. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h	58
Figure III. 22. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.	59
Figure III. 23. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.	59
Figure III. 24. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h	59
Figure III. 25. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.	60
Figure III. 26. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.	60
Figure III. 27. Modèle du filtre actif parallèle à cinq niveaux avec la charge polluante R-L séries.....	62
Figure III. 28. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h	63
Figure III. 29. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.	63
Figure III. 30. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.	63
Figure III. 31. Modèle du filtre actif parallèle à cinq niveaux avec la charge polluante R-C parallèle.	64
Figure III. 32. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h	65
Figure III. 33. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.	65
Figure III. 34. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.	65
Figure III. 35. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV modifiée dans Matlab / Simulink. SIMULATION CHARGE R-L & R-C NIVEAUX TROIS. ..	66
Figure III. 36. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h	67
Figure III. 37. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.	67

Figure III. 38. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.67

Figure III. 39. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h .
.....68

Figure III. 40. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.68

Figure III. 41. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.68

Liste des Tableaux

Tableau I. 1. Limites IEEE des émissions de courants harmoniques (Norme IEEE 519: 1992).	7
Tableau I. 2. Limites IEEE pour la distorsion harmonique de la tension (Norme IEEE 519: 1992).	8
Tableau I. 3. Caractéristique de quelques générateurs d'harmoniques.	12
Tableau I. 4. THDi pour diverses charges non linéaires	13
Tableau I. 5. L'impact d'harmonique sur le matériel électrique.....	23
Tableau II. 1. Etats de l'onduleur à cinq niveaux et sa tension de sortie par rapport au point milieu M.....	36
Tableau III. 1. Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.	49
Tableau III. 2. Paramètre Filtre actif parallèle.	49
Tableau III. 3. Comparaison des résultats.....	60
Tableau III. 4. Comparaison des résultats.....	66
Tableau III. 5. Comparaison des résultats.....	69

Introduction générale

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est la source de l'énergie électrique qui alimente tous les dispositifs connectés directement à ce réseau quoi qu'ils soient industriels ou de distributions. Il est donc indispensable de maintenir l'énergie dans ce réseau en bon état afin de protéger les différents matériels électriques.

Suite au développement des usages de l'électricité dans l'industrie, notamment les charges non linéaires, tels que les redresseurs à diodes ou thyristors ou les alimentations à découpage, le réseau va subir des perturbations néfastes conduisant à le polluer.

Ces pollutions se présentent comme des creux de tension, des fluctuations de tension ou des harmoniques (courant, tension) ...etc. Ils ont des conséquences négatives sur la forme du courant de la source (des distorsions), ce qui conduirait à des pertes additionnelles dans les transformateurs(voire annexe) et dans les matériels connectés au réseau. Cette pollution va engendrer des contraintes de fonctionnement du réseau (défaut de déclenchement de dispositif de protection).

Les formes d'ondes de tension coté MT et BT sont donc détériorées, ce qui conduirait à un endommagement et à un vieillissement prématuré du transformateur.

Pour pallier aux problèmes de pollution d'harmoniques dans les réseaux électriques de distribution plusieurs solutions ont été proposées pour limiter les harmoniques de courant injectés dans le réseau par des charges non linéaires. Les filtres passifs, qui sont souvent appelés filtres piègeurs d'harmoniques, sont utilisés pour éliminer les harmoniques de courant et améliorer le facteur de puissance. Malgré sa simplicité et son faible coût, le filtre passif présente une non- adaptabilité aux variations de la charge et du réseau.

Les progrès remarquables réalisés au cours des dernières années dans le domaine de l'électronique de puissance et l'électronique numérique, ont permis de concevoir des dispositifs de filtrage modernes des harmoniques auto-adaptables appelés filtrage actifs. Le but de ces filtres est de générer soit des courants, soit des harmoniques de tensions de manière à compenser les perturbations responsables de la dégradation de la qualité d'énergie.

Le filtre actif parallèle comporte deux fonctions principales ; une fonction d'identification d'harmoniques de courant et une fonction de commande d'onduleur pour injecter les courants de compensation. Ce dernier possède plusieurs topologies (trois, cinq, sept et douze niveaux).

Dans notre travail on va comparer les différentes méthodes d'identification d'harmoniques de courant avec une seule commande d'onduleur et deux topologies du filtre actif parallèle différent (trois et cinq niveaux). Ceci est nécessaire afin de connaître la meilleure solution pour la dépollution du réseau

- ❖ Dans le premier chapitre, nous aborderons en premier lieu les différents problèmes affectant le réseau électrique, afin de montrer leurs origines et leurs conséquences sur les installations. Nous focaliserons le point sur celui des harmoniques, compte tenu de sa gravité avec la prolifération des charges non-linéaires, afin de quantifier l'impact des harmoniques sur le transformateur et les autres matériaux situés en amont a ce transfo.
- ❖ Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les différents filtres anti-harmoniques et leurs topologies. Nous présenterons les méthodes d'identification des harmoniques de courant à savoir : la méthode des puissances instantanées et la théorie de référentiel synchrone.
- ❖ Le troisième chapitre, constitue l'objectif principal du travail présenté et est le fruit de notre contribution. Nous présenterons l'étude comparative entre les méthodes d'identification des harmoniques de courant en utilisant deux niveaux différents de filtre active parallèle (FAP). La commande des interrupteurs de l'onduleur est assurée par la technique (Hystérésis). Afin de connaître la meilleure solution pour lutter contre les harmoniques et protéger notre matériel électrique une simulation et une comparaison de tous les résultats de ces méthodes a été établie sur la plateforme Matlab/Simulink



CHAPITRE I

LA POLLUTION HARMONIQUE ET SON IMPACT



1. INTRODUCTION

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble (production - transport – consommation) mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble ainsi que pour les appareillages de protection pour assurer la sécurité.

L'énergie électrique est généralement distribuée sous la forme de trois tensions constituant un système sinusoïdal triphasé. Un des paramètres de ce système est la forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.

La correction de la forme d'onde est rendue nécessaire si la déformation dépasse certaines limites, souvent atteintes dans les réseaux possédant des sources de perturbations harmoniques.

Dans ce chapitre nous allons bien détailler les perturbations qui touchent le réseau, leurs origines, les limites tolérées et imposées par les normes internationales de ces perturbations et leurs impacts sur l'ensemble des matériels électriques et transformateurs placé sur ce réseau pollué.

2. PERTURBATIONS ELECTRIQUES

Les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 ou 60 Hz. Les paramètres caractéristiques d'un tel système sont :

- La fréquence.
- L'amplitude des tensions.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- La symétrie du système triphasé (égalité des amplitudes et des déphasages entre les phases).

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique du réseau ou du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis. [9]

2.1. Creux et coupures de tension

Le creux de tension est une diminution brutale de la tension à une valeur située entre 10 % et 90 % de la tension nominale pendant une durée allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes. [10]

Les creux de tension sont dus à des phénomènes naturels comme la foudre, ou à des défauts sur l'installation ou dans les réseaux tant publics que ceux des utilisateurs. Ils apparaissent également lors de manœuvres d'enclenchement mettant en jeu des courants de fortes intensités (moteurs, transformateurs, etc.).

Une coupure de tension quant à elle est une diminution brutale de la tension à une valeur inférieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues. La plupart des appareils électriques admettent une coupure totale d'alimentation d'une durée inférieure à 10 ms. La figure I.1 montre un exemple de creux et de coupure de tension.

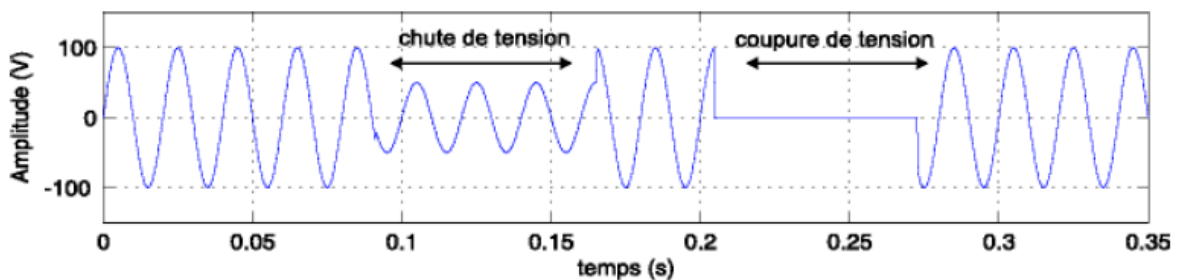


Figure I. 1. Creux et coupures de tension

2.2. Fluctuations de tension

Les fluctuations de tension sont des variations périodiques de l'enveloppe de la tension. Ce sont des variations brutales de l'amplitude de la tension situées dans une bande de $\pm 10\%$ et se produisent sur un intervalle de temps de quelques centièmes de Secondes. [11]

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

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

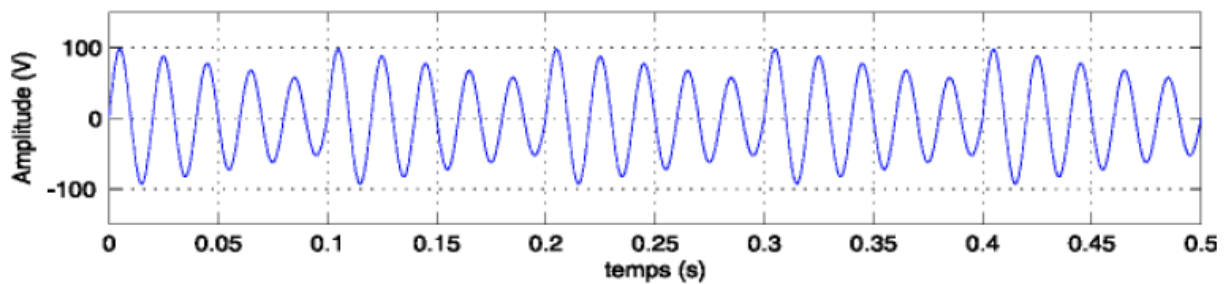


Figure I. 2. Fluctuations de tension.

2.3. Déséquilibre du système triphasé de tension

Lorsque les trois tensions ne sont pas identiques en amplitude et/ou ne sont pas décalées d'un angle de 120° les unes par rapport aux autres, on parlera de déséquilibre du système triphasé comme le montre la figure I.3. Un réseau électrique triphasé équilibré alimentant un récepteur électrique triphasé non équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. [11]

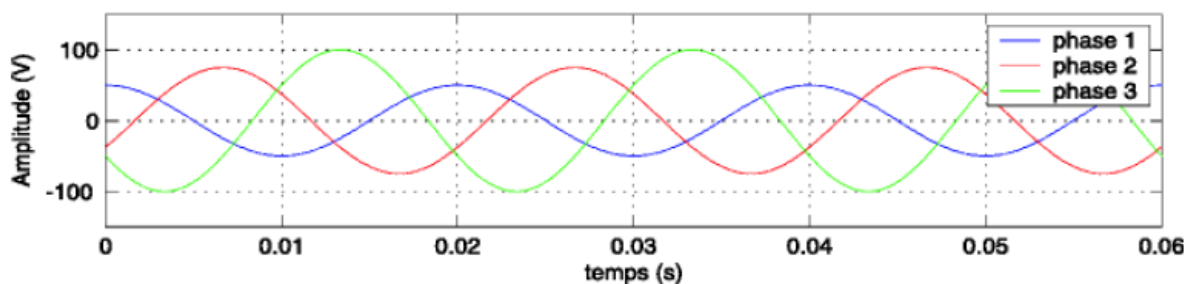


Figure I. 3. Déséquilibre du système triphasé de tension.

2.4. Variation de fréquence

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome, comme le montre la figure I.4. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$. [11]

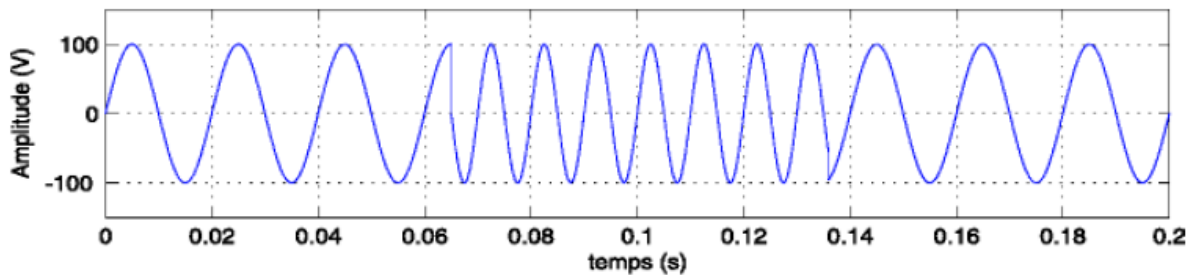


Figure I. 4. Variation de fréquence.

3. LA POLLUTION HARMONIQUE

3. 1. Définition

Les harmoniques sont des tensions ou des courants de composante sinusoïdale périodique ayant une fréquence multiple entière de la fréquence du fondamental. Ainsi, pour un système, la fréquence fondamentale est de (f_0) et la fréquence de (n ème) harmonique est de nf_0 . Les harmoniques sont souvent utilisées pour définir la distorsion du signal sinusoïdal associé avec le courant ou la tension de différentes amplitudes et fréquences, ce qui se traduit par une dégradation du facteur de puissance. [1]

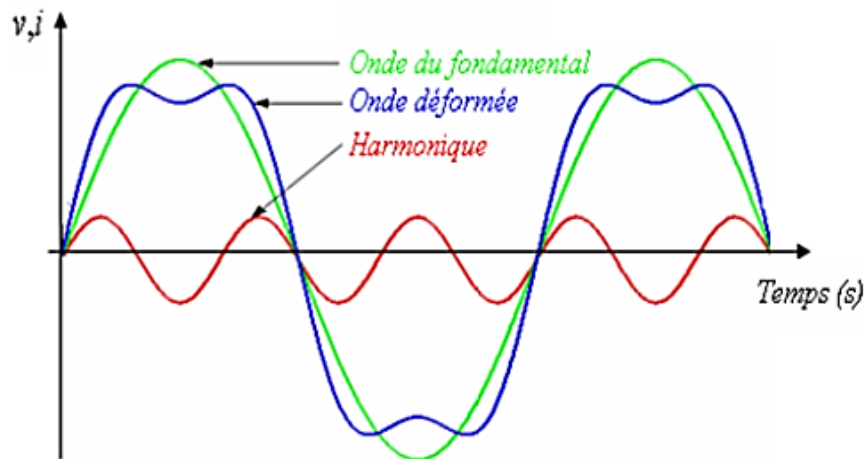


Figure I. 5. Représentation de l'effet d'un harmonique.

3. 2.Normes standards

Afin de limiter l'influence d'une charge polluante sur les différentes charges connectées au réseau des normes sur la qualité de l'énergie ont été développées. La norme principale est l'IEEE 519:1992 [Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Power Systems], elle détermine la procédure pour contrôler les harmoniques présents sur le réseau électrique, et elle impose également les limites recommandées de la pollution harmonique générée par les clients et de distorsion harmonique totale sur le réseau. Cette norme limite la distorsion harmonique (THD) du courant des réseaux <69kV à 5%. Il est d'usage de dire que, dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains. [12], [13]

Tableau I. 1. Limites IEEE des émissions de courants harmoniques (Norme IEEE 519: 1992).

$V_n < 69 \text{ kV}$						
I_{cc}/I_{ch}	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	0	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69 \text{ kV} \leq V_n < 161 \text{ kV}$						

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10
$V_n > 161 \text{ KV}$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Où I_{cc} est le courant de court-circuit, I_{ch} est le courant de charge nominale, V_n la tension nominale, h rang harmonique et TDD est la distorsion totale de la demande (distorsion du courant par rapport à la demande maximale).

Tableau I. 2. Limites IEEE pour la distorsion harmonique de la tension (Norme IEEE 519: 1992).

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

Au-delà de ces valeurs, il est nécessaire d'installer des dispositifs de filtrage.

3. 3. Caractéristiques d'un signal

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

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

3.3.1. Rang d'une harmonique

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

$$n = fn/f_1 \dots\dots\dots(1.1)$$

3.3.2. Représentation spectrale

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

Un signal $S(t)$ déformé comporte généralement plusieurs harmoniques. On représente souvent ce signal sous la forme d'un spectre, c'est-à-dire à l'aide d'un schéma où l'on porte en abscisse la fréquence et en ordonnée le module (en valeur efficace ou en pourcent) [7]. Comme il est représenté sur la figure I.6.

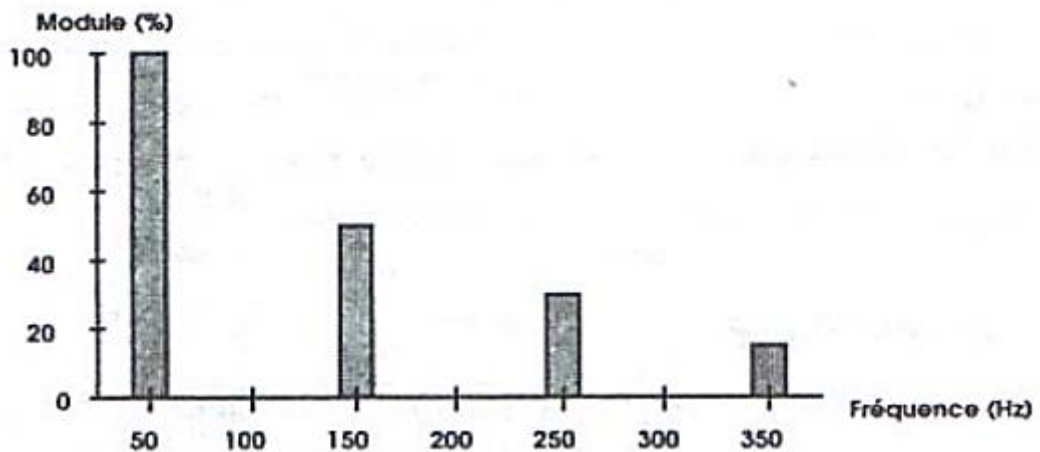


Figure I. 6. Décomposition spectrale d'un signal $S(t)$ en fréquence.

3.3.3. Décomposition d'un signal en série de FOURIER :

Le signal $S(t)$ peut représenter un courant ou une tension. Il est périodique de période T , donc de fréquence $f = 1/T$ et de pulsation $\omega = 2\pi f$. Ce signal s'écrit selon la décomposition suivante :

$$S(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cdot \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} b_h \cdot \sin(h\omega t) \dots\dots\dots(1.2)$$

Avec : $a_0 = 1/T \int_0^T S(t) \cdot dt$

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

Pour $h \geq 1$: $a_h = 2/T \int_0^t S(t). \cos(hwt). dt$

$$b_h = 2/T \int_0^t S(t). \sin(hwt). dt$$

La grandeur $C_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ est l'amplitude de l'harmonique de rang h.

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

- Si la fonction est symétrique par glissement, la valeur a_h est nulle.
- Si la fonction est paire, les coefficients b_h sont nuls.
- Si la fonction est impaire, les coefficients a_h sont nuls.
- Si la fonction possède une symétrie sur ses deux demi-périodes, les termes d'indice pairs sont nuls.

3.3.4. Distorsion harmonique

Le taux de distorsion est un paramètre qui définit globalement la déformation d'une grandeur alternative, et est caractérisée par :

$$S_h(\%) = \frac{C_h}{C_1} \cdot 100$$

On définit le taux de distorsion harmonique (TDH), appliqué au courant ou à la tension, par :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} C_h^2}}{C_1}$$

- Taux harmonique de courant :

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

I_h : Harmonique de Courant de rang h.

I_1 : Fondamentale de courant.

- Taux harmonique de tension :

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}$$

V_h : Harmonique de tension de rang h.

V_1 : Fondamentale de tension.

4. Notion de charge

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 (figure I.7. (a)).

Une charge est dite non-linéaire lorsque la relation entre la tension et le courant n'est plus linéaire. Un tel récepteur alimenté par une tension sinusoïdale, consomme un courant non-sinusoïdal. Typiquement, les charges utilisant l'électronique de puissance sont non linéaires. Elles sont de plus en plus nombreuses et leur part dans la consommation d'électricité ne cesse de croître (figure I.7. (b)).

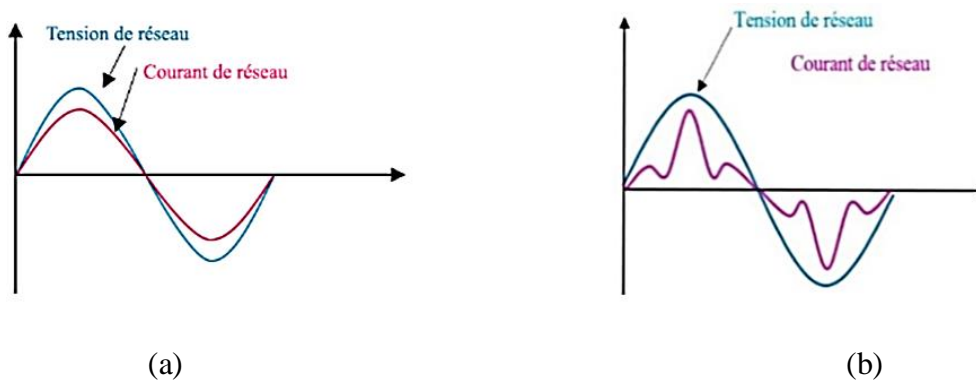


Figure I. 7. (a) charge linéaire.

(b) charge non linéaire.

5. Harmoniques de courant et de tension

5.1. Harmonique de courant

On dit qu'une charge est non linéaire quand, soumise à une tension sinusoïdale à 50Hz, elle n'absorbe pas un courant sinusoïdal ; Ces charges se comportent approximativement

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

comme des sources d'harmonique de courant, c'est-à-dire que l'harmonique de courant est fixée par la charge et non pas par la tension du réseau sur lesquelles elles sont raccordées.

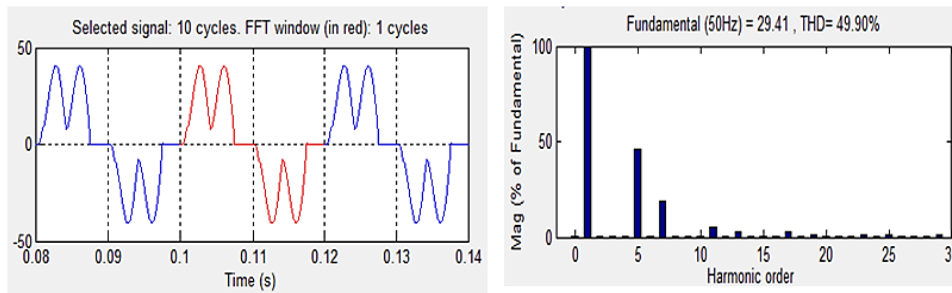


Figure I. 8. Exemple de courant harmonique consommé par une charge non linéaire (R-C).

5.2. Harmonique de tension

On peut également parler de source de tension pour décrire l'état d'un réseau perturbé par une forte charge non linéaire. Dans ce cas, si l'on s'intéresse à l'étude de raccordement d'un récepteur de faible puissance, sa connexion au réseau ne modifie pas sensiblement le niveau précédent.

6. Origines de la pollution harmonique

Ce sont les charges domestiques et industrielles qui provoquent la plus grande proportion d'harmoniques de courant avec des niveaux de distorsion relativement élevés.

Tableau I. 3. Caractéristique de quelques générateurs d'harmoniques.

Type de charge	Appareils concernés	Courant absorbé	Spectre harmonique
Eclairage	-Tubes fluorescents -Lampes à vapeur HP		
Redresseur monophasé à diode avec filtrage alimentation à découplage	-Micro-informatique -Télévisions -Lampes de ballast électronique		
Gradateur monophasé (commande par angle de phase)	-Régulation de puissance de fours à résistance -Modulation de puissance des lampes halogènes		
Moteur asynchrone	-Machines-outils -Appareils électroménager -Ascenseurs		
Redresseur triphasé à thyristors	-Variation de vitesse des moteurs à courant continu et des moteurs asynchrones		

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

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

Tableau I. 4. THDi pour diverses charges non linéaires

Charges Non linéaires	THDi(%)
Variateurs de vitesse	80
Alimentation de micro-ordinateur	70
Tubes fluorescents	>100

7. L'impact due aux harmoniques

7.1. Moteurs à induction

a. Perturbations mécaniques

La présence d'harmoniques dans l'alimentation va engendrer la création de couples harmoniques dans la machine. Ces couples harmoniques se superposent au couple fondamental et augmentent les vibrations mécaniques subies par la machine, ce qui va augmenter plus rapidement la fatigue mécanique du moteur. [8]

b. Influence sur les pertes

Lorsque l'alimentation de la machine est perturbée par la présence d'harmoniques, les pertes à l'intérieur de celle-ci vont augmenter. Les pertes dans une machine à induction peuvent être divisées en trois termes : les pertes Joule, les pertes fer et les pertes mécaniques. A 50Hz, nous pouvons négliger les pertes fer rotoriques car elles sont fonction de la fréquence rotorique, égale à g fois la fréquence statorique. Ces pertes, pour le régime harmonique, ne sont plus négligeables. En présence d'harmoniques, la résistance des conducteurs du rotor va augmenter du fait de l'effet de peau. Au niveau du rotor, le glissement très fort pour les composantes harmoniques crée des phénomènes induits qui vont augmenter le courant rotorique (le courant est tout de même limité par l'inductance de fuite du rotor). L'augmentation de la résistance et du courant rotorique va ainsi faire croître les pertes Joule rotoriques. [8]

c. Augmentation de la température de fonctionnement

Nous avons vu dans la partie précédente que la présence d'harmoniques cause des pertes supplémentaires dans les machines à induction. Ces pertes vont avoir comme effet d'augmenter la température de la machine asynchrone.

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

Ching-Yin Lee a étudié l'influence d'harmoniques de tension sur le fonctionnement des machines à induction en injectant en plus du fondamental un rang harmonique n à hauteur de 10% ($2 < h < 13$). Le moteur étudié a une puissance de 2,2kW et possède une classe E d'isolement. Les essais ont montré que la présence d'harmoniques entraînait une diminution de 2% du rendement du moteur. Cette diminution du rendement traduit une augmentation des pertes dans la machine et donc une augmentation de sa température. On peut voir dans ces essais que les harmoniques les plus contraignants sont les harmoniques de rang pair, mais ceux-ci ne sont pas fréquents sur un réseau électrique de distribution.

Pour un THD en tension de 10%, l'augmentation de température est comprise entre 5 et 10% pour les rangs harmoniques impairs. [8]

d. Réduction de la durée de vie

Cette augmentation de température dans les machines à induction va entraîner une diminution de la durée de vie des machines. Le vieillissement thermique des isolants dans les matériels électrotechniques est régi par la loi d'Arrhenius décrite par l'équation :

$$\frac{d\rho}{dt} = A \cdot \exp\left(-\frac{E}{k\theta}\right) \dots \dots \dots (1.3)$$

- $\frac{d\rho}{dt}$: la vitesse de réduction de la durée de vie,
- A : une constante fonction de l'isolant,
- E : l'énergie nécessaire à un changement de niveau,
- K : la constante de Boltzmann,
- θ : la température

On peut, à partir de cette équation, tracer la courbe représentant la durée de vie d'une machine en fonction de sa température de fonctionnement, et ce pour les différentes classes d'isolation des moteurs comme montre la figure suivant :

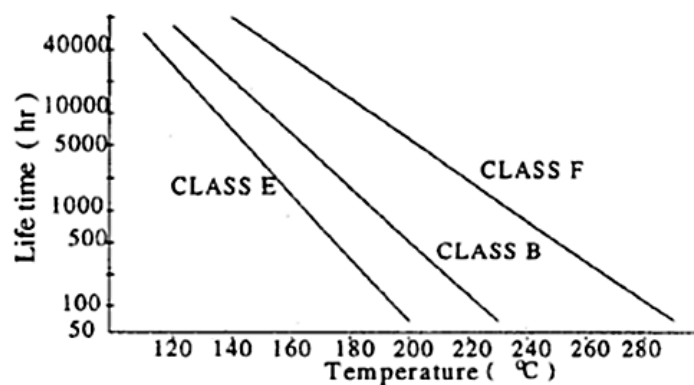


Figure I. 9. Courbes de durée de vie en fonction de la température de fonctionnement.

Dans les différentes études menées sur la durée de vie des machines alimentées par des tensions non sinusoïdales, on peut remarquer une diminution plus ou moins importante suivant les taux d'harmoniques on peut voir que la réduction de durée de vie peut aller jusqu'à 50% pour des taux d'harmoniques que l'on peut retrouver sur les réseaux de distribution. [8]

e. Généralité

Les harmoniques vont générer un couple oscillant sur la machine. Ces couples oscillants vont produire la fatigue mécanique des machines. Les études portant sur l'impact des harmoniques sur les pertes dans les machines à induction montrent une augmentation pouvant aller jusqu'à 10%. Cette augmentation des pertes va augmenter de quelques degrés la température de fonctionnement, ce qui peut réduire considérablement la durée de vie des machines à induction.

7.2. L'impact sur les différents matériels électriques

a. Relais de commande statique

Les relais de commande, que l'on peut trouver dans des applications telles que les imprimantes et les photocopieurs, peuvent présenter un dysfonctionnement en présence d'harmoniques. Il a été relevé de nombreux problèmes au niveau des photocopieurs dans des bâtiments pollués par des charges non linéaires, les imprimantes indiquant un problème de température qui pourrait être dû à de mauvaises commutations des relais statiques. Ces relais ont une commutation aux zéro de tension, sensible aux harmoniques, et présentent des défauts de commutation à l'ouverture et à la fermeture. [8]

b. Banc de capacités

Les problèmes rencontrés sur les bancs de capacités sont principalement dus aux résonances créées par la connexion de ces bancs sur le réseau électrique. Les décharges partielles dans les isolants sont une des causes de la dégradation de l'isolation. La présence d'harmoniques et le phénomène de résonance vont augmenter la valeur du courant qui circule dans les capacités, entraînant alors une augmentation de la température, pouvant mener à une destruction de la capacité. [8]

c. Protections électriques

Relais de protection : Les relais de protection présents sur le réseau électrique vont être affectés dans leur bon fonctionnement par la distorsion de la forme d'onde créée par la présence d'harmoniques. Les relais de protection de mise à la terre, incapables de faire la

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

différence entre les courants homopolaires et les harmoniques multiples de 3 (qui sont en fait homopolaires) peuvent déclencher en présence d'harmoniques. [8]

- **Les protections différentielles** : D'une façon générale, en fonctionnement normal, les protections différentielles sont peu perturbées par les harmoniques de courant qui sont des perturbations de mode différentiel (la somme instantanée des courants de phases et du neutre étant nulle). La présence d'harmoniques de tension aux bornes des capacités de filtrage va générer des courants de fuite supplémentaires qui vont venir se superposer aux courants de fuite 50Hz. Ils peuvent alors provoquer des déclenchements intempestifs soit sur ouverture ou la fermeture d'un contacteur, soit sur la mise sous tension d'éclairage.

- **Disjoncteurs magnétothermiques** : Les protections magnétothermiques protègent les installations et les matériels contre les surcharges et les surintensités. La partie thermique est composée d'une lame bimétallique (bilame) qui va se déformer en cas de surcharge. La partie magnétique intervient contre les surintensités et les court-circuit. En service normal, l'induction magnétique produite par la circulation de courant n'est pas suffisante pour attirer l'armature mobile ; le circuit est fermé. Si un défaut apparaît dans le circuit en aval du disjoncteur de canalisation, le courant de court-circuit provoque une violente aimantation de l'armature mobile. Cela a comme conséquence d'ouvrir le circuit aval du disjoncteur en 0,1sec au maximum. Pour un courant efficace constant, la présence d'harmoniques n'aura pas d'influence sur la partie thermique car elle est sensible au courant efficace et non à la fréquence. Par contre, la partie magnétique peut déclencher en présence d'harmoniques alors que la valeur du courant ne l'impose pas.

On trouve aujourd'hui de plus en plus de relais de protection numériques qui eux ne sont pas influencés par les harmoniques, et ce, même avec des forts taux d'harmoniques. [8]

- **Fusibles** : L'effet de peau crée une augmentation de la résistance totale et de la puissance dissipée en présence d'harmoniques de courant. Pour les hautes fréquences, il y a donc une nécessité de déclasser et de réduire le courant admissible afin de se prémunir de températures excessives.

Il existe deux méthodes de déclassement des fusibles pour des courants sinusoïdaux, la première basée sur la puissance dissipée et la deuxième basée sur le courant maximum admissible. [8]

- **Compteurs électriques** : La présence d'harmoniques sur le réseau peut perturber la mesure de puissance et introduire des erreurs sur celui-ci. Les compteurs d'énergie

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

électromécanique sont composés d'un circuit magnétique, d'un disque et de bobines (Figure I.10). La tension et le courant qui vont circuler dans l'appareil et vont créer un flux dans le circuit magnétique ; ceci va créer un flux dans l'entrefer du circuit et générer des courants de Foucault dans le disque. Ces courants vont alors créer des forces de Laplace sur ce disque, et générer un couple qui va faire tourner le disque à une certaine vitesse, donnant ainsi l'indication de consommation de puissance. [8]

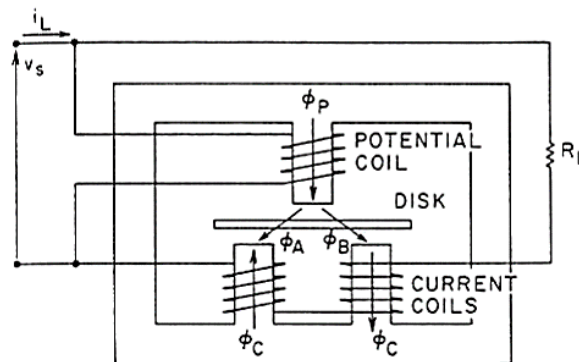


Figure I. 10. Circuit magnétique d'un wattmètre à induction.

Dans le cas d'une perturbation harmonique, on va avoir une augmentation du couple de rotation du disque et donc une erreur sur la mesure de la puissance consommée.

7.3. Transformateurs

a. Influence sur les pertes du transformateur

Les pertes dans les transformateurs sont généralement définies comme la somme des pertes en charge et des pertes à vide.

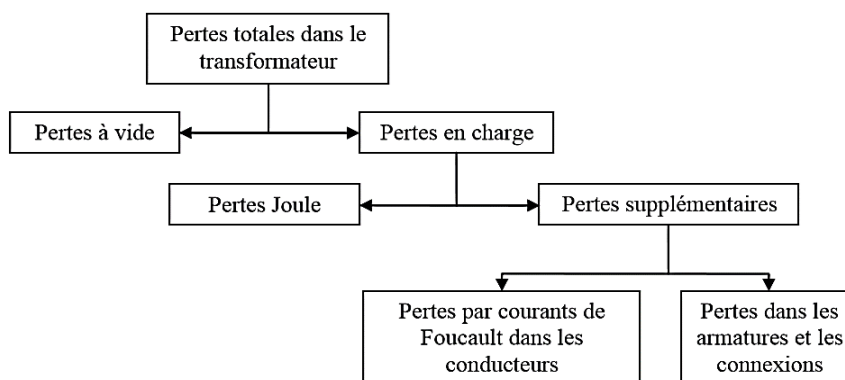


Figure I. 11. Diagramme des pertes d'un transformateur.

Les pertes totales d'un transformateur peuvent alors s'exprimer comme présentées dans l'équation (1.4).

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

$$P_{total} = P_{nl} + P_{ll} \dots \dots \dots (1.4)$$

Avec,

P_{total} : les pertes totales,

P_{nl} : les pertes à vide,

P_{ll} : les pertes en charge.

Les pertes dites à vide correspondent à la magnétisation du transformateur et les pertes en charge correspondent aux pertes dues à la circulation d'un courant dans les enroulements du transformateur. On retrouve dans ces pertes en charge un terme représentant les pertes Joule dans les conducteurs du transformateur et un terme qui représente les « pertes supplémentaires ». Ces dernières pertes peuvent être définies comme les pertes créées dans les matériaux conducteurs (enroulements, écran, structure...) par les flux de fuites présents dans le transformateur. Ces pertes peuvent être séparées en deux parties, l'une représentant les pertes par courants de Foucault dans les conducteurs et l'autre les pertes dans les matériaux conducteurs autres que les enroulements. Les pertes en charge peuvent alors s'écrire de la façon suivante :

$$P_{ll} = P_j + P_{ec} + P_{osl} \dots \dots \dots (1.5)$$

Avec

P_j : les pertes Joule dans les enroulements créés par le courant de charge et la résistance en continue,

P_{ec} : les pertes par courants de Foucault dans les enroulements,

P_{osl} : les pertes par courants de Foucault dans les matériaux conducteurs autres que les enroulements,

La présence d'harmoniques sur les courants aux bornes du transformateur va avoir un impact direct sur les pertes de celui-ci. En ce qui concerne les pertes Joule dues à la résistance en continu, elles vont varier avec l'augmentation de la valeur efficace du courant. D'autre part pour les pertes par courants de Foucault dans les conducteurs, il est généralement considéré qu'elles évoluent avec le carré du courant et le carré de la fréquence (ou du rang harmonique h). Ces pertes peuvent alors s'écrire de la façon suivante :

$$P_{ec} = P_{ec-r} \sum_{h=1}^{h=max} h^2 \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \dots \dots \dots (1.6)$$

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

Avec :

P_{ec} les pertes par courants de Foucault dans les conducteurs,

P_{ec-r} les pertes par courants de Foucault dans les conducteurs sous régime nominal (courant à 50 Hz),

h le rang harmonique,

I_h la valeur efficace du courant de rang h ,

I_R le courant efficace sous les conditions nominales de charge et de fréquence.

Les autres pertes dues aux flux de fuites dans le transformateur vont elles aussi être impactées par la présence d'harmoniques de courant. Il est généralement considéré que ces pertes évoluent avec le carré du courant et avec la fréquence à la puissance 0,8. On obtient alors des pertes qui, en présence d'harmoniques, s'écrivent de la manière suivante :

$$P_{osl} = P_{osl-r} \sum_{h=1}^{h=max} h^{0.8} \left(\frac{I_h}{I_R} \right)^2 \dots\dots\dots(1.7)$$

Avec :

P_{osl} les pertes créées dans les parties structurelles autres que les conducteurs,

P_{osl-r} les pertes créées dans les parties structurelles autres que les conducteurs sous conditions nominales (courant à 50 Hz).

Dans le cas d'un transformateur de 50 kVA, les pertes supplémentaires créées par les harmoniques de courant étaient de l'ordre de 6%. Cette estimation des pertes supplémentaires a été réalisée par des calculs par éléments finis pour un courant possédant un THD de 21,5%. Les rangs 5, 7 et 11 étaient ceux qui contribuaient le plus à cette augmentation des pertes du fait de leur poids plus important dans le courant.

En conclusion, on peut remarquer que la présence d'harmoniques va augmenter, de façon parfois considérable, les pertes dans le transformateur. Cependant, il semble que l'estimation des pertes en présence d'harmoniques passe par la connaissance des pertes par courants de Foucault à 50Hz et des autres pertes P_{osl} sous régime nominal comme le montrent les équations (1.6) et (1.7).

b. Augmentation de la température de fonctionnement

La circulation d'harmoniques dans un transformateur va augmenter les pertes dans celui-ci, comme nous l'avons vu précédemment. Cette augmentation de pertes va avoir comme effet d'augmenter la température de fonctionnement dans ce même transformateur. Dans [14], l'auteur a simulé l'évolution de la température d'un transformateur 31,5MVA 115kV/6,3kV de type ONAF (Circulation naturelle d'huile/Circulation forcée d'air). La modélisation thermique du transformateur et le calcul des pertes ont été réalisés grâce aux équations citées ci-dessus.

La simulation a été faite sur une période de 24h avec la prise en compte de la variation de la température ambiante et du taux de charge du transformateur au cours de la journée. Trois simulations ont été réalisées : sans harmoniques, avec un THD de 10% et avec un THD de 22%.

On peut voir sur la Figure I.12, l'évolution de la température de l'huile et de celle du point chaud du transformateur. Dans cette étude, le taux de charge du transformateur varie au cours de la journée (autour de 60% la nuit, et proche de 100% en milieu d'après-midi). Cela explique d'une part que l'augmentation de température engendrée par les harmoniques ne soit pas uniforme au cours de la journée et d'autre part que la température du point chaud dépasse la température maximale en régime de surcharge de ce point (120°C). [8]

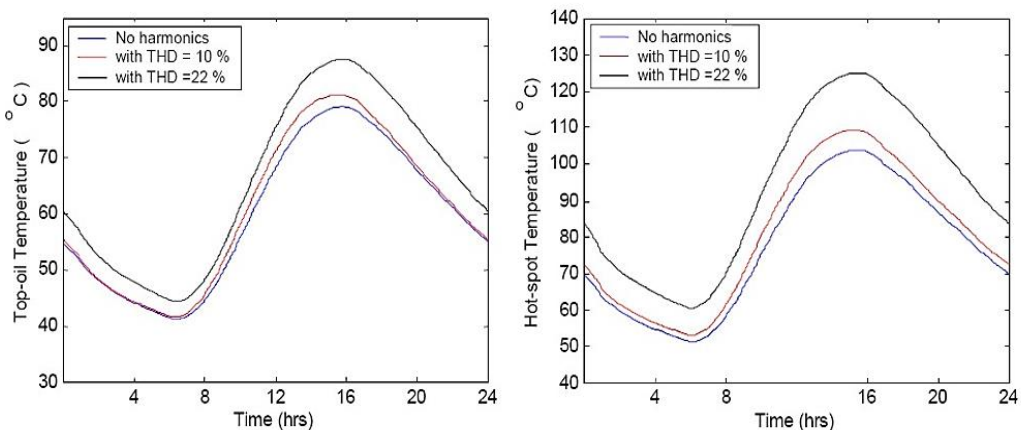


Figure I. 12. Température de l'huile et du point chaud du transformateur.

c. Réduction de la durée de vie

La durée de vie d'un transformateur peut être ramenée à la durée de vie des isolants autour des conducteurs. On peut alors exprimer la durée de vie grâce à la relation (1.8), tirée de la loi d'Arrhenius :

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

$$per\ unit\ life = A \exp\left(\frac{B}{\theta_h + 273}\right) \dots \dots \dots (1.8)$$

Avec :

θ_h la température maximale au niveau des enroulements,

A et B des constantes.

La méthode pour calculer la durée de vie d'un transformateur immergé dans un diélectrique de type huile minérale commence par le calcul de la vitesse de vieillissement F_{aa} . L'équation (1.9) donne la loi permettant de calculer la vitesse de vieillissement pour les isolants.

$$F_{aa} = \exp\left(\frac{15000}{273+110} - \frac{15000}{\theta_h+273}\right) \dots \dots \dots (1.9)$$

Où $\theta_h = \theta_{to} + \theta_g + \theta_a$

Avec :

θ_{to} : L'augmentation de température maximale de l'huile au-dessus de la température ambiante,

θ_g : L'augmentation de température maximale du point chaud du bobinage au-dessus, de la température maximale de l'huile,

θ_a : La température ambiante.

Ainsi, en considérant la charge constante, la perte de durée de vie s'exprime de la façon suivante :

$$LOL\% = \frac{F_{aa} * t * 100}{durée\ de\ vie\ normale\ de\ l'isolation} \dots \dots \dots (1.10)$$

Avec

t : la durée d'utilisation,

LOL : la perte de durée de vie

La relation donne un pourcentage de consommation de la durée de vie du transformateur. La présence d'harmoniques va avoir un impact sur la durée de vie par l'intermédiaire de la montée en température du point chaud des enroulements du transformateur. Ainsi, en présence d'harmoniques, l'estimation de la durée de vie de l'isolant des enroulements se fera toujours grâce à l'équation (1.10)

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

Au-delà d'une température de 140°C pour le point chaud, des bulles de gaz peuvent apparaître, ce qui pourrait compromettre la rigidité diélectrique du transformateur, ce phénomène constitue le risque principal pour les défaillances à court terme. Il est aussi à noter que l'augmentation de température dans les transformateurs va dégrader temporairement les propriétés mécaniques de celui-ci, ce qui peut réduire la tenue au court-circuit. De plus la dilatation de l'huile peut aussi provoquer un débordement de l'huile dans le conservateur. [8]

d. Conclusion

Les transformateurs sont sensibles aux harmoniques de courant qui vont augmenter leurs pertes en charge, et ainsi contribuer à l'augmentation de la température de fonctionnement de ceux-ci. L'estimation des pertes en présence d'harmoniques passe par la connaissance des pertes par courants de Foucault dans les conducteurs. Cette information est difficile à trouver si l'on n'est pas constructeur du transformateur. Plus le transformateur sera chargé, plus l'augmentation de la température sera importante. La proportion d'harmoniques de courant et le taux de charge du transformateur auront donc tous les deux un impact sur le comportement thermique du transformateur. En ce qui concerne la notion de durée de vie, un THD en courant de 50% pour un taux de charge du transformateur de 30% sera moins néfaste pour la durée de vie qu'un THD de 50% avec un taux de charge de 90%.

CONCLUSION

La présence d'harmoniques sur les réseaux de distribution va impacter les matériels du réseau et ceux qui sont connectés sur celui-ci. Les systèmes de protection présents sur les réseaux électriques ainsi que les compteurs d'énergie semblent relativement bien protégés contre les harmoniques de tension et de courant. Les différents problèmes sur les bancs de capacités relevés en présence d'harmoniques semblent être dus, dans la grande majorité, des cas à des phénomènes de résonance plutôt qu'à un vieillissement prématuré causé par les harmoniques. Que ce soit pour les moteurs, les câbles ou les transformateurs, on retrouve les mêmes problématiques en présence d'harmoniques : une augmentation des pertes dans ces matériels qui entraîne une augmentation de la température de fonctionnement peuvent à long terme diminuer leur durée de vie.

Tableau I. 5. L'impact d'harmonique sur le matériel électrique.

MATERIEL ELECTRIQUE	EFFETS DE LA POLLUTION HARMONIQUE
Machines tournantes (moteurs triphasés, alternateur)	Echauffements supplémentaires. Couples oscillatoires qui provoquent des vibrations et du bruit.
Transformateurs	Echauffements supplémentaires. Pertes dans le fer. Risque de saturation.
Câbles	Augmentation des pertes surtout dans le câble de neutre où s'ajoutent les harmoniques de rang 3.
Electronique de puissance	Troubles de fonctionnement.
Condensateurs	Vieillessement prématuré.
Dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs)	Déclenchement intempestif.
Compteurs d'énergie	Erreurs de mesure.
Téléviseurs	Déformation de l'image et du son.
Lampes à décharge	Risque de vieillissement prématuré.

Chapitre I : La pollution harmonique et son impact

Dans ce chapitre on a défini les perturbations électriques présentes dans les réseaux, et on a bien détaillé la pollution harmonique (caractéristiques, origines ainsi que quantification de son impact sur les différents matériels électriques connectés aux réseaux de distribution).

Dans cette optique, nous allons étudier dans le prochain chapitre les solutions utilisées pour lutter contre ces pollutions à l'aide des dispositifs anti-harmoniques que l'on va bien détailler.



CHAPITRE II
LES FILTRES
ANTI-HARMONIQUES



1. INTRODUCTION

L'utilisation croissante dans l'industrie des systèmes commandés à base d'électronique de puissance entraîne de plus en plus de problèmes de perturbation au niveau des réseaux électriques. La pollution harmonique sur les réseaux électriques présente un phénomène important entraînant la dégradation de la qualité de l'énergie.

Ces harmoniques de courant et de tension peuvent fortement contraindre les transformateurs, jusqu'à les endommager.

Plusieurs solutions de dépollution des réseaux électriques ont été déjà proposées dans la littérature.

Dans ce chapitre on va expliquer le principe de fonctionnement des trois types de filtres.

- ✓ Le filtre passif.
- ✓ Le filtre actif.
- ✓ Le filtre hybride.

Ces filtres doivent être placés juste avant les charges polluantes pour un filtrage efficace des harmoniques de courant.

L'explication des méthodes d'identification des harmoniques de courant de référence ainsi que la commande des filtres est présentée.

2. LES FILTRES ANTI-HARMONIQUES

2.1. Filtre passif

Le filtre passif modifie localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les harmoniques de courant et à diminuer les harmoniques de tension là où cela est nécessaire. On associe des éléments capacitifs et inductifs de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. [15]

Il existe deux classes de filtres passifs (résonant, amorti) permettant de réduire les harmoniques.

2.1.1. Filtre résonant

Le filtre résonant est constitué d'un condensateur monté en série avec une inductance. Ces éléments sont placés en dérivation sur l'installation et accordés sur un rang d'harmonique à éliminer. L'impédance de cet ensemble est très faible pour sa fréquence d'accord, et se comporte ainsi comme un court-circuit pour l'harmonique considéré, à savoir les deux harmoniques les plus gênantes h_5 et h_7 . [15]

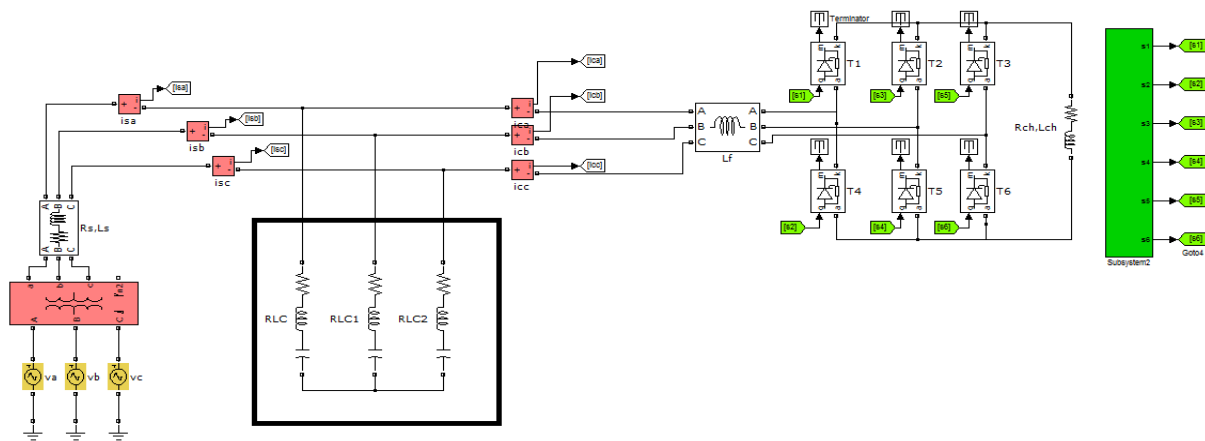


Figure II. 1. Filtre passif résonant.

2.1.2. Filtre amorti

Un filtre amorti se compose d'une capacité en série avec un ensemble constitué de la mise en parallèle d'une inductance et d'une résistance appelée résistance d'amortissement. Il est utilisé lorsque les performances demandées ne sont pas trop élevées. On utilise souvent un filtre passe haut pour filtrer simultanément les plus hautes fréquences du spectre et non une fréquence particulière [15].

Donc il est conçue pour éliminer une bande de fréquence à partir de l'harmonique h_{11} , qui correspond à la fréquence de 550 Hz. Les harmoniques h_{11} , h_{13} , h_{17} et h_{19} , sont pratiquement éliminés par ce type de filtre.

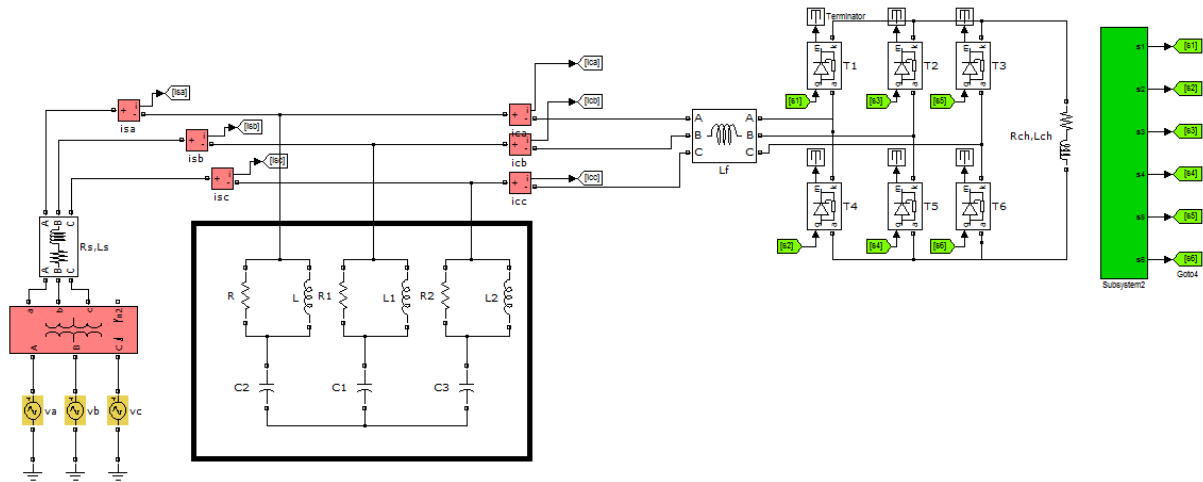


Figure II. 2. Filtre passif amorti.

Le filtrage passif est très utilisé dans le domaine de l'industrie, mais ses performances restent très limitées en raison de ses importants inconvénients :

- ❖ Une connaissance approfondie de la configuration du réseau électrique est nécessaire.
- ❖ les variations de l'impédance du réseau peuvent détériorer les performances du filtre.
- ❖ le réseau peut former un système résonnant avec le filtre et les fréquences voisines de la fréquence de résonance sont amplifiées.
- ❖ Equipement volumineux.
- ❖ Inadaptabilité et perte d'efficacité lorsque les caractéristiques du réseau électrique évoluent.

2.2. Filtre actif

Traditionnellement, un filtre passif est utilisé pour éliminer les harmoniques, cependant cet équipement de compensation comporte certains inconvénients, pour cela les filtres actifs ont été proposés pour bien améliorer la qualité de l'énergie électrique [16].

Afin de compenser les harmoniques de courant ou de tension, le filtre actif est connecté au réseau soit en parallèle (FAP), soit en série (FAS). [17]

Les avantages les plus importants des filtres actifs par rapport aux filtres passifs sont les suivants :

- ❖ Le volume physique du filtre est plus réduit,

Chapitre II : les filtres anti-harmoniques

- ❖ La capacité de filtrage est supérieure.
- ❖ La flexibilité et adaptabilité sont très supérieures.

Pourtant, ils ont aussi quelques inconvénients :

- ❖ Leur coût élevé (ce qui a limité leur implantation).
- ❖ Les pertes sont plus élevées (puissance fournie pour la compensation).

2.2.1. Filtre actif parallèle

Le filtre actif parallèle ou compensateur shunt, est connecté en parallèle sur le réseau électrique entre la source de tension et la charge non-linéaire. Il injecte dans le réseau le courant nécessaire afin de compenser les harmoniques de la charge polluante. Il est souvent commandé comme générateur de courant réglable.

Ainsi, l'objectif du filtre actif parallèle est conçu pour compenser à toutes les perturbations de courant comme les harmoniques, les déséquilibres et la puissance réactive engendrés par la charge non linéaire, tout en s'adaptant aux évolutions du récepteur. [18]

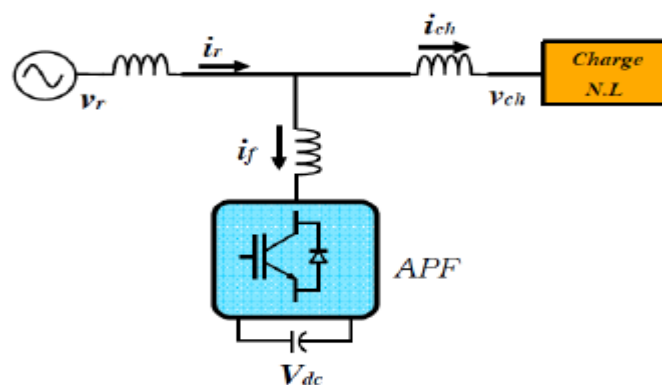


Figure II. 3. Filtre actif parallèle.

2.2.2. Filtre actif série

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

Chapitre II : les filtres anti-harmoniques

Il est destiné à protéger les installations sensibles aux tensions perturbatrices (harmoniques, creux, déséquilibres) provenant de la source et également celles provoquées par la circulation des courants perturbateurs à travers l'impédance du réseau.

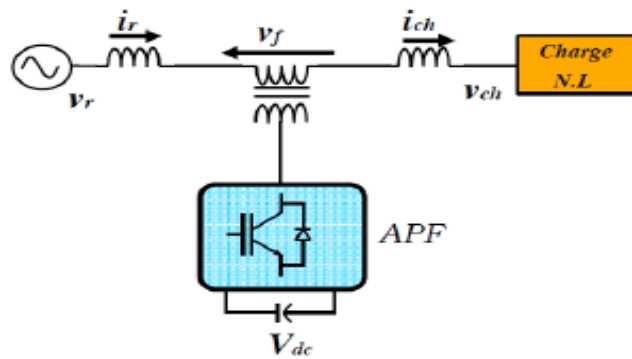


Figure II. 4. Filtre actif série.

2.2.3. Combinaison parallèle-série de filtres actifs

D'après ce qui précède, ni le FAP, ni le FAS de puissance ne sont capables d'effectuer un filtrage total, donnant une tension sinusoïdale du côté de la charge et un courant sans harmoniques du côté du réseau. Cet objectif peut être atteint en utilisant un conditionneur d'énergie électrique de puissance composé de ces deux filtres actifs de puissance communément appelé (Unified Power Quality Conditioner : UPQC) comme le montre la Figure II.5.

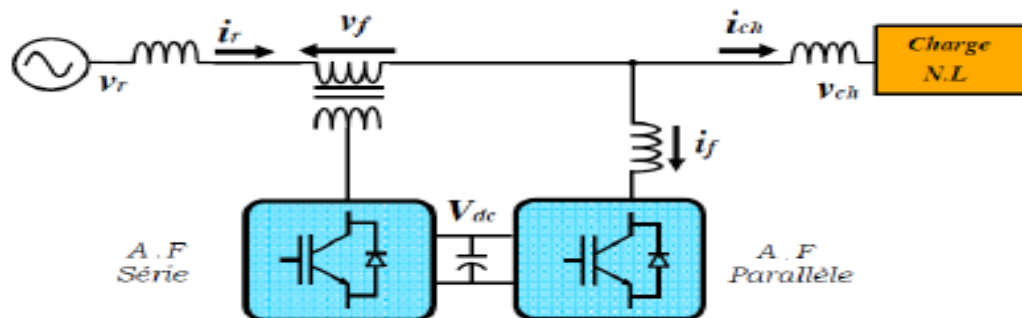


Figure II. 5. Combinaison parallèle-série de filtres actifs.

2.3. Filtre hybride

Le filtre hybride est une topologie de filtre qui combine les avantages des filtres passifs et des filtres actifs. Pour cette raison, il est considéré comme l'une des meilleures solutions pour filtrer les harmoniques de courant des réseaux de distribution. Une des principales raisons de l'utilisation du filtre actif hybride est liée au développement des semi-conducteurs de puissance tels que les transistors de puissance de types MOSFET ou IGBT. De plus, du point de vue économique, le filtre hybride présente un atout majeur ; il permet de réduire le coût du filtre actif, actuellement l'obstacle majeur à l'utilisation de filtres actifs. [19]

Ces dernières années, de nombreuses topologies de filtres hybrides associées à différentes stratégies de commandes ont été présentées dans la littérature scientifique afin d'améliorer la qualité de l'énergie et surtout pour réduire le dimensionnement du filtre actif de puissance et par conséquent son coût. Les filtres hybrides peuvent être classés selon le nombre d'éléments mis en œuvre dans la topologie étudiée (filtres actifs et filtres passifs), le système traité (monophasé, triphasé trois fils et triphasé quatre fils) et le type d'onduleur utilisé (structure tension ou courant). La figure II.6 présente quelques configurations de filtres hybrides selon le type de système étudié et les éléments associés. [20]

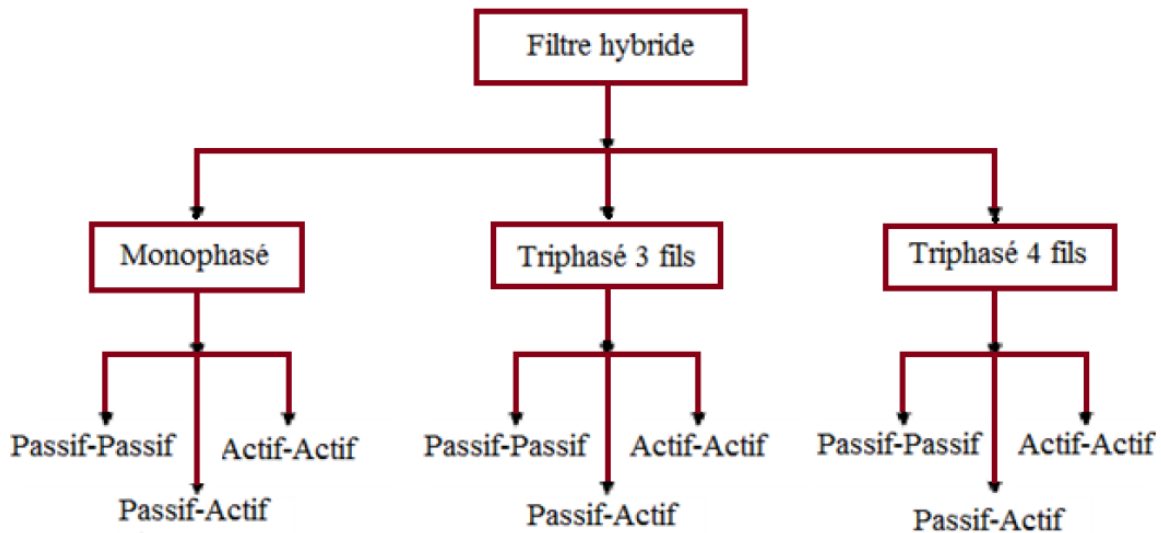


Figure II. 6. Classification des filtres hybrides.

La configuration traditionnelle du filtre hybride comprend un filtre actif et un filtre passif. Selon le mode d'association des filtres passifs aux filtres actifs, le filtre hybride se décline en plusieurs configurations décrites ci-après.

2.3.1. Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif parallèle

Dans cette topologie, le filtre actif est connecté en parallèle avec le filtre passif. Tous les deux sont en parallèle avec la charge.

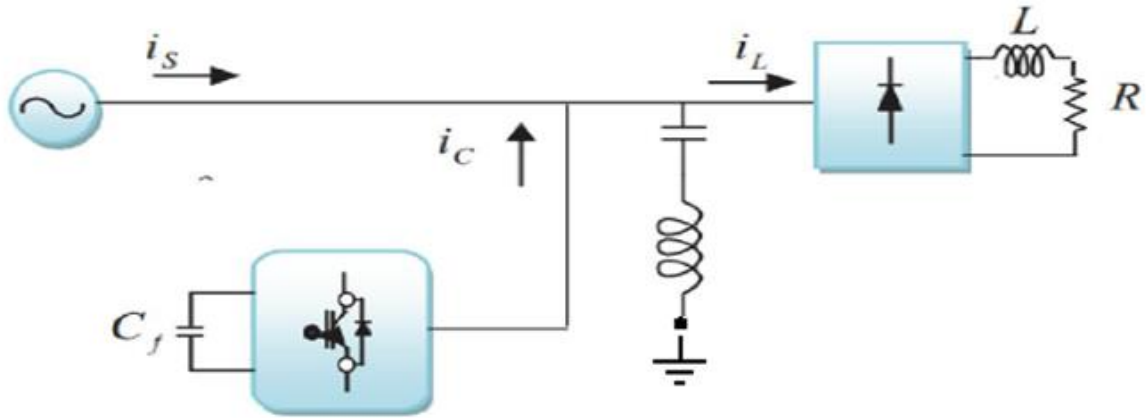


Figure II. 7. Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle.

Le filtre actif parallèle sert à compenser les harmoniques de courant de basses fréquences émises par la charge polluante, alors que le filtre passif accordé sur une fréquence harmonique élevée, permet de compenser les harmoniques de hautes fréquences.

2.3.2. Association d'un filtre actif parallèle et d'un filtre passif série

Dans cette configuration, les deux filtres actif et passif sont directement connectés en série, sans l'intermédiaire d'un transformateur. L'ensemble est connecté en parallèle sur le réseau comme il est présenté dans la figure II.8.

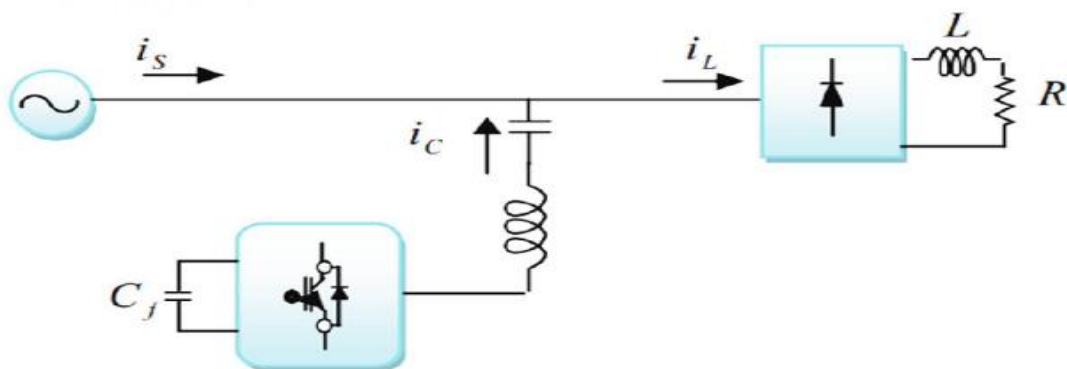


Figure II. 8. Filtre actif parallèle avec filtre passif série.

Dans ce cas, le filtre passif se comporte comme une impédance faible à la fréquence d'accord et comme une grande impédance à la fréquence fondamentale. Ce système présente deux avantages ; le dimensionnement en puissance du filtre actif est encore plus réduit du fait

que le courant qui le traverse est plus faible et le filtre actif est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

2.3.3. Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle

Le rôle du filtre actif série dans ce cas est d'empêcher les harmoniques de courant de circuler vers le réseau et de les obliger à passer par les filtres passifs raccordés à leurs fréquences.

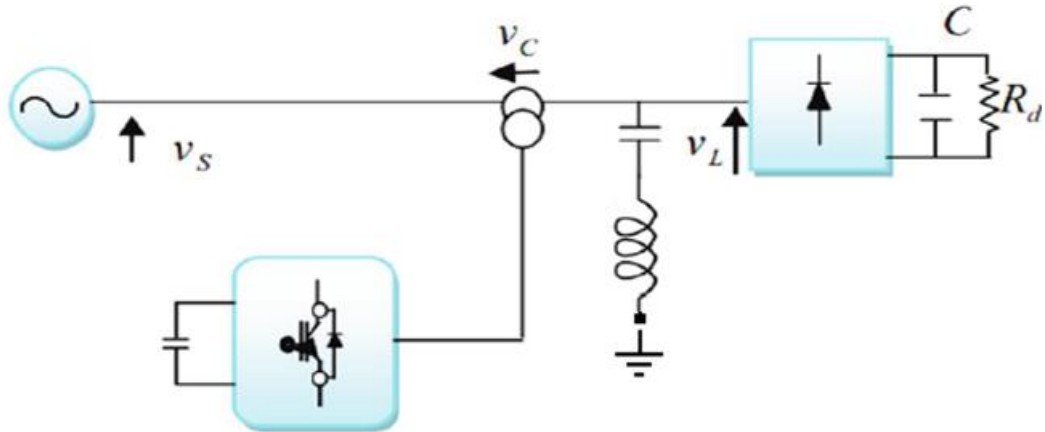


Figure II. 9. Filtre actif série avec filtre passif parallèle.

2.3.4. Association d'un filtre actif série et un filtre passif parallèle

Le principe de fonctionnement de cette configuration est le même que le précédent. Il a l'avantage de réduire encore le dimensionnement du filtre actif série car le courant qui le traverse est faible, de plus, le filtre actif série est à l'abri d'un éventuel court-circuit de la charge.

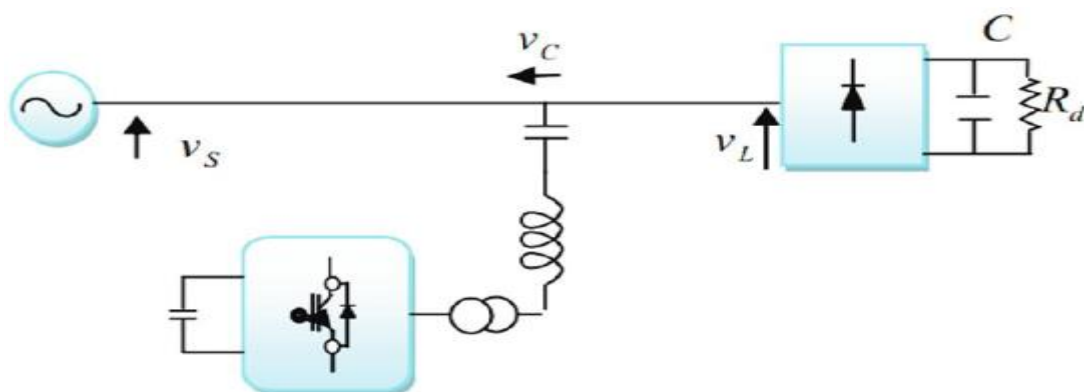


Figure II. 10. Filtre actif parallèle avec filtre passif parallèle.

Dans notre travail nous étudierons la structure générale de FAP, les différents types et le principe de commande des différents interrupteurs de l'onduleur.

3. LE FILTRE ACTIF PARALLELE(FAP)

3.1. Définition

Le filtre actif parallèle(FAP) est un onduleur de tension à modulation à largeur d'impulsions, il injecte dans le réseau des harmoniques de courant égaux et en opposition de phase à celles absorbées par la charge polluante. Les performances d'un filtre actif parallèle dépendent en grande partie du type de modulation mise en œuvre pour la commande des interrupteurs, du dimensionnement des éléments de couplage au réseau, du système de stockage et de la dynamique des algorithmes d'extraction et de contrôle des courants.

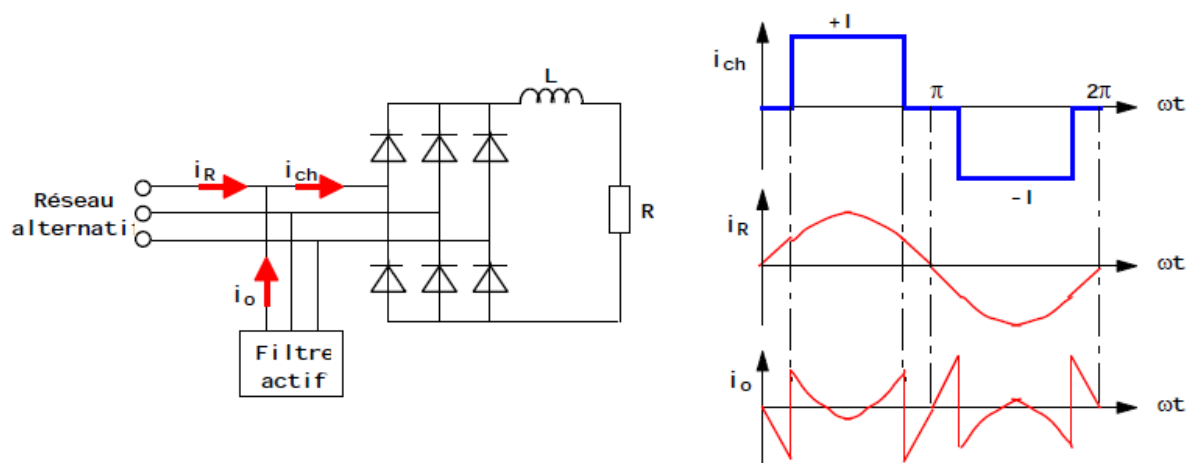


Figure II. 11. Principe de FAP.

3.2. Type du filtre actif parallèle

3.2.1. Filtre actif parallèle à trois niveaux à structure NPC

Les onduleurs à plusieurs niveaux sont en cours d'étude. L'onduleur à trois niveaux est l'un des convertisseurs populaires les plus utilisés dans des applications en moyenne et grande puissance. Leurs avantages incluent la capacité de réduire le contenu harmonique. Plus le niveau de l'onduleur augmente, plus le niveau des harmoniques diminue.

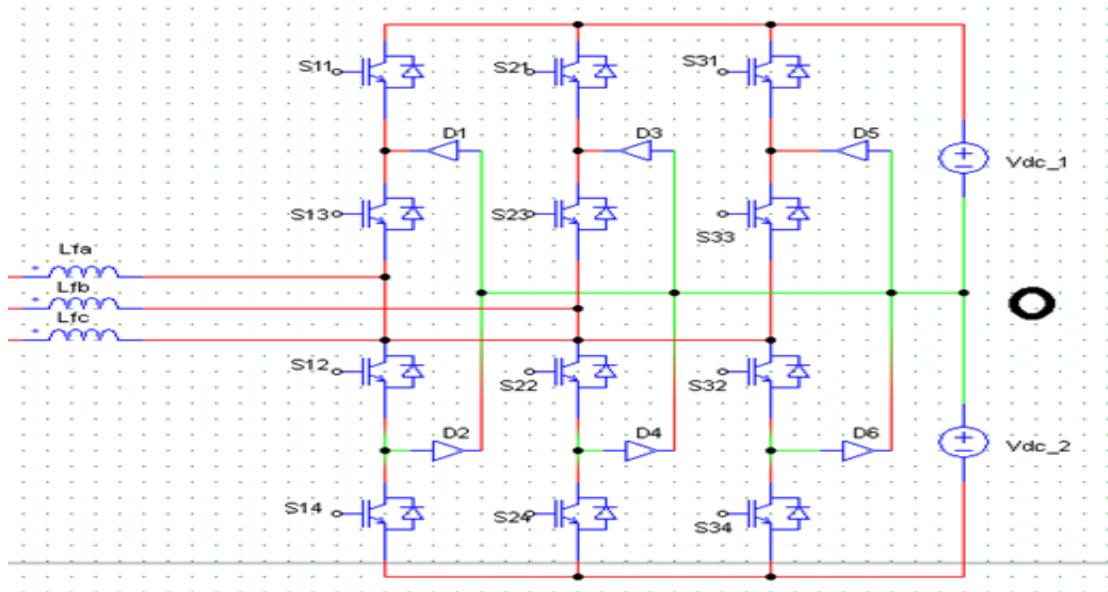


Figure II. 12. *Filtre actif parallèle à trois niveaux à structure de tension.*

La Figure III.12 montre le circuit d'alimentation du point neutre de l'onduleur à trois niveaux basé sur les six interrupteurs principaux (S11, S21, S31, S14, S24, S34) de l'onduleur traditionnel à deux niveaux, avec six interrupteurs auxiliaires (S12, S13, S22, S23, S32, S33) et deux diodes neutres clampées ajoutées sur chaque bras de pont. Les diodes servent à établir la connexion avec le point de référence O pour obtenir des tensions du point médian.

➤ Principe de commande des interrupteurs

Le principe de commande des différents interrupteurs électroniques de l'onduleur est basé sur le fait que dans le premier bras, (S11 et S12) sont commandés par une même impulsion de gâchette et la commande des interrupteurs (S13 et S14) est complémentaire à celle de (S11 et S12).

La commande des autres bras (phase B et phase C) est décalée par rapport à celle du premier bras (phase A) de 120° et 240° respectivement.

Afin de produire une tension de N-Niveaux, N-1 capacités sont nécessaires. La tension est égale à $V_{dc} / (N-1)$, V_{dc} étant la tension totale de la source ($V_{dc} = V_{dc_1} + V_{dc_2}$).

L'onduleur fournit trois niveaux de tensions selon : $V_{i0} = K_i * V_{dc} / 2$.

V_{i0} : la tension de la phase par rapport au point fictive O.

K_i : la variable d'état de commutation ($K_i = 1, 0, -1$).

V_{dc} : la tension continue.

i : l'indice de phase ($i=a, b, c$)

3.2. 2. Filtre actif parallèle à cinq niveaux à structure NPC

La Figure III.13 représente la structure de l'onduleur à cinq niveaux à diodes flottantes. Un bras d'un tel onduleur comprend huit transistors avec leurs diodes antiparallèles. Chaque transistor est dimensionné de façon à bloquer la tension aux bornes d'une des sources du côté continu. Cette liaison (Clamping-Diodes) participe à la connexion de la borne de sortie aux niveaux intermédiaires de la tension continue d'entrée. La mise en série des diodes de liaison est indispensable pour avoir la même tension de blocage pour toutes les diodes.

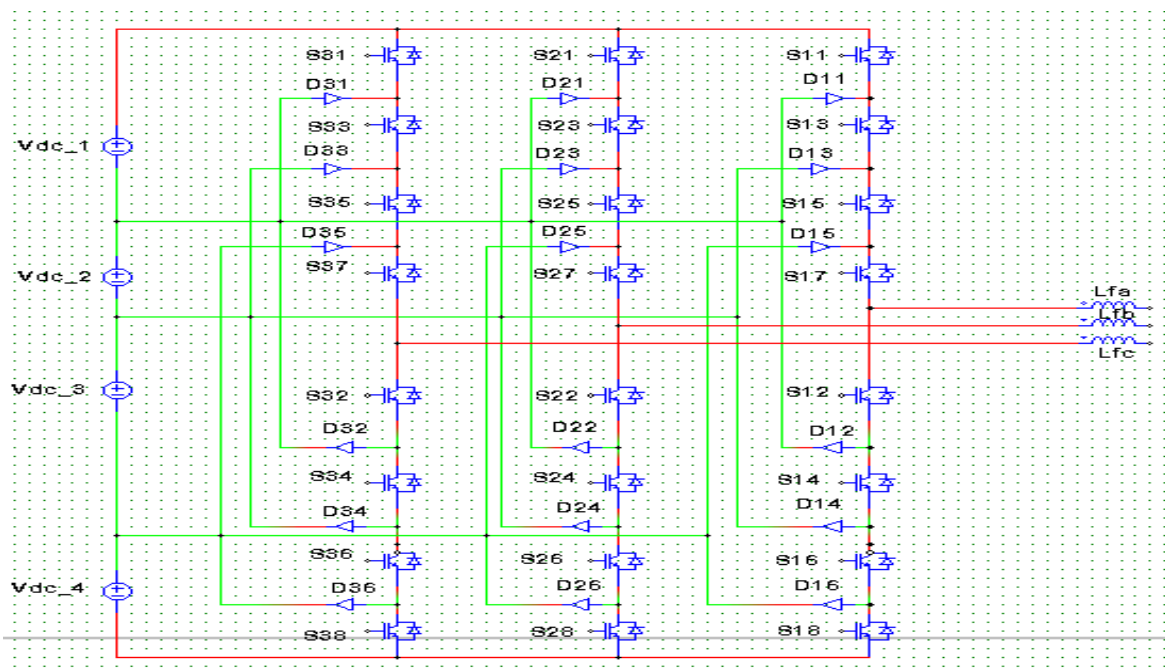


Figure II. 13. Filtre actif parallèle à cinq niveaux à structure de tension.

➤ Principe de commande des interrupteurs

Pour éviter de laisser en circuit ouvert, coté source de courant (ouverture de tous les interrupteurs) ou de créer un court-circuit coté bus continu (fermeture de tous les interrupteurs), une commande complémentaire doit être adoptée. Si F_{ki} représente la fonction de connexion de l'interrupteur S_{ii} (S_{11}, S_{12}, \dots), définie par $F_{ki} = 1$ lorsque cet interrupteur est fermé et $F_{ki} = 0$ lorsqu'il est ouvert, la commande complémentaire retenue est caractérisée par une relation liant les fonctions de connexion des interrupteurs d'un bras k comme suit :

$$F'_{ki} = 1 - F_{ki} (5-1), \quad i=1, \dots, 4; \quad k=1, 2, 3;$$

Chapitre II : les filtres anti-harmoniques

Le tableau III.1, donne les états possibles d'un bras k tout en tenant compte de la commande complémentaire choisie. L'état 1 signifie que l'interrupteur correspondant est fermé et l'état 0 qu'il est ouvert. Ce tableau montre que cette commande complémentaire permet d'exploiter les cinq niveaux de tension de sortie possibles pour un bras de l'onduleur.

Tableau II. 1. *Etats de l'onduleur à cinq niveaux et sa tension de sortie par rapport au point milieu M.*

F_{k7}	F_{k5}	F_{k3}	F_{k1}	F'_{k2}	F'_{k4}	F'_{k6}	F'_{k8}	V _{kM}
1	1	1	1	0	0	0	0	$V_{dc_1} + V_{dc_2}$
1	1	1	0	1	0	0	0	V_{dc_1}
1	1	0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	V_{dc_3}
0	0	0	0	1	1	1	1	$V_{dc_3} + V_{dc_4}$

4. IDENTIFICATION DES HARMONIQUES DE COURANT DE REFERENCE

4.1. Définition

La charge polluante absorbe un courant constitué d'une composante fondamentale et de composantes harmoniques. Le but du filtrage actif est la génération d'harmoniques de courants de même amplitudes mais en opposition de phase avec ceux absorbés par la charge. Ainsi, le courant absorbé du réseau sera sinusoïdal. Il est donc nécessaire d'identifier avec précision les harmoniques de courant de la charge polluante.

Plusieurs algorithmes d'identification des grandeurs harmoniques de référence et de nombreuses techniques de commande et de régulation ont été développés depuis la mise en place des premiers filtres actifs. Afin de générer les signaux de référence servant à la commande du filtre actif, nous avons utilisé les algorithmes de commande suivants :

- Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées.
 - Commande à l'aide de FPB (filtre passe bas).

Chapitre II : les filtres anti-harmoniques

- Commande à l'aide de FMV (filtre multi variable).
- **Nouvelle commande à l'aide de FMV modifiée que l'on a développé.**
- Méthode du référentiel synchrone (PLL).

4.2. Méthodes d'identification des harmoniques de courant de référence

4.2.1. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées

a. Commande à l'aide de FPB

Cette méthode est basée sur la mesure des variables instantanées triphasées présentes sur le réseau électrique avec ou sans composantes homopolaires. Cette méthode est valide aussi bien en régime permanent qu'en régime transitoire. [21]

Dans cet algorithme de contrôle, les mesures des tensions et des courants exprimés sous forme triphasée (a,b,c) sont converties en système biphasé (α, β) équivalents à l'aide de la transformée de Concordia qui laisse la puissance invariante:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.2)$$

La puissance réelle instantanée p et la puissance réactive instantanée q peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.3)$$

La puissance réelle instantanée ainsi que la puissance imaginaire instantanée peuvent être exprimées de la façon suivante :

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \dots\dots\dots (2.5)$$

Avec :

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

Chapitre II : les filtres anti-harmoniques

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

- \tilde{p} et \tilde{q} des puissances alternatives liées à la somme des composantes perturbatrices du courant et de la tension.

En conséquence, l'élimination de la composante fondamentale dans les équations 2.4 et 2.5 s'effectue à l'aide de filtre passe-bas de Butterworth (figure II.14) d'ordre deux.

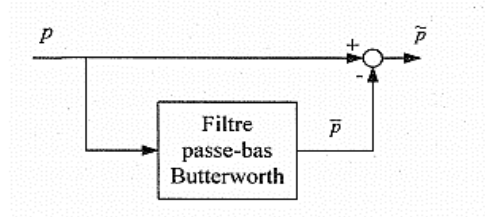


Figure II. 14. Filtrage de la composante de la puissance continue.

Par l'expression (2.3) on trouve :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.6)$$

Pour extraire l'expression des courants de référence en fonction de la puissance instantanée dans l'espace α - β , on obtient par :

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \dots\dots(2.7)$$

Pour compenser simultanément la puissance réactive et les courants harmoniques générés par la charge non linéaire, les courants de référence doivent être calculés en fonction de \tilde{q} , \tilde{p} et \bar{q} comme suit :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \bar{q} \end{bmatrix} \dots\dots(2.8)$$

Les courants de compensation de référence se calculent par la formule suivante

$$\begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.9)$$

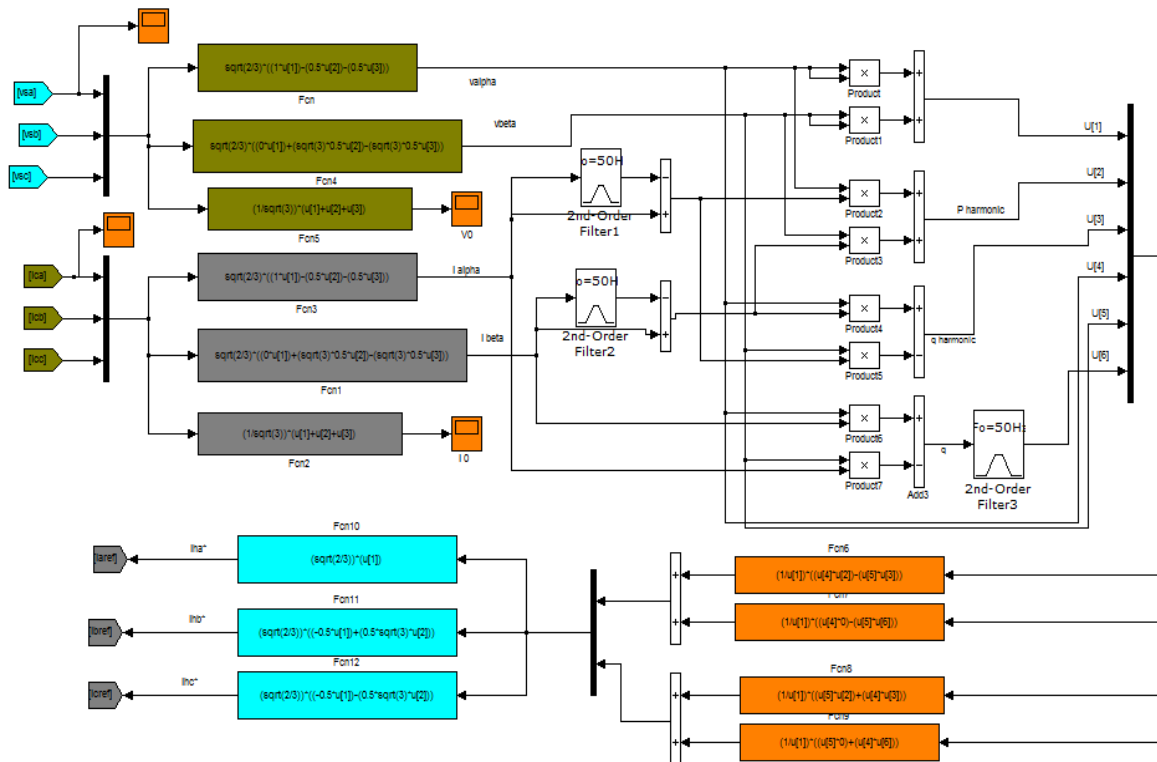


Figure II. 15. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FPB dans Matlab / Simulink.

b. Commande à l'aide de FMV

- **La raison de développer le FMV :**

Ce filtre(FPB) d'extraction permet d'obtenir une élimination plus ou moins satisfaisante de la composante continue, car leur caractéristique concernant le résidu harmonique est différente. Il n'a pas donné entière satisfaction car :

- Pour obtenir une extraction satisfaisante, le régime dynamique est lent. En général, la fréquence de coupure est choisie assez basse, entre 5 Hz et 35 Hz, ce qui engendre alors une instabilité du filtre actif de puissance.

- Dans le cas contraire, si l'on choisit une fréquence de coupure plus élevée, la précision de la détermination de la composante alternative est altérée et peut s'avérer insuffisante.

Pour ces raisons, un nouveau type de filtre d'extraction nommé ici Filtre Multi Variable (FMV) a été développé.

Chapitre II : les filtres anti-harmoniques

○ **Principe du FMV**

Le filtre multi-variable est un filtre d'extraction, il est hautement sélectif, il a été développé au sein du laboratoire de Nancy. Son principe de base s'appuie sur les travaux de Song Hong-Scok et est basé sur l'extraction de la composante fondamentale ou harmonique des signaux d'entrée (tension ou courant), directement selon les axes (α , β). [17]

○ **Modèle mathématique du ' FMV' :**

Le modèle mathématique a été développé la première fois par Song Hong-Scok; la relation entre les grandeurs d'entrées et de sorties ayant un effet intégral comme le montre l'expression (2.10)

$$\hat{i}_{\alpha\beta}(t) = e^{jw_c t} \int e^{-jw_c t} i_{\alpha\beta}(t) dt \dots\dots\dots (2.10)$$

Où :

$i_{\alpha\beta}$: Le courant électrique d'entrée selon les axes (α , β).

$\hat{i}_{\alpha\beta}$: La composante du courant qui passe dans le filtre FMV.

w_c : La pulsation de coupure

La transformation de Laplace de l'équation (2.10), donne,

$$H(s) = \frac{\hat{i}_{\alpha\beta}(s)}{i_{\alpha\beta}(s)} = \frac{s+jw_c}{s^2+w_c^2} \dots\dots\dots (2.11)$$

Le développement de cette fonction de transfert dans [24], [17], donne le résultat suivant:

$$H(s) = \frac{\hat{i}_{\alpha\beta}(s)}{i_{\alpha\beta}(s)} = k2 \frac{(s+k1)+jw_c}{(s+k1)^2+w_c^2} \dots\dots\dots (2.12)$$

Il est démontré dans [17], que pour obtenir ($|H(s)|= 0$ dB) et un angle de déphasage nul entre l'entrée $i_{\alpha\beta}$ et la sortie $\hat{i}_{\alpha\beta}$ le choix de $k1 = k2 = k$ est nécessaire.

La fonction de transfert devient alors :

$$H(s) = \frac{\hat{i}_{\alpha\beta}(s)}{i_{\alpha\beta}(s)} = k \frac{(s+k)+jw_c}{(s+k)^2+w_c^2} \dots\dots\dots(2.13)$$

Chapitre II : les filtres anti-harmoniques

Où :

k : constante à fixer par le diagramme de Bode.

La figure II.16 présente le diagramme de Bode qui illustre les performances du filtre FMV accordé sur la pulsation fondamentale ($\omega_c = 2\pi f$ et $f = 50\text{Hz}$) pour différentes valeurs du paramètre K :

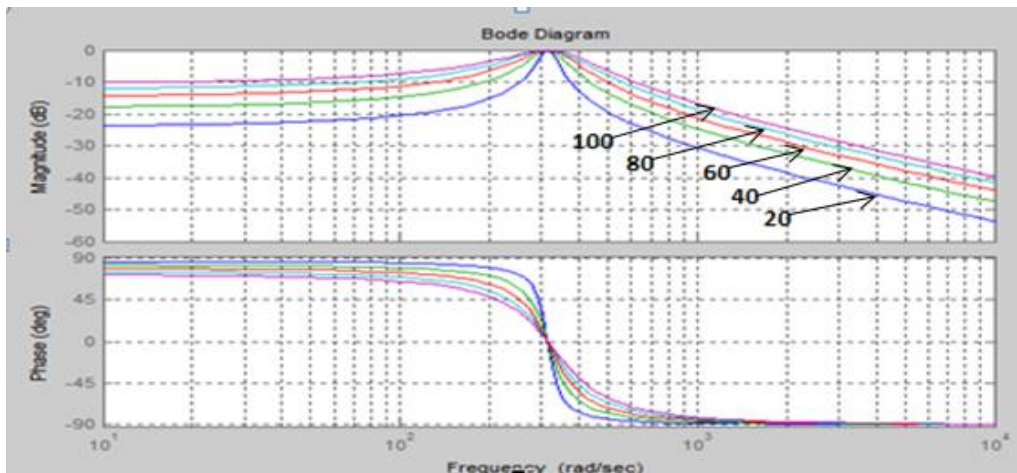


Figure II. 16. Diagramme de Bode d'un FMV.

On remarque qu'il n'y a pas de déphasage à la pulsation ω_c . On peut noter aussi que la sélectivité augmente lorsque k diminue. [17]

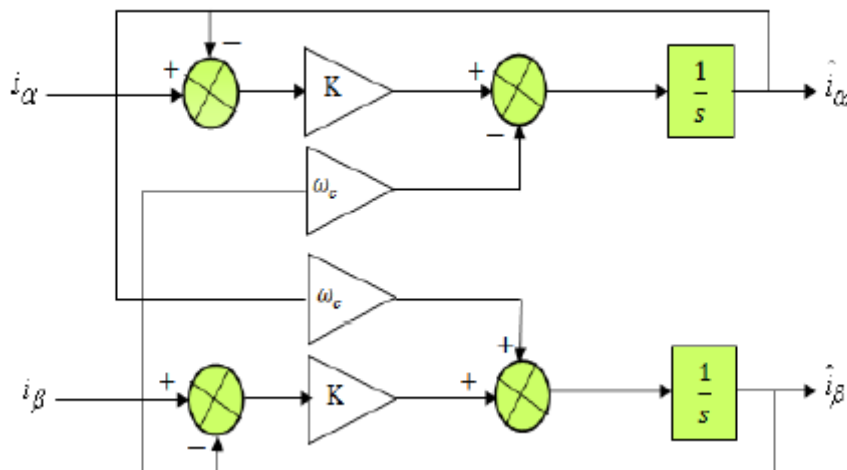


Figure II. 17. Schéma de circuit du FMV

Selon les axes (α, β) , les expressions liant les composantes $\hat{i}_{\alpha\beta}$ (la composante fondamentale de $i_{\alpha\beta}$) en sortie du FMV aux composantes d'entrée $i_{\alpha\beta}$ sont les suivantes :

$$\hat{i}_\alpha = \left(\frac{k}{s} [i_\alpha(s) - \hat{i}_\alpha(s)] - \frac{wC}{s} \hat{i}_\beta(s)\right) \dots\dots\dots (2.14)$$

$$\hat{i}_\beta = \left(\frac{k}{s} [i_\beta(s) - \hat{i}_\beta(s)] + \frac{wC}{s} \hat{i}_\alpha(s)\right) \dots\dots\dots (2.15)$$

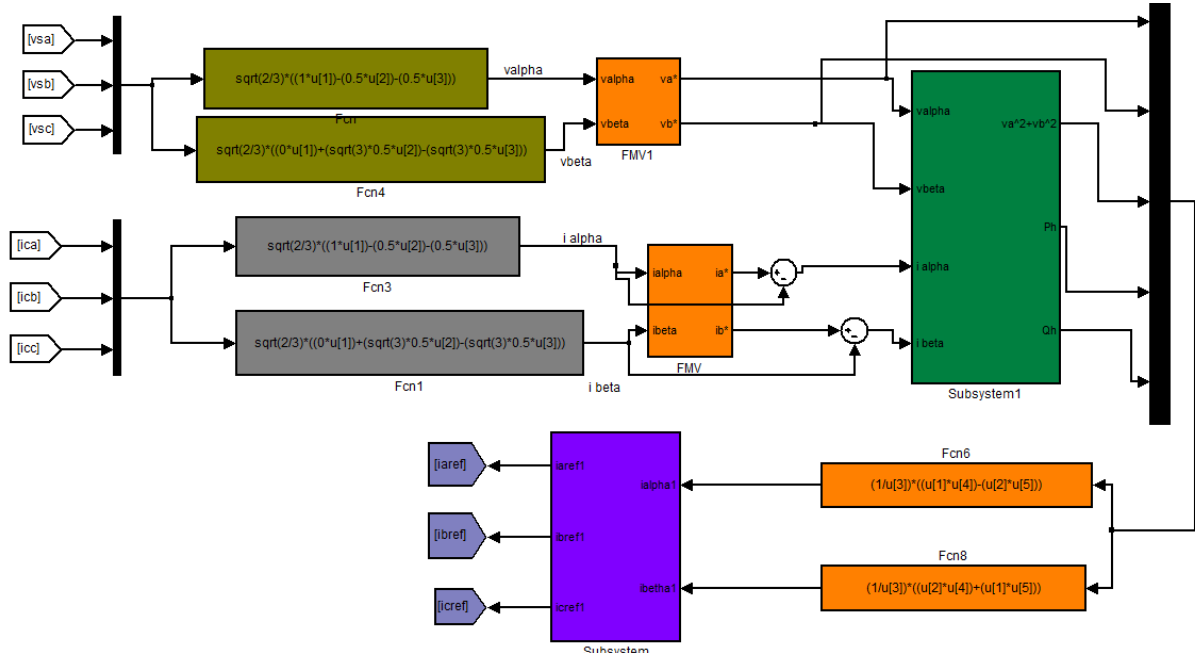


Figure II. 18. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV dans Matlab / Simulink.

La puissance active harmonique p_h et la puissance réactive harmonique q_h peuvent être exprimées de façon équivalente en système biphasé par :

$$\begin{bmatrix} p_h \\ q_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & \hat{V}_\beta \\ -\hat{V}_\beta & \hat{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.16)$$

Où, $\tilde{i}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha$ et $\tilde{i}_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$

Pour compenser simultanément la puissance réactive et les harmoniques de courant générés par la charge non linéaire, les courants de référence doivent être obtenus en fonction de \tilde{q}, \tilde{p} comme ce qui suit :

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \frac{1}{\hat{v}_\alpha^2 + \hat{v}_\beta^2} \begin{bmatrix} \hat{V}_\alpha & -\hat{V}_\beta \\ \hat{V}_\beta & \hat{V}_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.17)$$

Avec :

$$\begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -p_h \\ -q_h \end{bmatrix}$$

On obtient alors l'équation des courants de compensation de référence suivante :

$$\begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2.18)$$

4.2.2. Méthode du référentiel synchrone (PLL)

Cette méthode de filtrage consiste à transformer les coordonnées a-b-c du courant en coordonnées d-q et ce, à l'aide de la transformée de Park (équation (2.19)) en fixant la fréquence de celle-ci en synchronisme avec celle du réseau.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin(wt) & \sin(wt - \frac{2\pi}{3}) & \sin(wt + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(wt) & \cos(wt - \frac{2\pi}{3}) & \cos(wt + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} \dots (2.19)$$

Où $\theta = wt$ représente la position angulaire du repère tournant.

La référence harmonique des courants dans le repère stationnaire sera extraite à l'aide d'un FMV. Les courants sur les axes d et q peuvent être décomposés en deux composantes comme suit:

$$i_d = \bar{i}_d + \tilde{i}_d \dots\dots\dots (2.20)$$

$$i_q = \bar{i}_q + \tilde{i}_q \dots\dots\dots (2.21)$$

La transformation d-q en α - β donne :

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_{dh} \\ \tilde{i}_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(wt) & \sin(wt) \\ -\sin(wt) & \cos(wt) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.22)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(wt) & -\sin(wt) \\ \sin(wt) & \cos(wt) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.23)$$

Avec : $\begin{bmatrix} \tilde{i}_d \\ \tilde{i}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\tilde{i}_{dh} \\ -\tilde{i}_{qh} \end{bmatrix}$

Chapitre II : les filtres anti-harmoniques

On peut alors calculer les courants de compensation de référence comme ce qui suit :

$$\begin{bmatrix} i_{aref} \\ i_{bref} \\ i_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} \dots\dots\dots (2.24)$$

Cette méthode est sensible aux variations de la fréquence, d'où le besoin d'une boucle de verrouillage de phase (PLL). La méthode montre de meilleures performances dans des conditions imparfaites du système de tensions. [22]

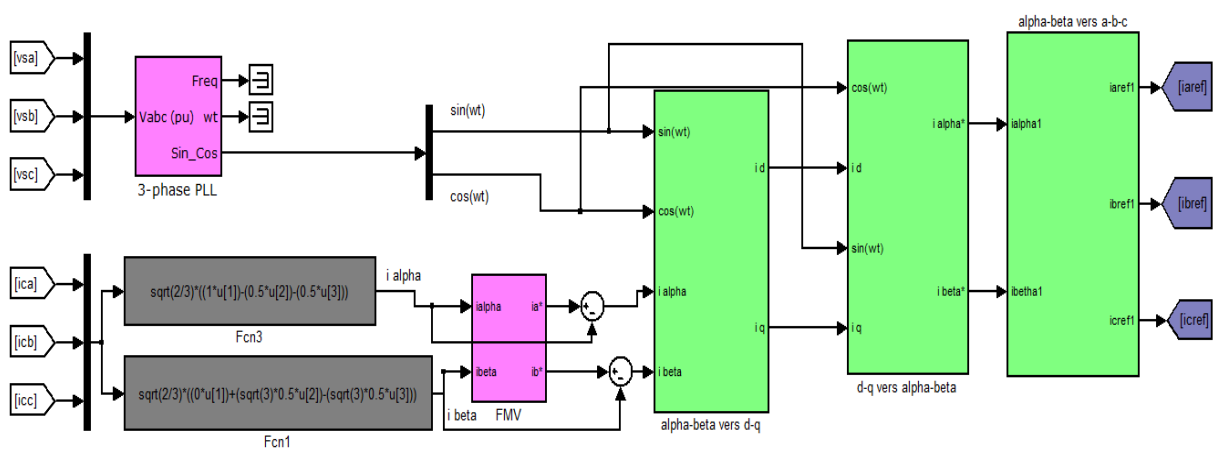


Figure II. 19. Méthode du référentiel synchrone à l'aide de FMV dans Matlab / Simulink.

Cet algorithme possède les caractéristiques suivantes :

- Cette méthode est inhérente aux systèmes triphasés, comme celle des puissances instantanées
- Elle peut être appliquée aussi bien aux systèmes triphasés équilibrés qu'aux systèmes triphasés avec neutre, déséquilibrés.
- Elle est basée sur des valeurs instantanées, ce qui lui donne de bons temps de réponse dynamique.
- Le nombre d'harmoniques compensées dépend de la bande passante des semi-conducteurs composant l'onduleur du filtre actif. Méthode de calcul simple.
- Découplage net entre le fondamental et les composantes harmoniques

5. Commande de l'onduleur

Le but de la commande de l'onduleur est le contrôle des courants à la sortie du filtre afin qu'ils suivent leurs références. Le principe est basé sur la comparaison entre les courants à la sortie du filtre actif et leurs références calculées à partir des différentes méthodes d'extraction et de régulation des harmoniques de courant.

Deux types de commandes des convertisseurs statiques sont principalement mis en œuvre : la commande par MLI et la commande par hystérésis que l'on va l'étudier.

a. Commande par MLI

La technique de commande par MLI : **la commande par modulation de largeur d'impulsion** résout le problème de la maîtrise de la fréquence de commutation en fonctionnant avec une fréquence fixe facile à filtrer en aval de l'onduleur.

La plus simple et la plus connue des modulations de largeur d'impulsion est sans doute la MLI à échantillonnage naturel. Cette technique de commande met en œuvre d'abord un régulateur qui détermine la tension de référence de l'onduleur (modulatrice) à partir de l'écart entre le courant mesuré et sa référence. Cette dernière est ensuite comparée avec un signal triangulaire (porteuse à fréquence élevée fixant la fréquence de commutation). La sortie du comparateur fournit l'ordre de commande des interrupteurs. Le Schéma de principe est donné par la figure II.20.

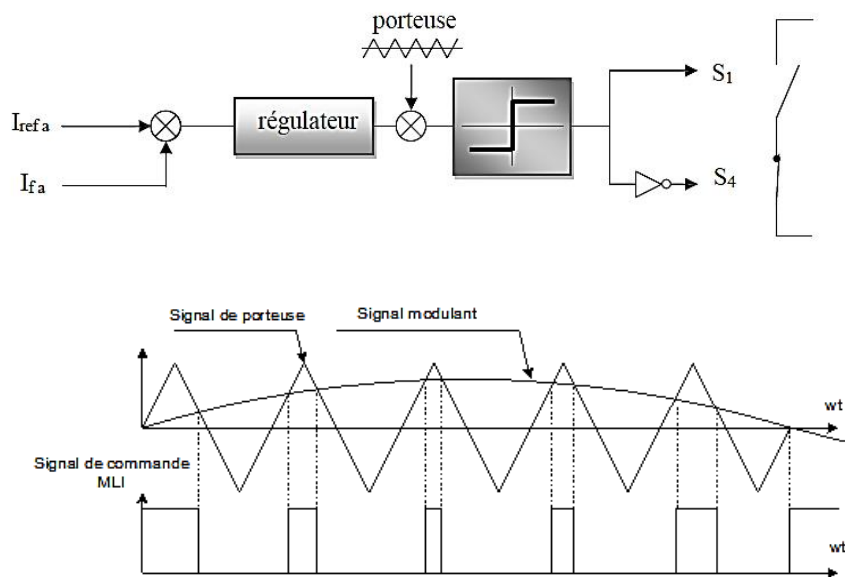


Figure II. 20. Principe de commande par MLI.

b. Commande par hystérésis

La commande par hystérésis appelée tout ou rien, utilise l'erreur existante entre le signal de référence et la mesure du signal de sortie. L'erreur est comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis; une règle pratique consiste à la prendre à 5% du courant nominal. Chaque sortie de ce gabarit entraîne un changement de configuration des interrupteurs figure II.21.

Ce système de contrôle est caractérisé par une fréquence de commutation variable. La mise en œuvre de cette stratégie de contrôle est relativement simple. Cette commande présente cependant un inconvénient majeur : elle ne permet pas de contrôler la fréquence de commutation des semi-conducteurs, d'où la présence d'un nombre important d'harmoniques dans les courants générés.

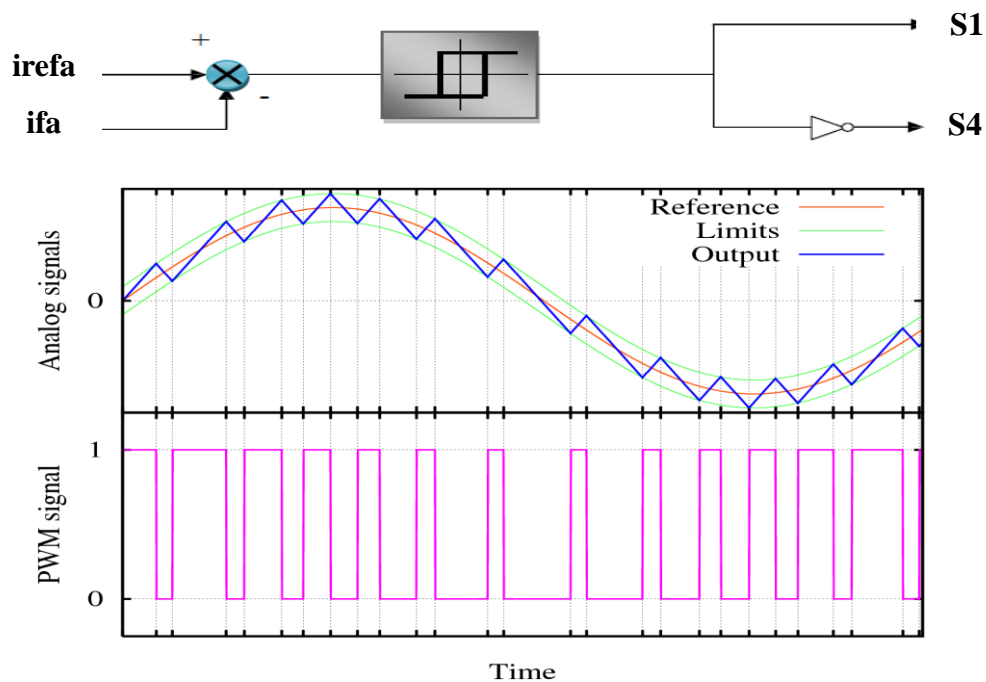


Figure II. 21. Principe de la commande du courant par hystérésis.

CONCLUSION

Dans ce troisième chapitre on a présenté en première partie la structure générale des filtres anti-harmonique et on a bien détaillé le filtre actif parallèle .

En deuxième partie on a étudié les méthodes d'identification des harmoniques de courant de référence.

En troisième partie on a expliqué les deux différentes méthodes de commande de l'onduleur.

Dans le prochain chapitre on va représenter les étapes de simulation d'un filtre actif parallèle à trois et cinq niveaux commandé par hystérésis avec les différentes méthodes d'identification des harmoniques de courant de référence.



CHAPITRE III
SIMULATION ET
INTERPRETATIONS



1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre les résultats de simulation de l'ensemble réseau-filtre actif parallèle-charge polluante avec l'utilisation de différentes méthodes d'identification des harmoniques de courant de référence sont présentés; cela va nous permettre d'étudier la validité fonctionnelle du filtre actif parallèle à travers plusieurs simulations.

Afin d'étudier deux type de FAP, celui à 3 niveaux et celui à 5 niveaux, ce chapitre a été reparté en deux parties.

Dans la première les résultats de simulation avant et après le filtrage actif parallèle d'une charge **moins pollué (charge R-L série)** contrôlé par hystérésis est présentée.

Dans la deuxième, on présente les résultats de simulation avant et après le filtrage actif parallèle d'une charge **très pollué (charge R-C parallèle)** contrôlé par hystérésis.

A la fin de chaque partie, une comparaison entre les résultats de simulation des différentes variantes a été présentée.

Les programmes de simulation développés ont été effectués en utilisant le logiciel Matlab-Simulink permettant de visualiser sur un intervalle de temps donné l'évolution des courants et de la tension dans les différentes parties du système.

2. PARAMETRE DE SIMULATION

Les paramètres utilisés en simulation suivants ont été utilisés dans la référence [23] :

Tableau III. 1. Valeurs des éléments caractérisant la structure étudiée.

Paramètres		Valeurs numériques
Réseau d'alimentation	Couplage	Etoile – triangle
	La puissance apparente nominale	630KVA
	La fréquence	50Hz
	La tension primaire efficace composée U1 RMS (Ph-Ph)	30KV
	La tension secondaire efficace composée U2 RMS (Ph-Ph)	400V
	Résistance de linge Rs	0.25mΩ
	Inductance de linge Ls	19.4 μH
Charge non-linéaire (pont de Graëtz à 6 thyristors alimentant une charge RL série)	Résistance de charge Rch	6.5Ω
	Inductance de charge Lch	0.02H
Charge non-linéaire (pont de Graëtz à 6 diodes alimentant une charge RC parallèle)	Résistance de charge Rch	20 Ω
	Condensateur de charge Cch	0.2mF
Inductance de correction	Inductance en amont de la charge polluante Lf	1.5 mH

3. PARAMETRE FILTRE ACTIF PARALLELE

Tableau III. 2. Paramètre Filtre actif parallèle.

Filtre actif parallèle à trois niveaux	
Tension continue $V_{dc1} = V_{dc2}$	400V
Inductance Lf	3mH
Commande hystérésis	
$\Delta I = \pm 0.01A$	

Filtre actif parallèle à cinq niveaux	
Tension continue $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc3} = V_{dc4}$	250V
Inductance L_f	6mH
Commande hystérésis	
$\Delta I = \pm 0.01A$	

4. SIMULATION CHARGE R-L & R-C, TROIS NIVEAUX

4.1. Charge R-L

4.1.1. Simulation de la charge R-L séries polluante avant filtrage

La simulation du courant et de la tension de sortie du transformateur ainsi que leurs spectres d'harmonique générés dans le réseau par une charge polluante R-L avant filtrage sont présentés ci-dessous.

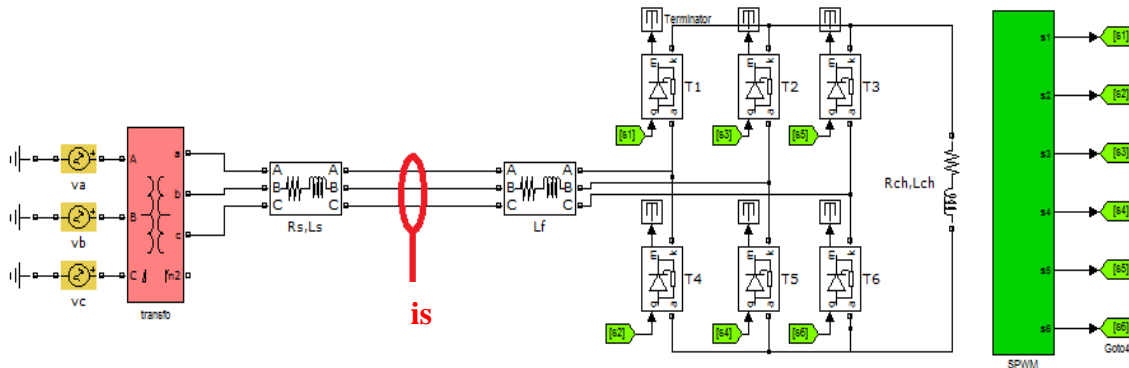


Figure III. 1. La charge R-L série polluante avant filtrage.

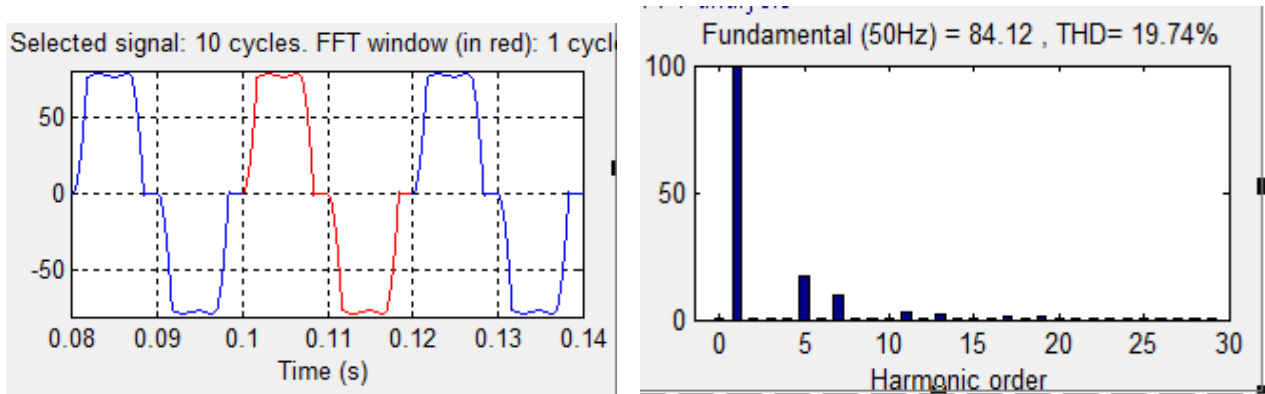


Figure III. 2. Courants de source (i_s) et son spectre harmonique avant compensation.

La figure III.2 représente le courant de source avant l'utilisation du filtre ; on remarque qu'il a une allure perturbée. Ce qui indique que la charge polluante a infecté le réseau et elle a généré un taux d'harmoniques de courant très élevé, exprimé par un THDi égale à 19,74% (réseau pollue et courant harmonique très élevés).

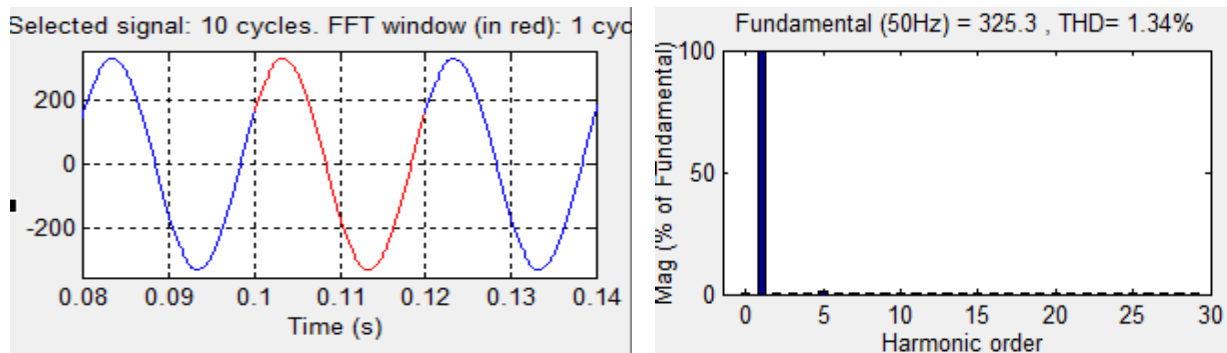


Figure III. 3. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique avant compensation.

Par contre, l'allure de la tension secondaire du transformateur (figure III.3) maintient une forme sinusoïdale. On constate que la charge polluante n'a pas infectée la tension, d'où le THDv est égale à 1.34%.

4.1.2. Simulation de la charge R-L séries polluante après filtrage

Dans cette partie, on introduit le filtre actif parallèle à trois niveaux commandé par hystérésis comme le montre la Figure (III.4).

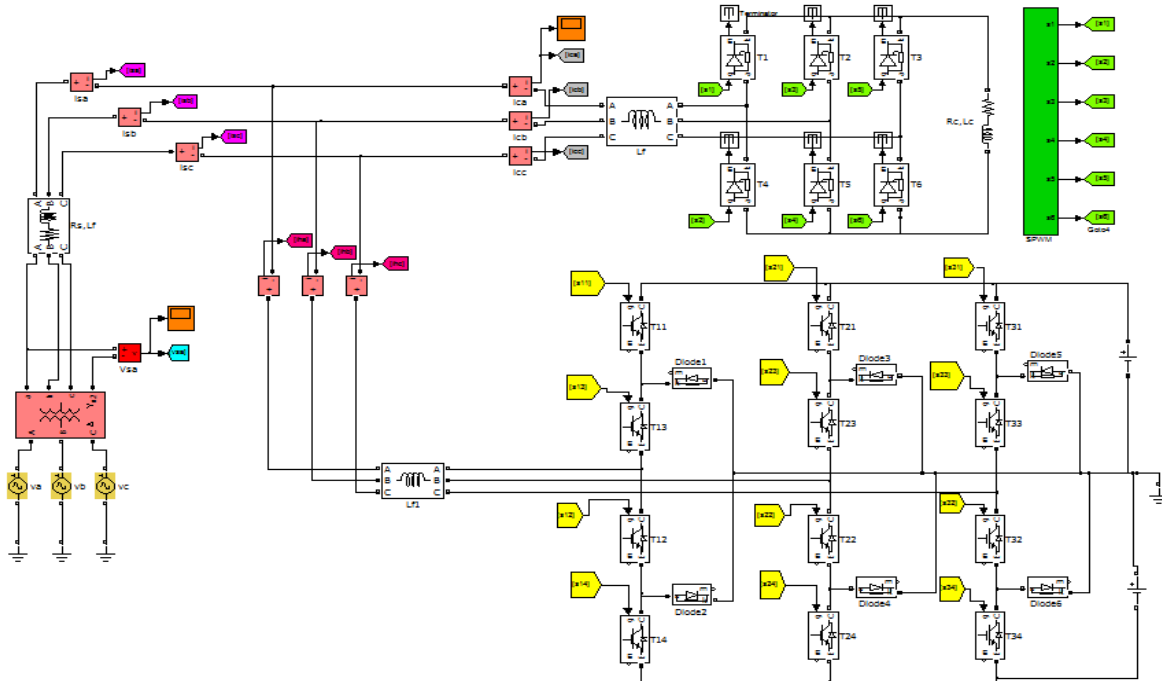


Figure III. 4. Modèle du filtre actif parallèle à trois niveaux avec la charge polluante R-L séries.

Bien que l'identification des harmoniques de courant de référence peut être réalisée par trois méthodes, on procède à appliquer chacune de ces dernières, dans le but de comparer les résultats de simulation :

a. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FPB

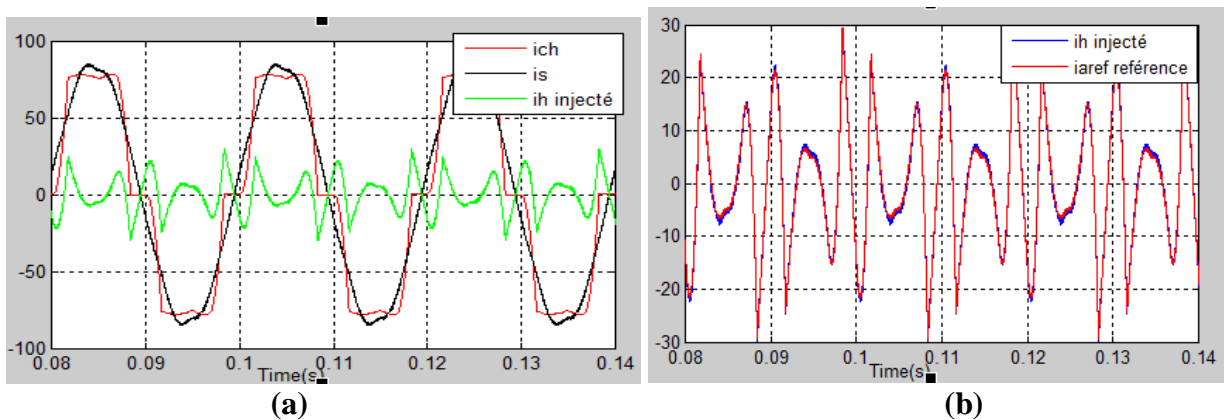


Figure III. 5. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h .

(b) Courant généré par le filtre actif i_h injecté et sa référence i_{aref} référence.

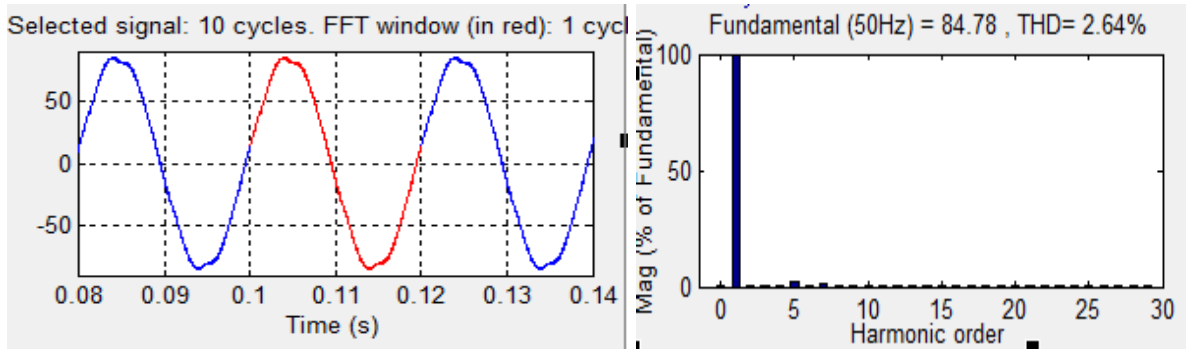


Figure III. 6. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

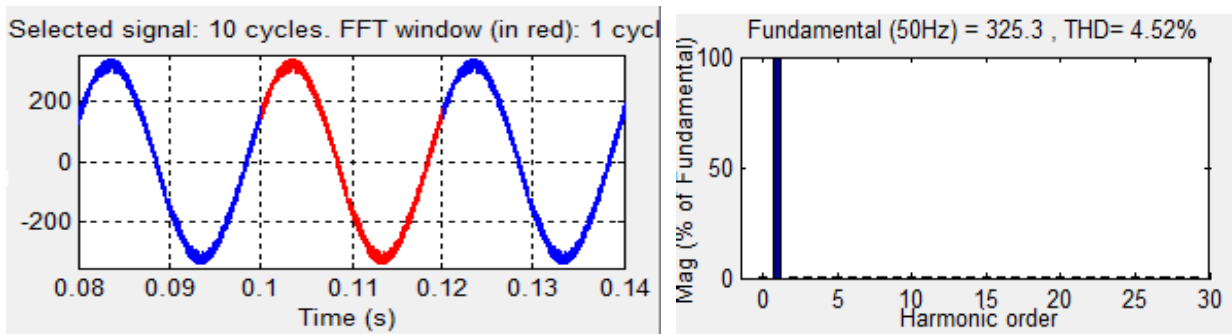


Figure III. 7. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

b. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV

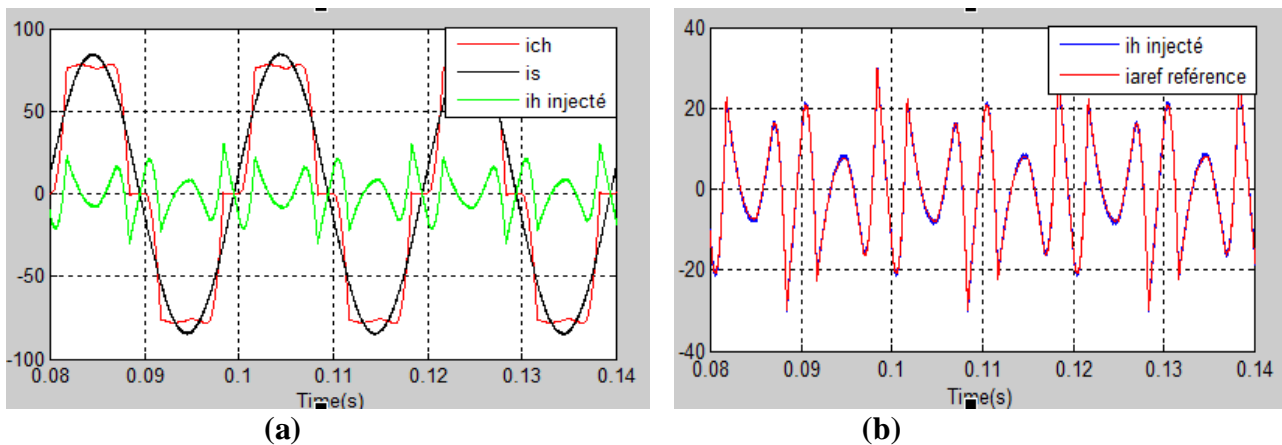


Figure III. 8. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecté par le filtre i_h .

(b) Courant généré par le filtre actif i_h injecté et sa référence i_{aref} référence.

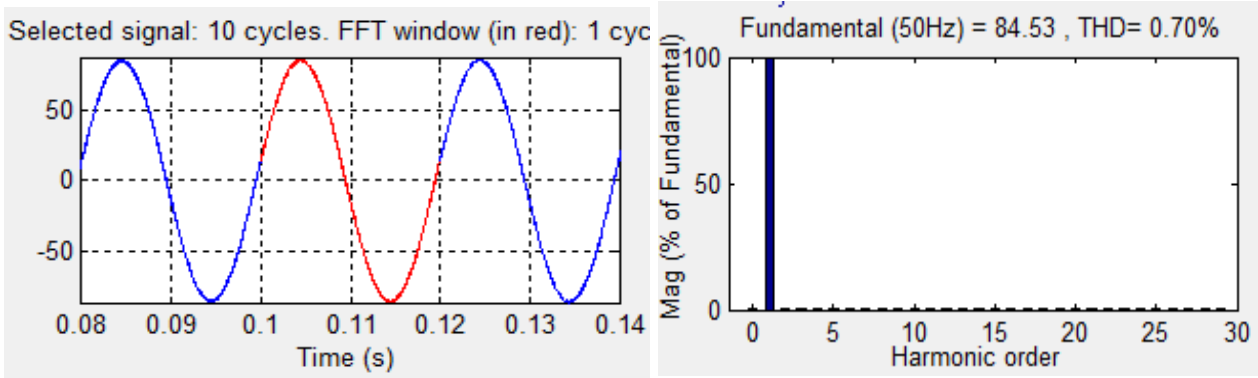


Figure III. 9. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

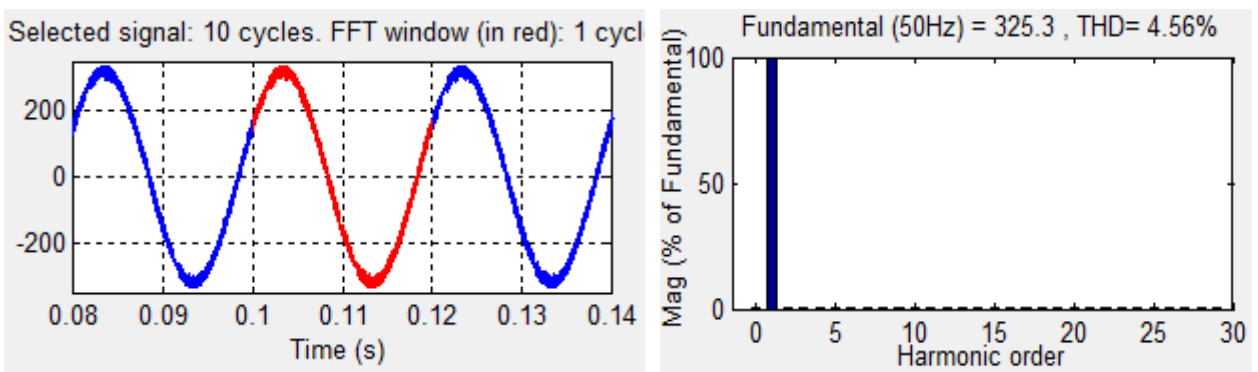


Figure III. 10. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

c. Méthode du référentiel synchrone (PLL)

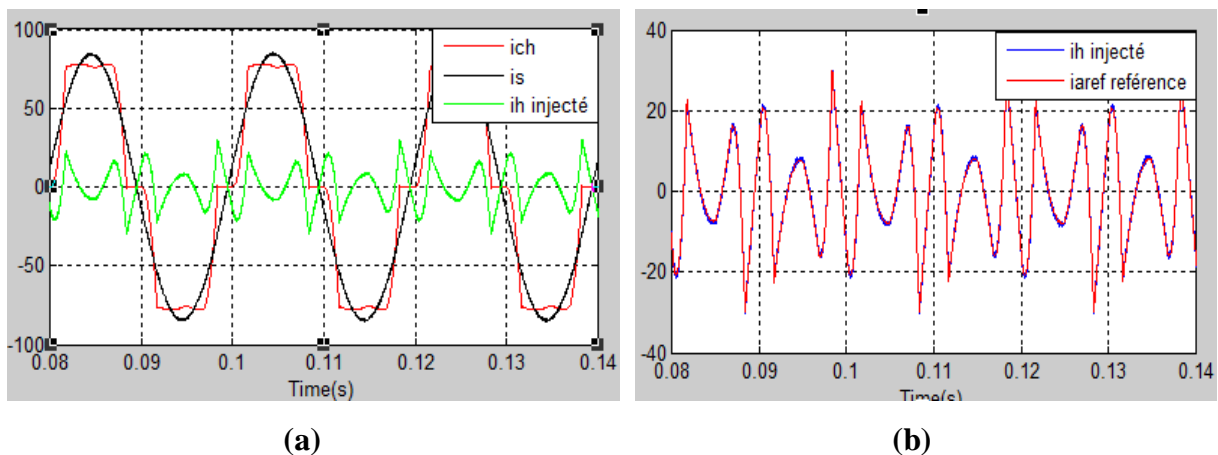


Figure III. 11. (a) Courant de charge ich, courant de source is et courant injecter par le filtre ih.

(b) Courant généré par le filtre actif ih injecté et sa référence iaref référence

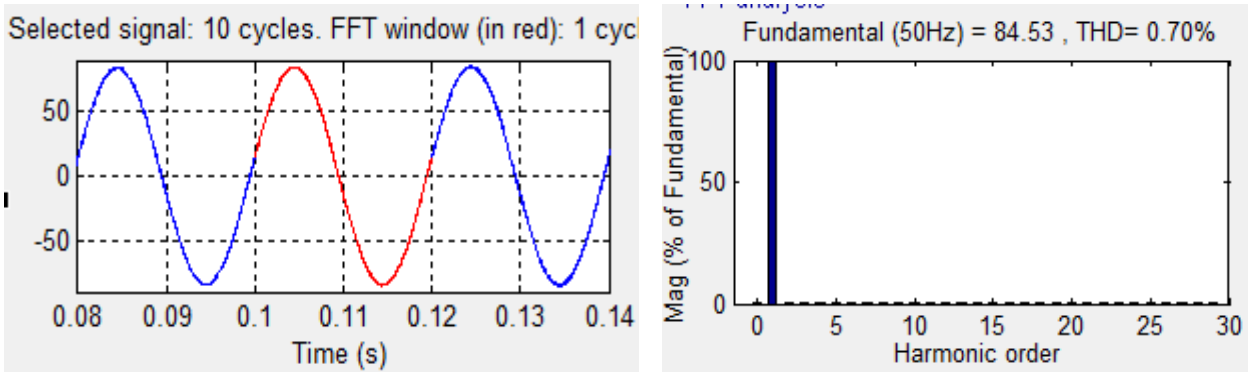


Figure III. 12. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

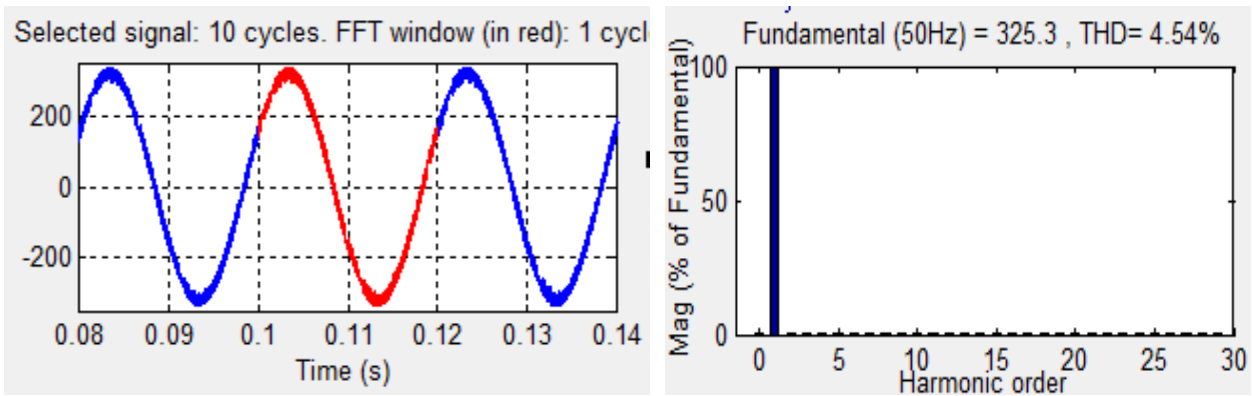


Figure III. 13. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

4.2. Charge R-C

4.2.1. Simulation de la charge R-C parallèle polluante avant filtrage

On considère une charge très polluante R-C avec un réseau net. Premièrement, on simule le système sans utilisation des FAP et on mesure les harmoniques de courant produits dans le réseau par la charge et la tension de sortie de transformateur.

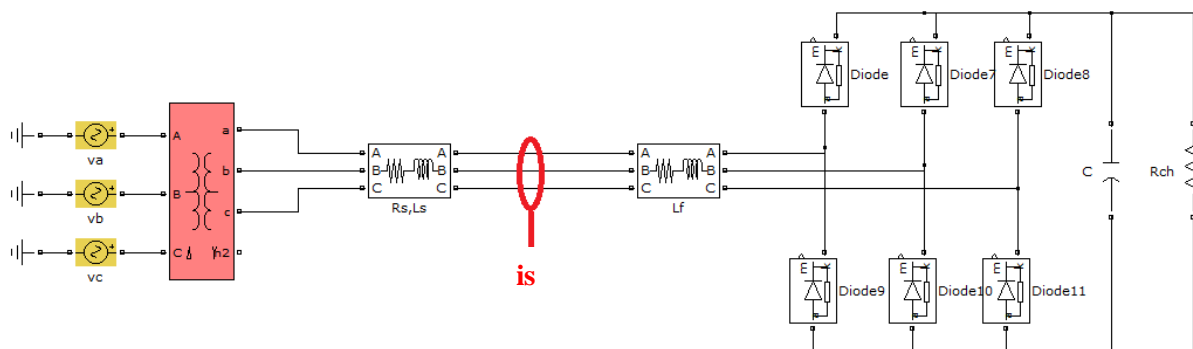


Figure III. 14. La charge R-C parallèle polluante avant filtrage.

Après avoir mesuré les courants et les tensions dans le réseau, nous obtenons les résultats suivants :

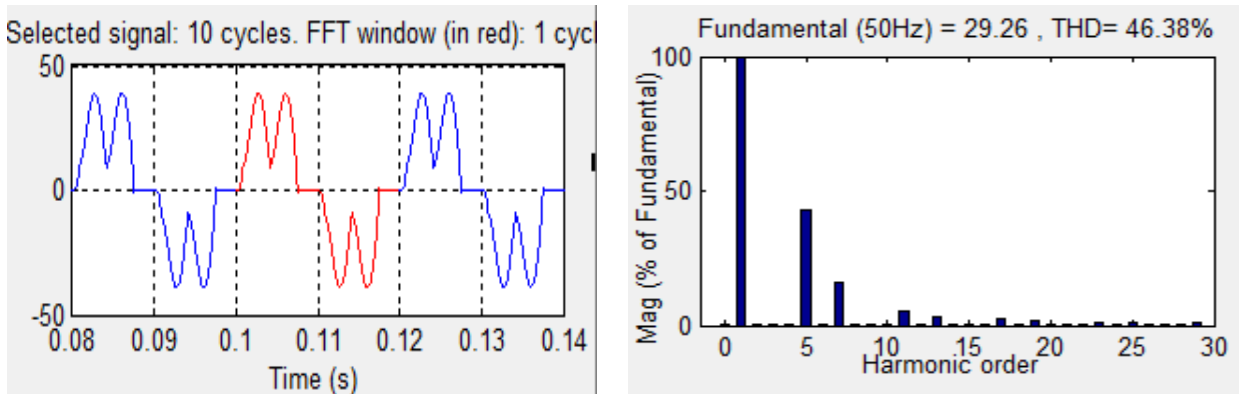


Figure III. 15. Courants de source (i_s) et son spectre harmonique avant compensation.

La figure III.15 représente l'allure du courant de source avant l'utilisation du filtre (FAP). On remarque une distorsion de l'allure du courant, due à la charge polluante qui infecte le réseau indiquant la présence d'un taux élevé d'harmoniques avec un THDi égale à 46.38% (réseau pollué et harmoniques de courant très élevées).

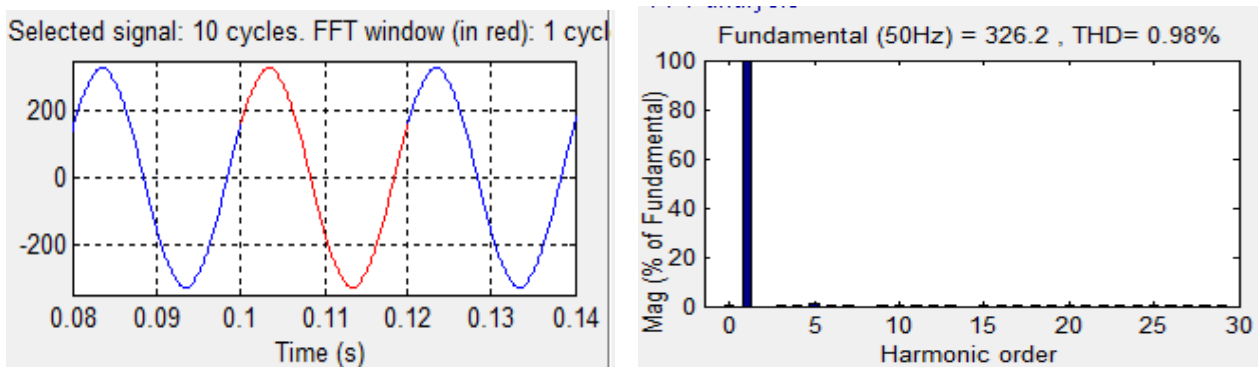


Figure III. 16. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique avant compensation.

La figure III.16 représente une allure sinusoïdale de la tension secondaire du transformateur avec un THDv égale à 0.98%. Cela indique que la tension n'a pas été infectée par la charge très polluante.

4.2.2. Simulation de la charge R-C parallèle polluante après filtrage

Afin d'illustrer les performances du filtre actif parallèle à trois niveaux commandé par hystérésis, on travaille sur le même réseau en présence d'une charge très polluante R-C parallèle avec l'ajout du FAP (figure III.17)

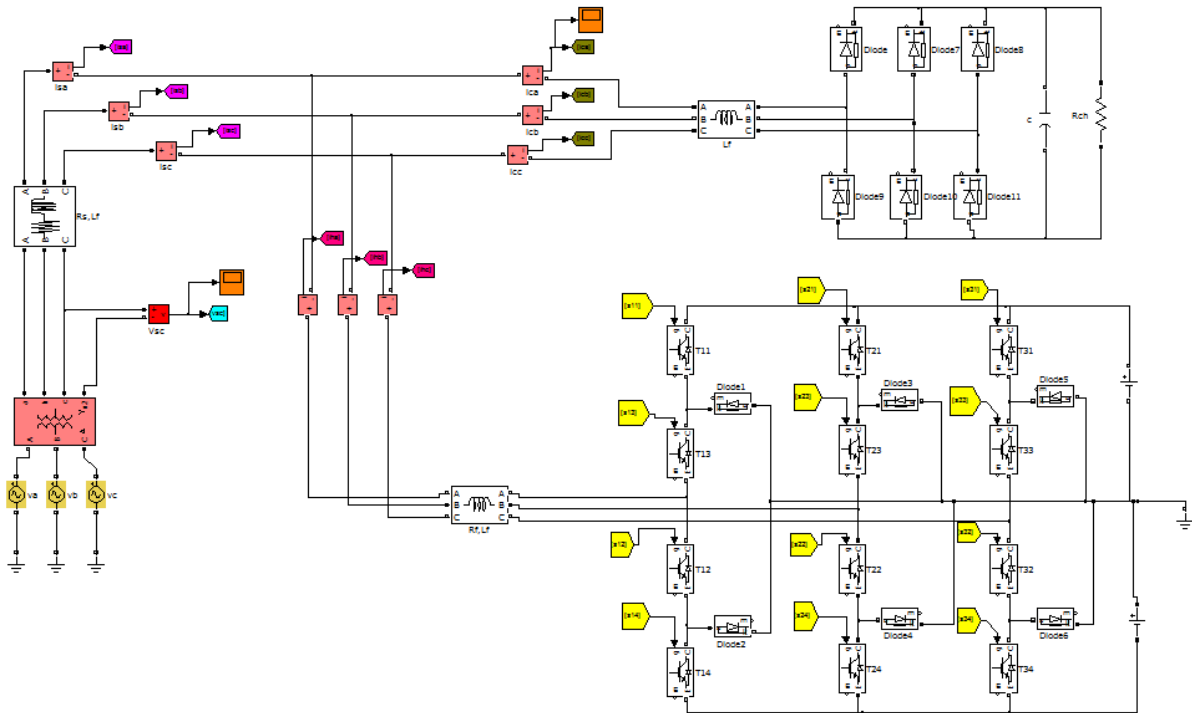


Figure III. 17. Modèle du filtre actif parallèle à trois niveaux avec la charge polluante R-C parallèle.

Les résultats de simulations des trois méthodes de l'identification des harmoniques de courant de référence avec la charge R-C sont présentés ci-dessous :

a. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FPB

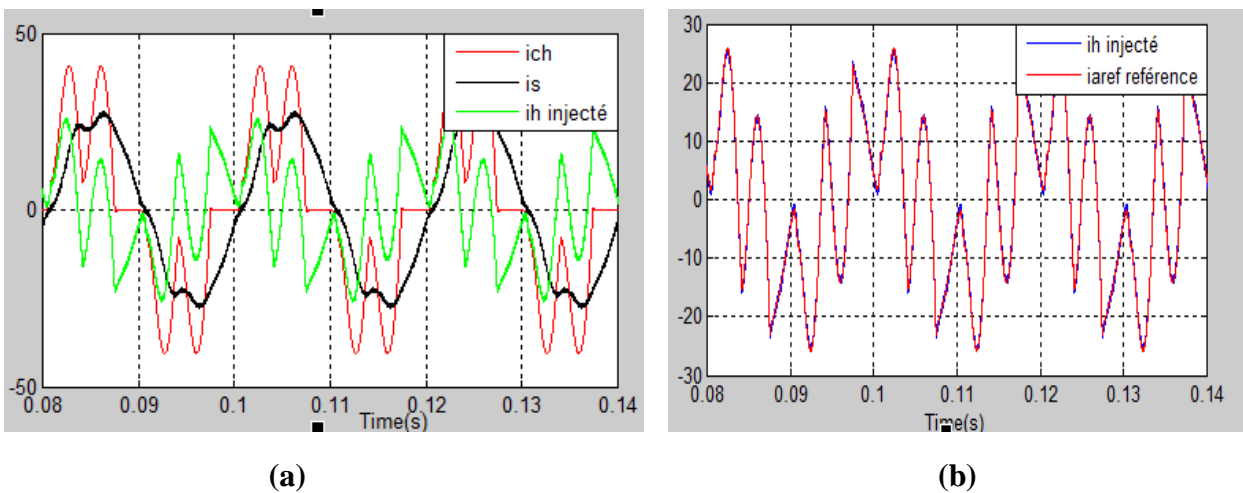


Figure III. 18. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h

(b) Courant généré par le filtre actif i_h injecté et sa référence i_{aref} référence

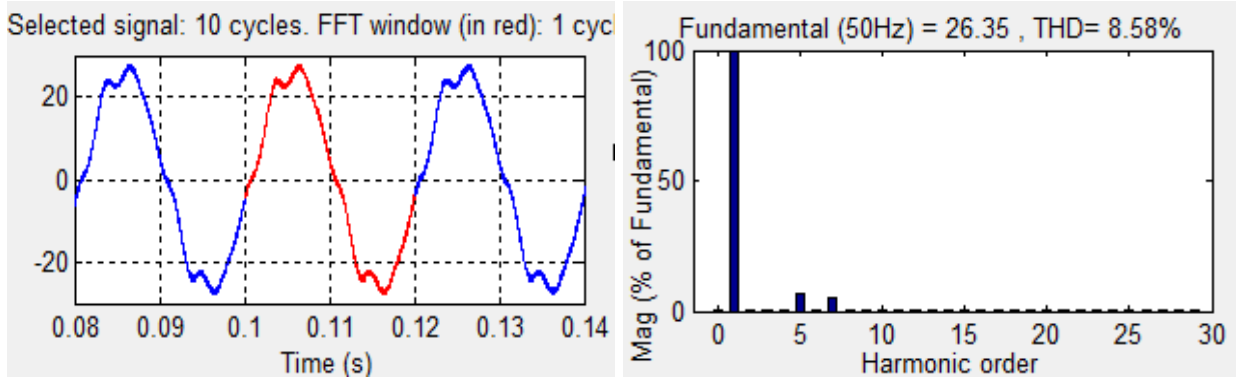


Figure III. 19. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

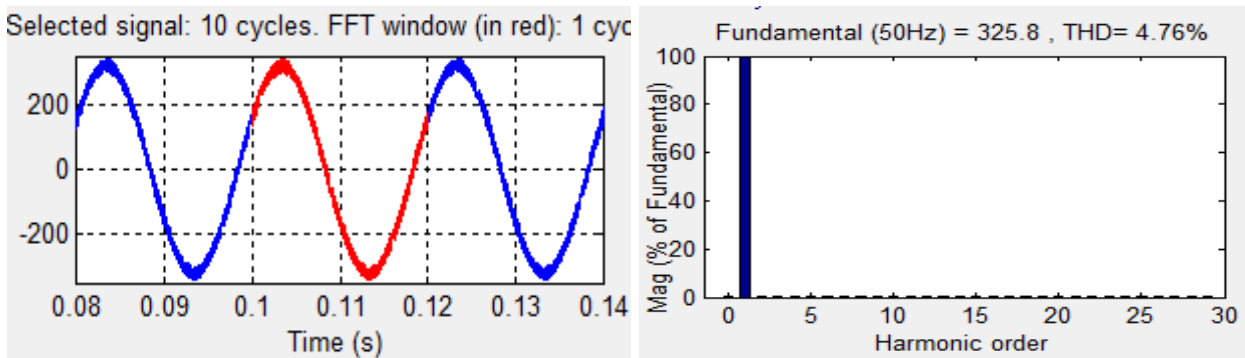


Figure III. 20. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

b. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV

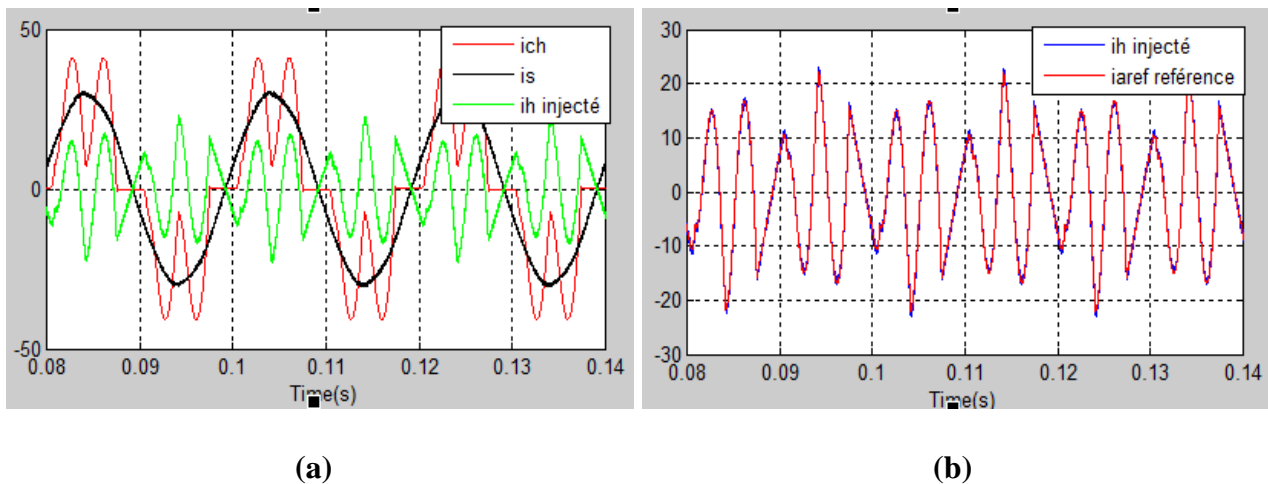


Figure III. 21. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h .

(b) Courant généré par le filtre actif i_h injecté et sa référence i_{aref} référence.

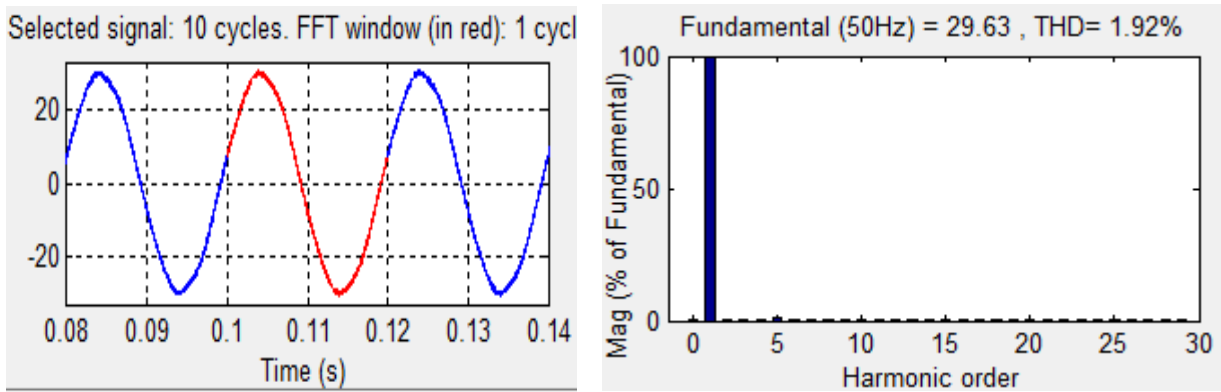


Figure III. 22. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

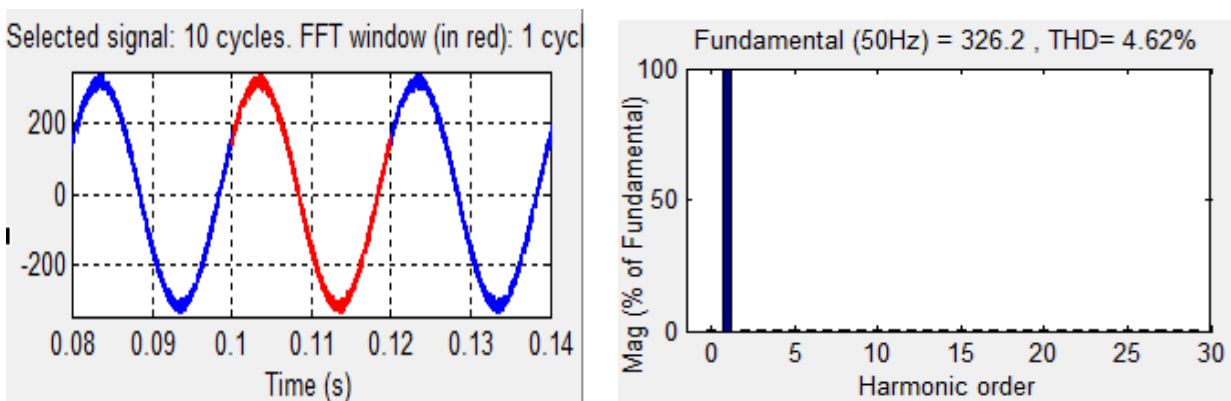


Figure III. 23. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

c. Méthode du référentiel synchrone (PLL)

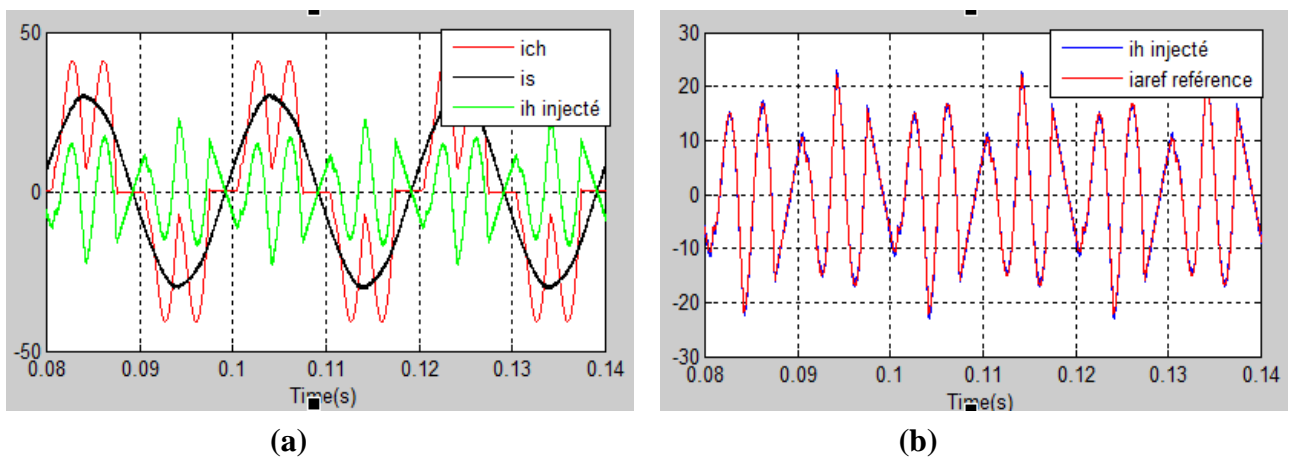


Figure III. 24. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h

(b) Courant généré par le filtre actif i_h injecté et sa référence i_{aref} référence

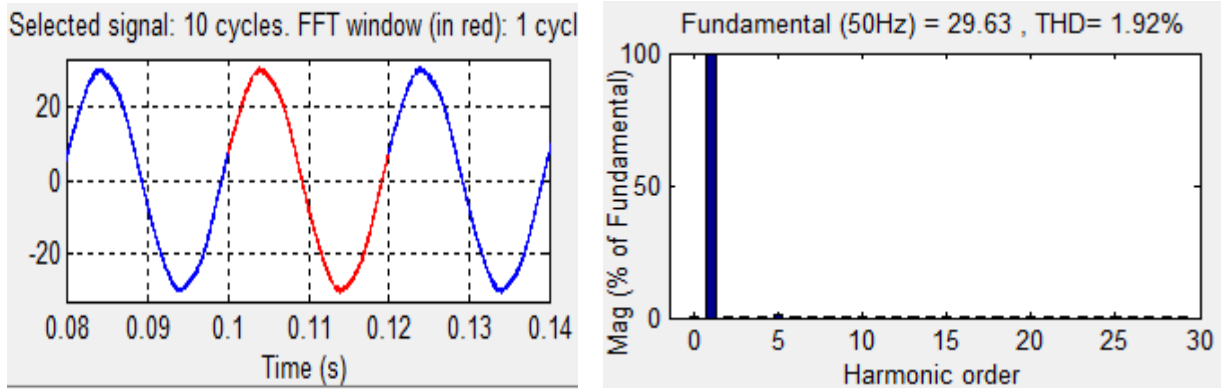


Figure III. 25. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

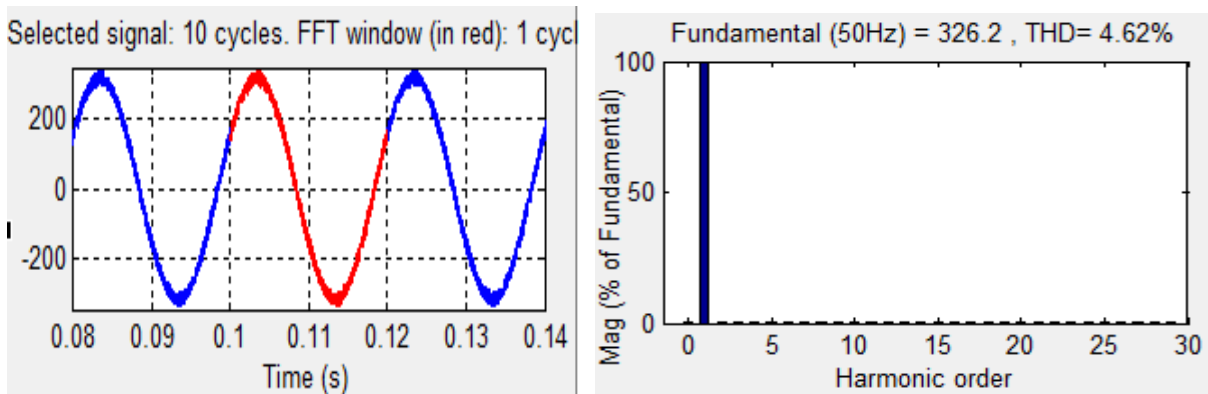


Figure III. 26. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

4.3. Comparaison et discussion

Le tableau ci-dessous récapitule le taux de distorsion dans les deux cas de charge polluante R-L et R-C, avant et après filtrage :

Tableau III. 3. Comparaison des résultats.

FAP \ THDi%	Avant filtrage	Après filtrage		
		FPB	FMV	PLL
Charge R-L	19.74%	2.64%	0.70%	0.70%
Charge R-C	46.38%	8.58%	1.92%	1.92%

Le courant de source (i_s) avant compensation de la charge R-L et R-C, possède des pollutions harmoniques avec un taux de distorsion de 19.74% et 46.38% respectivement.

Chapitre III : Simulation et Interprétations

L'allure du courant de source n'est pas sinusoïdale comme la montre les figure (III.2) et (III.15).

Les figures (III.18 – III.26) illustrent les résultats de simulations des trois méthodes du FAP. Pour les deux méthodes FMV et PLL, après compensation, au moment où l'onduleur commence à générer les harmoniques de courant inverses (i_h injecté) vers le réseau, on remarque que le courant de source (i_s) commence à récupérer sa forme sinusoïdale. On remarque aussi que le THDi n'a pas été affecté par la charge, qu'elle soit moins polluante (R-L) ou très polluante (R-C). D'après le tableau III.3, on remarque des résultats de THDi très proches pour ces deux méthodes, et que celles-ci éliminent correctement les harmoniques de courant.

Contrairement à l'algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide du filtre passe bas (FPB) qui est de forme presque sinusoïdale, on remarque que pour une charge moins polluante (R-L) on a un THDi élevé comparé aux autres méthodes, indiquant un mauvais fonctionnement. Pour la charge très polluante (R-C) le THDi dépasse la norme ($\text{THDi} \leq 5\%$), et les caractéristiques du filtre ne sont pas acceptables.

En ce qui concerne la tension de sortie du transformateur, elle reste toujours dans les normes ($\text{THDv} \leq 5\%$).

5. SIMULATION CHARGE R-L & R-C NIVEAUX CINQ

Dans le but d'améliorer encore plus les résultats déjà obtenus avec un FAP à 3 trois niveaux, on a procédé à étudier un niveau supérieur (niveau 5) du FAP.

Dans la partie précédente on a prouvé l'efficacité des deux méthodes FMV et PLL. Bien que les résultats entre ces deux méthodes étaient très proches, on a opté pour l'utilisation de la méthode la plus efficace d'identification des harmoniques de courant de référence, la FMV.

5.1. Simulation de la charge R-L séries polluante après filtrage

Dans cette partie, on introduit le filtre actif parallèle à cinq niveaux commandé par hystérésis comme montre la Figure (III.27).

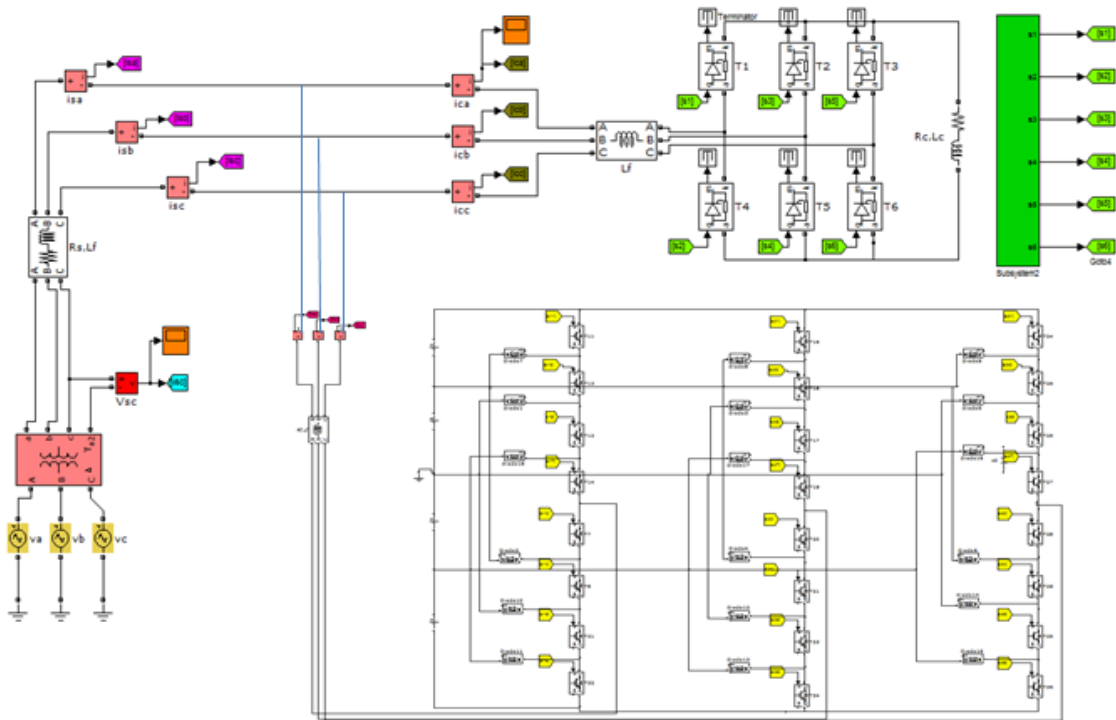


Figure III. 27. Modèle du filtre actif parallèle à cinq niveaux avec la charge polluante R-L séries.

Les résultats suivants représentent la réponse du filtre actif parallèle en présence d'une charge moins polluante R-L, avec l'utilisation du FMV comme méthode d'identification :

a. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV

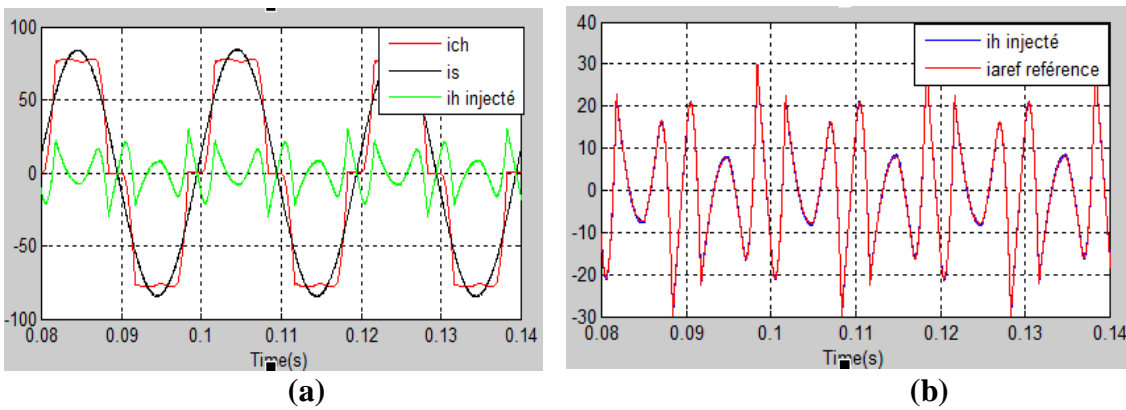


Figure III. 28. (a) Courant de charge *ich*, courant de source *is* et courant injecter par le filtre *ih*.

(b) Courant généré par le filtre actif *ih injecté* et sa référence *iaref référence*.

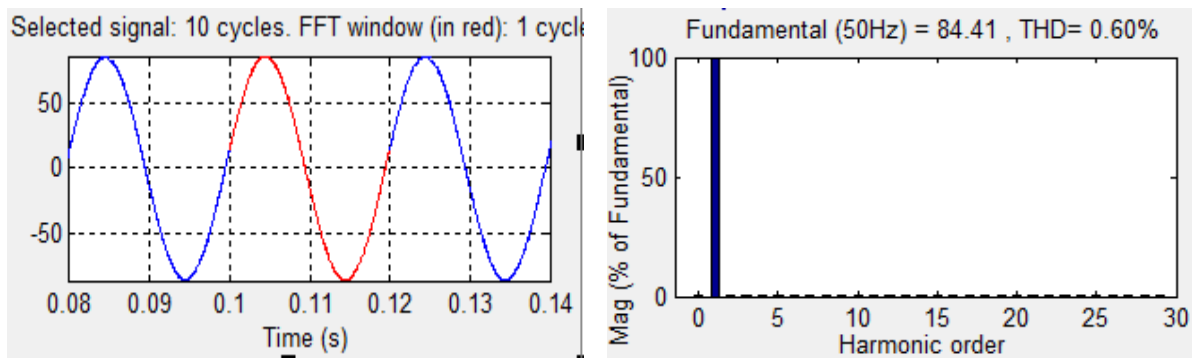


Figure III. 29. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

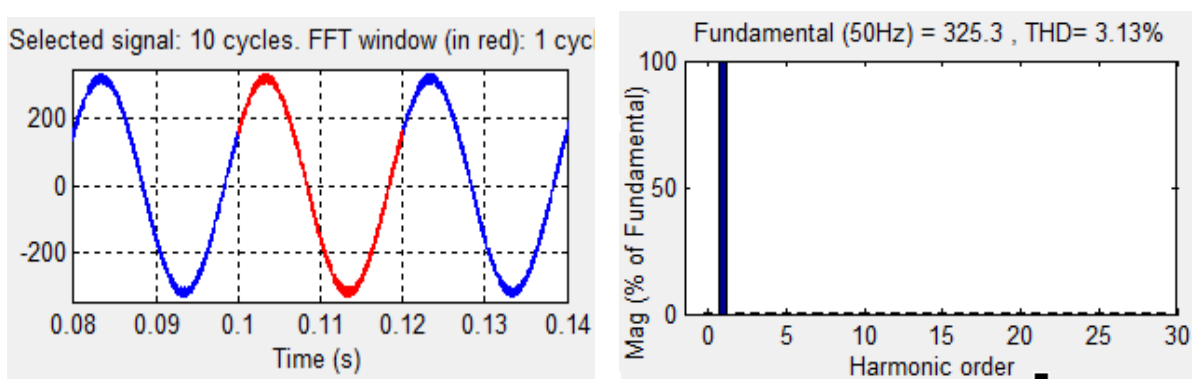


Figure III. 30. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

5.2. Simulation de la charge R-C parallèle polluante après filtrage

Ce qui suit, présente l'étude du réseau en présence d'une charge très polluante R-C, après l'ajout du filtre actif parallèle à cinq niveaux commandé par hystérésis (figure III.17)

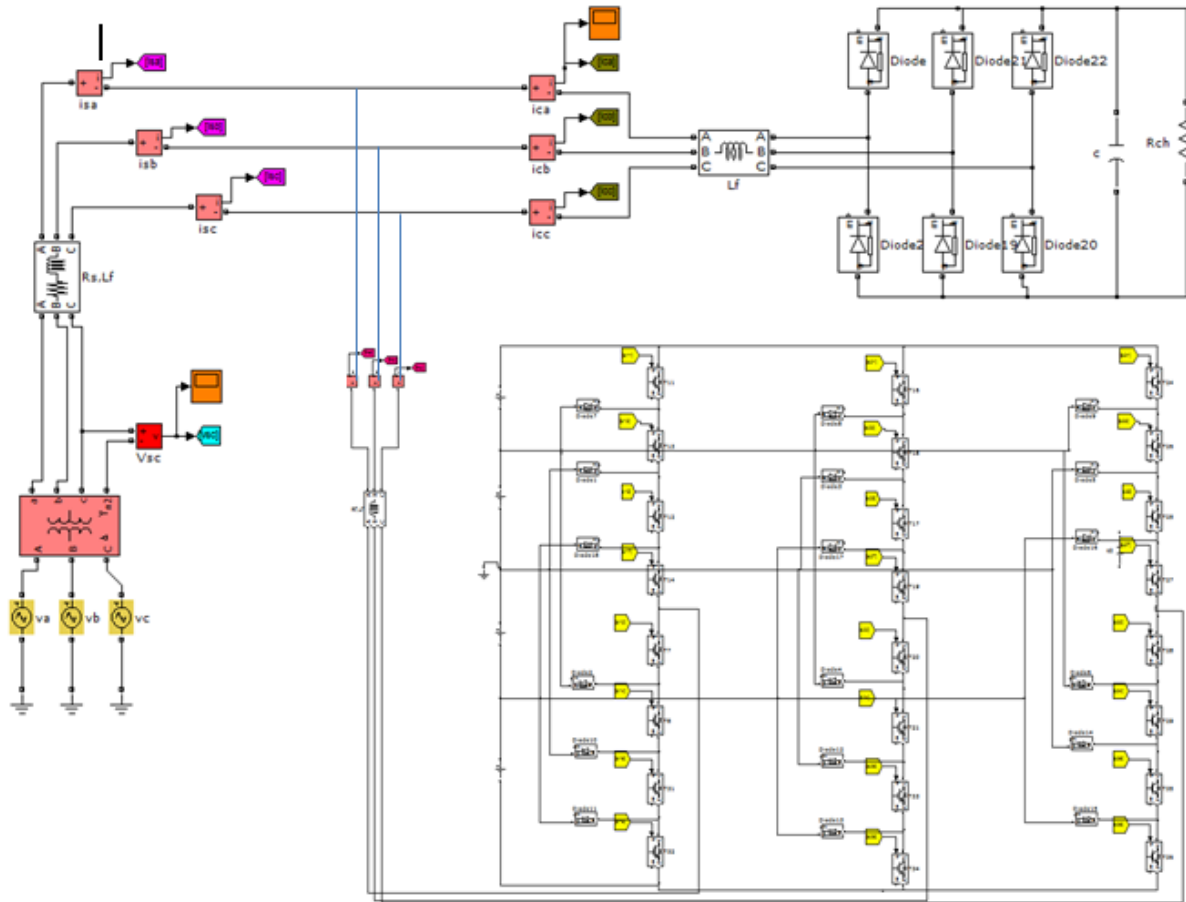


Figure III. 31. Modèle du filtre actif parallèle à cinq niveaux avec la charge polluante R-C parallèle.

Les résultats de simulations de la méthode (FMV) de l'identification des courants harmoniques de référence avec la charge R-C sont représentés ci-dessous :

a. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV

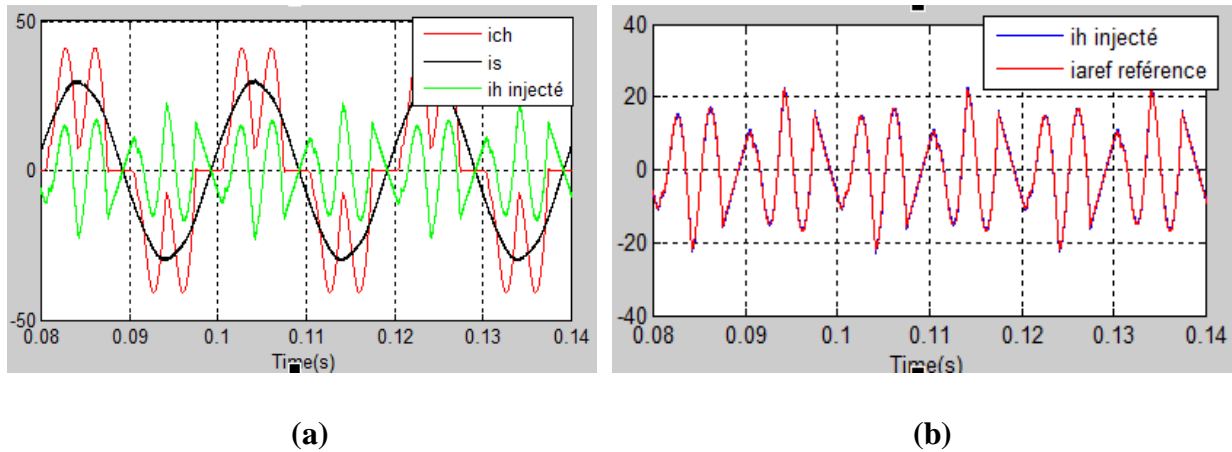


Figure III. 32. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h .

(b) Courant généré par le filtre actif i_h injecté et sa référence i_{aref} référence.

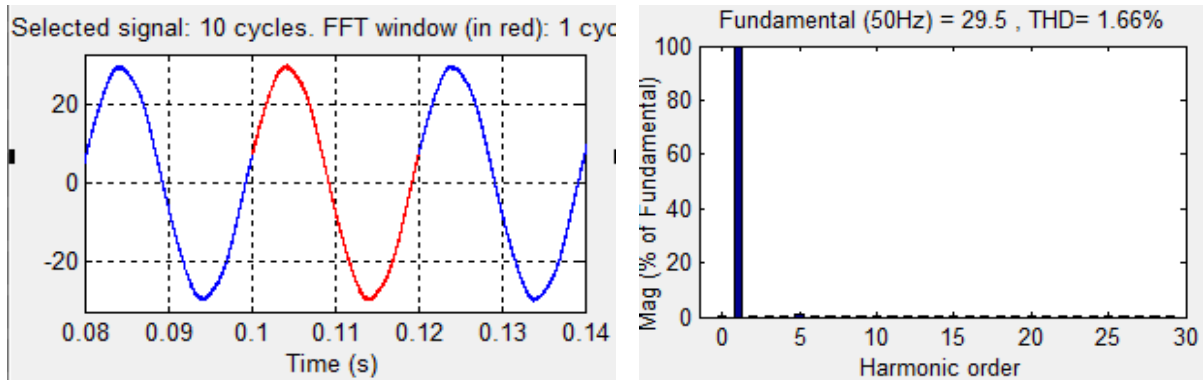


Figure III. 33. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

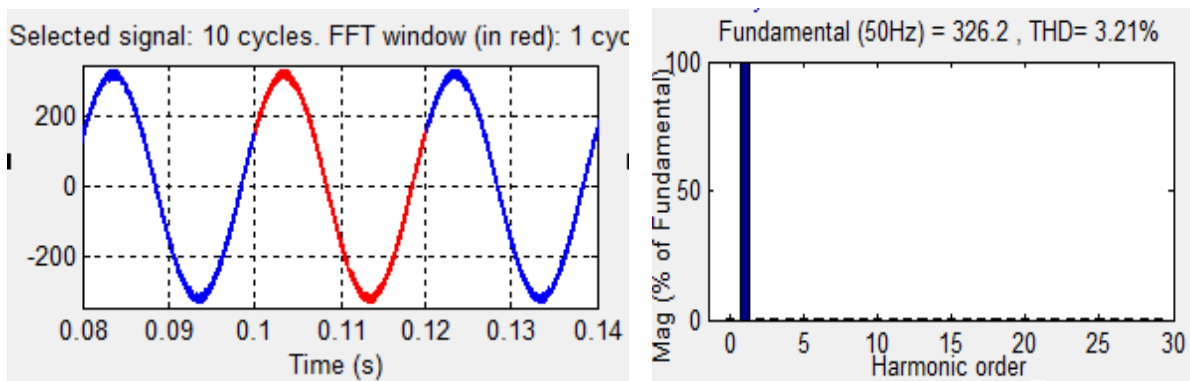


Figure III. 34. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

5.3. Comparaison et discussion

Tableau III. 4. Comparaison des résultats.

FAP \ THDi%	Avant filtrage	Après filtrage	
		FMV (niveau 3)	FMV (niveau 5)
Charge R-L	19.74%	0.70%	0.60%
Charge R-C	46.38%	1.92%	1.66%

Le tableau III.4 récapitule les THDi avant et après utilisation d'un FAP à trois et cinq niveaux avec l'algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV. On voit d'après ce tableau que le passage à un niveau supérieur a conduit à une faible amélioration du THDi comparé à celle de niveau trois.

6. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV modifiée

Afin de bien filtrer la composante fondamentale, cette méthode utilise deux filtres FMV montés en cascade avec le FAP a trois niveaux, comme illustrer à la figure III.35.

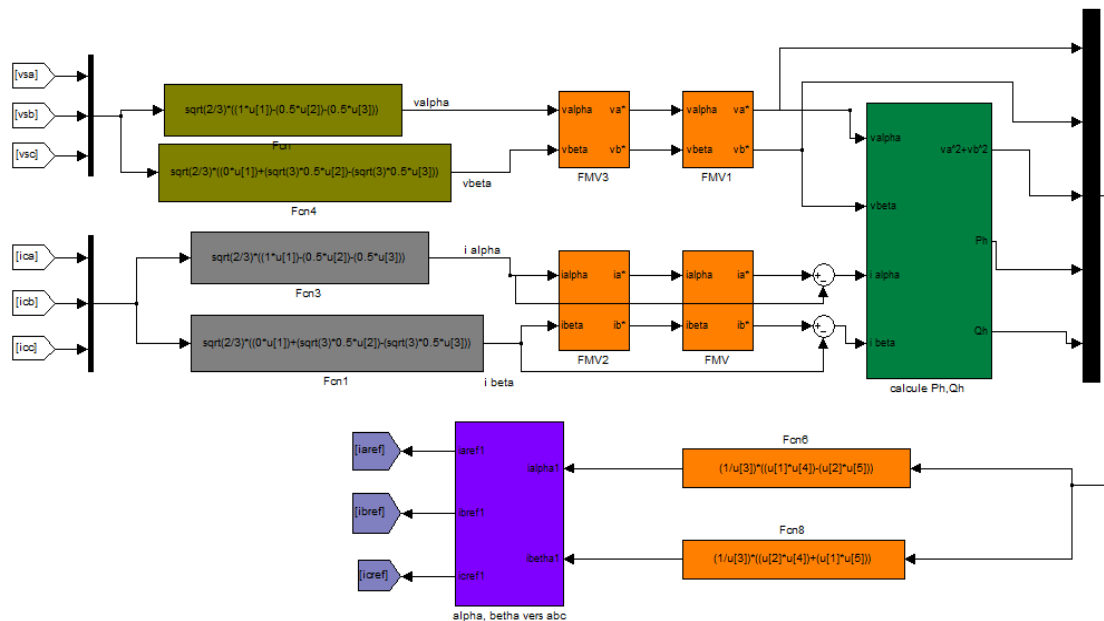


Figure III. 35. Algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV modifiée dans Matlab / Simulink.

6.1. SIMULATION CHARGE R-L & R-C NIVEAUX TROIS.

6.1.1. Simulation de la charge R-L séries polluante après filtrage

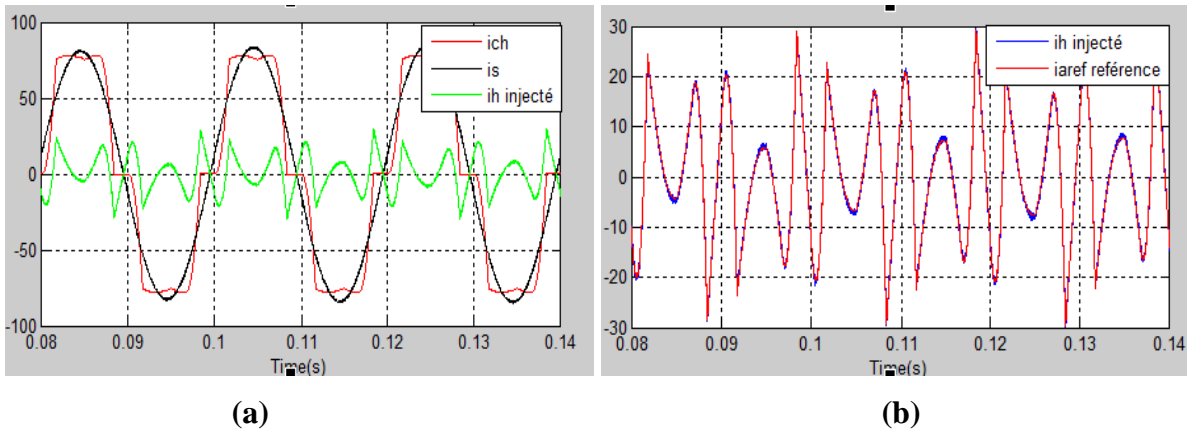


Figure III. 36. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h .

(b) Courant généré par le filtre actif i_h injecté et sa référence $i_{a\text{ref}}$ référence.

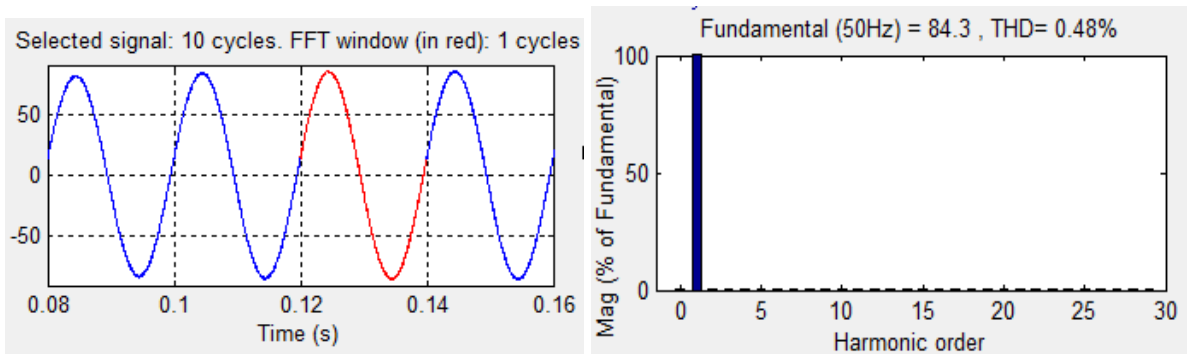


Figure III. 37. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

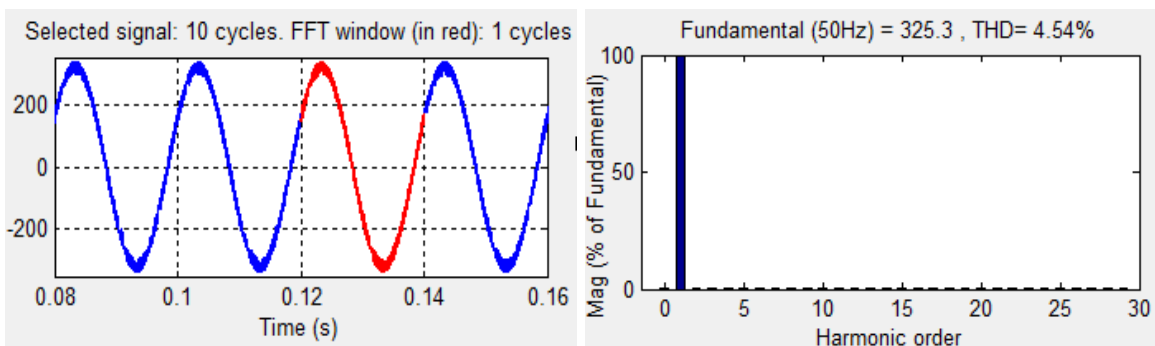
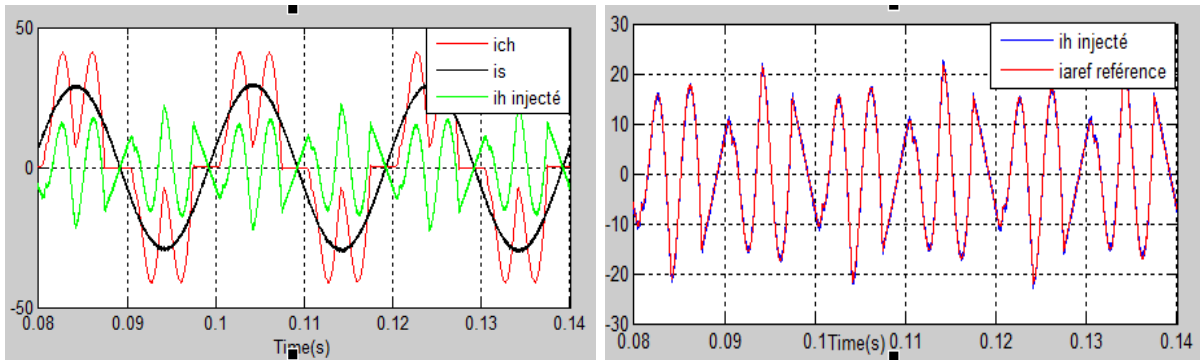


Figure III. 38. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

6.1.2. Simulation de la charge R-C parallèle polluante après filtrage



(a)

(b)

Figure III. 39. (a) Courant de charge i_{ch} , courant de source i_s et courant injecter par le filtre i_h .

(b) Courant généré par le filtre actif $i_{h \text{ injecté}}$ et sa référence $i_{aref \text{ référence}}$

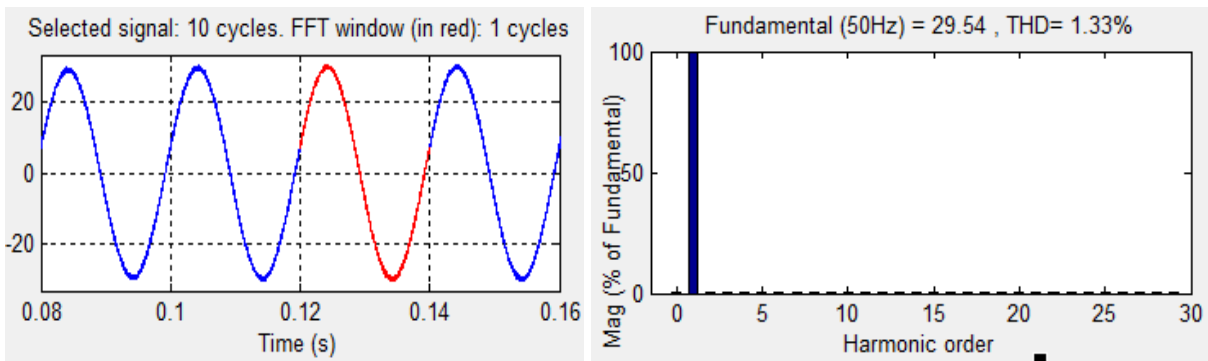


Figure III. 40. Courants de source et son spectre harmonique après compensation.

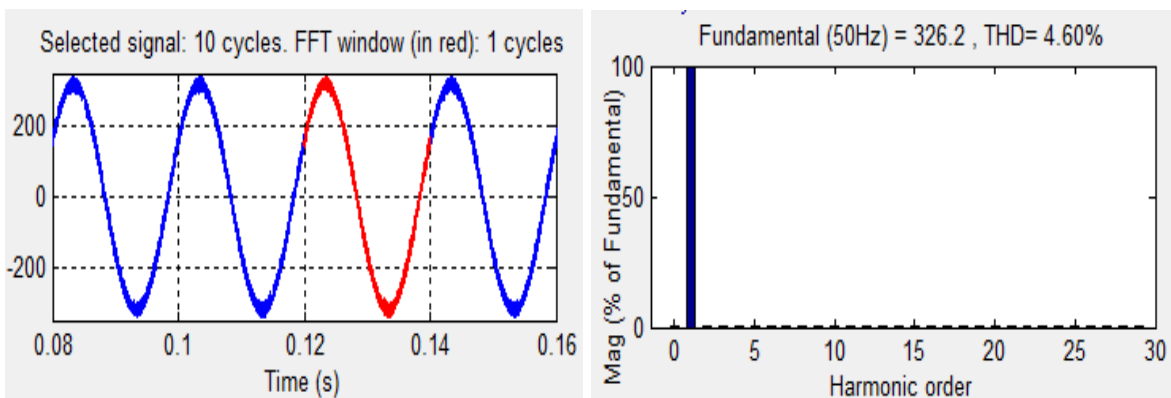


Figure III. 41. La tension secondaire de transformateur et son spectre harmonique après compensation.

6.2. Comparaison et discussion

Tableau III. 5. Comparaison des résultats.

FAP THDi%	Avant filtrage	Après filtrage (niveau 3)	
		FMV	FMV modifié
Charge R-L	19.74%	0.70%	0.48%
Charge R-C	46.38%	1.92%	1.33%

Le tableau III.5 récapitule les THDi avant et après utilisation d'un FAP à trois niveaux avec l'algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de FMV et à l'aide de FMV modifiée.

D'après ces résultats on distingue que la méthode FMV modifiée a considérablement améliorée du THDi du réseau et qu'elle est la méthode la plus efficace.

CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté en premier lieu la modélisation et la simulation de l'ensemble réseau, source sinusoïdale, charge polluante (R-L & R-C) et filtre actif parallèle à trois et à cinq niveaux, avant et après compensation. Les résultats de simulation et les interprétations obtenues avec les différentes méthodes d'identification des harmoniques de courant de référence ainsi que la commande de l'onduleur par hystérésis ont été présentés par la suite.

Les résultats que nous avons obtenu sont satisfaisants, très acceptable et dans les normes ($THDi \leq 5\%$).

L'utilisation du filtre actif parallèle à trois niveaux avec la méthode du référentiel synchrone (PLL) et l'algorithme de commande basé sur les puissances instantanées à l'aide de filtre multi-variable (FMV) donnent de bons résultats en termes de THDi. Nous concluons que ces méthodes sont les plus adaptées à l'identification des harmoniques de courant de référence.

Le THDi de la méthode (FMV) avec le filtre actif parallèle à trois ou à cinq niveaux n'a pas donnée un grand changement, donc l'utilisation de la méthode couteuse à cinq niveaux n'apportera aucun avantage.

L'utilisation de deux filtre ou plus pour filtrer la composante fondamentale, augmente l'efficacité de la dépollution du réseau mais en restant dans les limites parce que l'utilisation d'un très grand nombre n'apporte pas de changements.

Les résultats de simulation montrent que la meilleure méthode adaptée pour la dépollution efficace d'un réseau électrique alimentant une charge polluante, est celle du **FMV modifiée**.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire consiste à l'étude d'une simulation d'une protection très efficace pour les transformateurs et les matériels électriques contre la dépollution des réseaux électriques. Ces pollutions sont principalement causées par des charges non linéaires ; ces dernières à base de convertisseurs de puissances offrent de l'énergie sous plusieurs formes et sont de plus en plus utilisées dans l'industrie.

L'utilisation toujours croissante de l'électronique de puissance contribue fortement à l'augmentation des taux d'harmoniques présents sur les réseaux de distribution électrique. Ces harmoniques de courant ou de tension vont venir impacter les matériels connectés au réseau, que ce soit en termes de fonctionnement ou de vieillissement. Il semblerait intéressant du point de vue de l'étude bibliographique d'étudier, d'une part l'impact des harmoniques sur les transformateurs en se focalisant plus particulièrement sur les transformateurs de distribution, et d'autre part l'impact des harmoniques sur les dispositifs électriques placés en amont de ces transformateurs.

Les origines et les effets néfastes de ces perturbations ont été abordés et les normes en vigueur ont été présentées. Ces normes, notamment imposées aux distributeurs d'énergie, autorisent cependant la génération d'harmoniques dans certaines limites. En outre, le respect de ces normes motive l'étude et le développement de méthodes efficaces pour dépolluer les réseaux électriques, comme par exemple les dispositifs de filtrage actif, objet de ce travail. Nous avons alors présenté, de manière générale, les solutions traditionnelles et modernes utilisées en filtrage.

Cependant, nous avons abordé en premier lieu les différentes techniques d'identifications des harmoniques de courant au filtre actif shunt triphasé ; on parle de la méthode des puissances instantanées à l'aide de FPB et à l'aide de FMV, et de la théorie de

référentiel synchrone PLL. Nous avons comparé les techniques d'identification en utilisant deux types de charge, la première moins polluante et la deuxième Très polluante.

La comparaison de deux niveaux de FAP (trois niveaux avec cinq niveaux) a été établie. Il a été conclu que l'utilisation de la structure FAP à cinq niveaux n'a pas apportée une amélioration et n'apportera aucun avantage vu son coût très élevé.

Enfin, on a remarqué que l'utilisation de deux filtres FMV ou plus pour filtré la composante fondamentale augmente l'efficacité de dépollution du réseau mais en restant dans les limite « L'excès en tout est un défaut »

Les résultats de simulations obtenus sur l'interface Simulink du logiciel Matlab, confirment l'efficacité de la méthode des puissances instantanées à l'aide de filtre multi-variable (FMV_m) modifié pour le cas du filtre active parallèle trois niveaux étudié. Cela est justifié par les faibles valeurs du THD obtenu pour les courants de source. En outre, la stratégie proposée est très simple et robuste.

D'après ces résultats nous pouvons être sûre que nous avons protéger notre transformateur et tous les matériels électriques placés en amont à ce transformateur.

Le travail présenté nous a permis d'approfondir nos connaissances et de mesurer combien la problématique est riche en interrogations et en perspectives. Celles-ci feront l'objet de nos futurs travaux.

LES TRANSFORMATEURS

1. INTRODUCTION

Un transformateur de puissance est l'un des dispositifs essentiels d'un réseau électrique, d'où la compréhension des phénomènes qui régissent leur fonctionnement et traiter ses composants aussi bien que de sa topologie et la configuration de ses enroulements une étape déterminante pour une meilleure exploitation de ces dispositifs. Ce qui permet également de prédire son comportement aux différentes contraintes pour éviter sa détérioration, et élargir sa durée de vie en vue de minimiser son coût d'exploitation.

Du point de vue de sa fonction et de son prix élevé, il est très important pour éviter des pertes d'énergie et d'argent de mettre une bonne protection et supervision afin de lutter les dommages dus aux défauts.

2. DEFINITION

Le transformateur est une machine électrique statique à deux enroulements ou plus qui par induction électromagnétique transforme un système de tension et courant alternatifs en un autre système de tension et de courant de valeurs efficaces généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation.

Les transformateurs sont réversibles et permettent, soit l'élévation, soit l'abaissement de la tension ; d'où la possibilité de choisir la meilleure tension pour la production, le transport, la distribution, et de passer facilement de l'une à l'autre.

Un transformateur électrique permet donc de faire transiter la puissance électrique en courant alternatif (AC) depuis la centrale de production d'électricité jusqu'à son utilisateur final avec un minimum de pertes, à différents niveaux de tensions.

3. LA CONSTITUTION DES TRANSFORMATEURS

La puissance des transformateurs triphasés varie de quelques dizaines à plusieurs centaines de MVA, immergés dans l'huile, se composent de deux parties essentiels, une interne et l'autre externe plus des accessoires de protection.

3. 1.Partie active (interne)

La partie active est définie comme le circuit magnétique et les enroulements. Le circuit magnétique se trouvant au centre des enroulements.

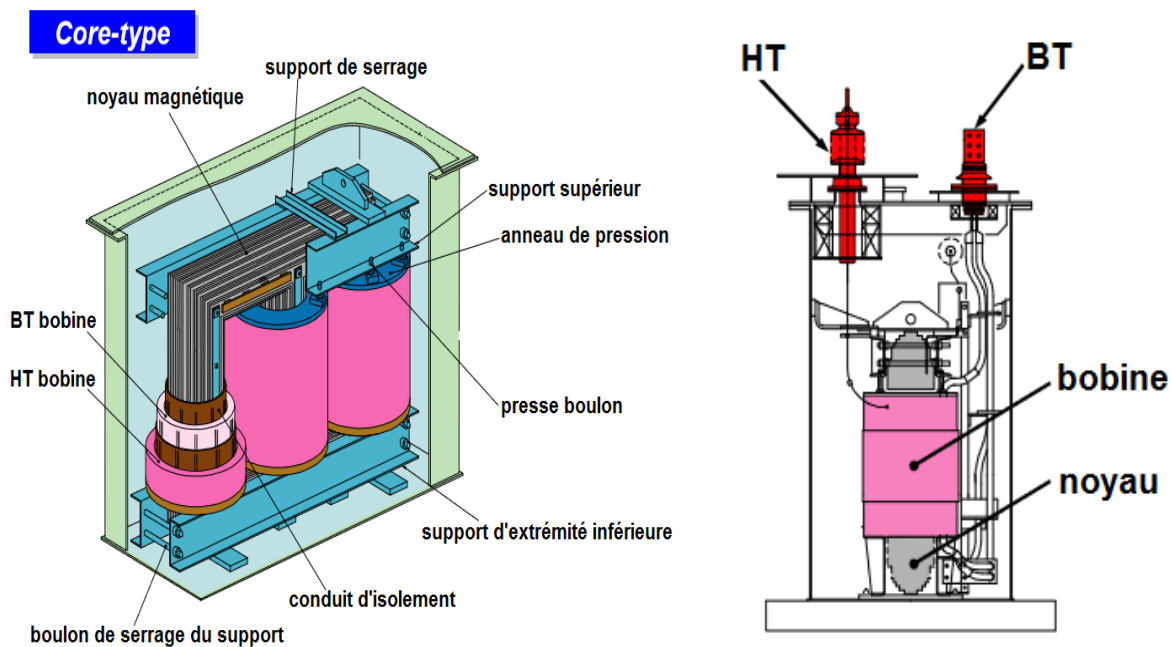


Figure 1. Partie active (interne) de transformateur.

3.1.1. Le circuit magnétique (noyau)

Les circuits magnétiques sont constitués de tôles magnétiques de silicium à grains orientés, dites « cristaux orientés », ne faisant que quelques dixièmes de mm d'épaisseur : de 0,28 à 0,35 mm, isolées en surface avec de la carlite, qui est un revêtement minéral isolant, permettant un passage optimum du flux magnétique dans leur sens, afin de réduire les pertes fer qu'elles sont dues à l'hystérésis du circuit magnétique et aux courants de Foucault.

3.1.2. Les enroulements

Les enroulements sont un ensemble des spires formant un circuit électrique généralement en cuivre isolés par papier (en plus de l'huile isolante en fonctionnement). Les sections et les technologies de bobinages ne sont pas identiques pour tous les transformateurs.

Selon l'emplacement des enroulements sur les colonnes on distingue :

- **Bobinage concentrique (en tonneau)**: L'enroulement BT est placé près de la colonne car la distance d'isolation entre la bobine et la colonne sera la plus faible. [1]
- **Bobinage mixte** : Pour éviter les très forts ddp entre les spires d'extrémité de deux couches successives, on réalise des bobines plates (galettes) qui sont montées en série les unes avec les autres, Utilisé surtout en HT et THT. [1]
- **Bobinage alterné en galettes** : Les galettes MT et BT sont alternées, l'empilage est terminé par les galettes BT plus faciles à isoler du circuit magnétique. [1]
- **Enroulement en hélice** : la bobine est composée de spires utilisant de 4 à 20 conducteurs de section carrée en parallèle. Les enroulements en hélice sont les plus robustes et sont utilisés comme bobinage BT pour des transformateurs de grande puissance. [1]

3.1.3. L'huile diélectrique

L'huile pour transformateur est une huile de nature minérale ou de silicone ou ester synthétique Etc. le transformateur de puissance doit être immergé dans l'huile. Ce fluide à deux rôles essentiel (l'isolation et le refroidissement) donc une dégradation de l'huile menant directement à une avarie

➤ **Rôle isolant :**

L'ensemble des bobinages est plongé dans une cuve remplie d'un fluide isolant dont la tenue diélectrique conditionne les distances entre pièces sous tension. Par exemple, un transformateur 400 kV devront tenir des chocs brefs de 1425 kV en essais chez le constructeur. [4]

➤ **Rôle caloporteur :**

Le fluide sert aussi d'agent caloporteur de la partie active, qui est une source chaude, vers un système de refroidissement, qui est une source froide. Le refroidissement s'effectue via cette huile circulant en circuit fermé de la partie active, siège des pertes, vers une source froide à laquelle il abandonne des calories, celle-ci peut être directement la surface de la cuve pour les petites puissances ou des aéro-réfrigérants qui sont constitués de nombreux tubes à ailettes ventilés. [4]

➤ **Les types de l'huile de remplissage de transformateur :**

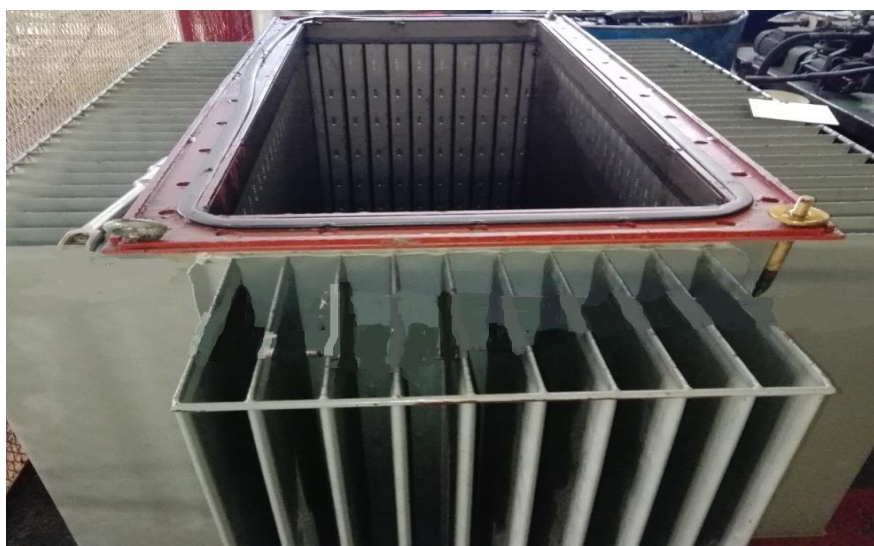
Ci-dessous sont rassemblées les principales qualités recherchées pour une huile de transformateurs, Le remplissage de ces exigences par les différents types d'huile est explicité :

Tableau 1. Comparaison des types d'huile diélectrique [2].

Propriété recherchée	Huile minérale	Ester naturel	Ester synthétique	Silicone
Haute résistance diélectrique	oui	oui	oui	oui
Faible viscosité	oui	non	non	non
Point d'écoulement à basse température	oui	non	oui	oui
Faible oxydation	oui	non	oui	oui
Possibilité de rerafinage	oui	non	non	non
Risque d'incendie faible	non	oui	oui	oui
Stabilité à l'hydrolyse	oui	non	oui	oui
Solubilité dans l'eau	non	oui	oui	non
Biodégradable en faible quantité	non	oui	oui	non
Prix	faible	moyen	élevé	élevé

3. 2.Partie externe

Les cuves des transformateurs sont faites de tôles d'acier. Elles doivent pouvoir résister aux forces exercées, des joints en caoutchouc synthétique sont utilisés, l'étanchéité doit être parfaite, et elles assurent le contact entre l'intérieure chaud du transformateur et l'extérieur (l'air) à l'aide de ses ailettes.

*Figure 2. Partie externe de transformateur.*

3.3. Les accessoires

3.3.1. Les traversées isolantes

Les traversées isolantes ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire et secondaire, d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ, d'autre part, à travers le couvercle ; d'où le nom de traversées.

Leurs fonctions sont principalement : l'isolement de la connexion par rapport à la cuve, la résistance aux efforts mécaniques, une bonne répartition du champ électrique et une fixation robuste sur le couvercle. [4]

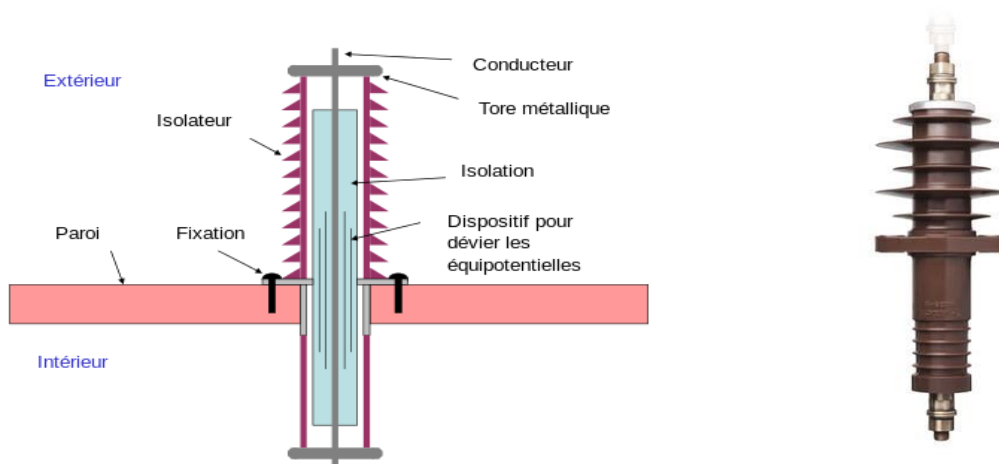


Figure 3. Les traversées isolantes.

3.3.2. Le conservateur

Le conservateur est un réservoir d'huile qui est un cylindre métallique qui contient l'huile et l'air sec.

La température de l'huile n'étant pas constante, elle dépend de la température extérieure et de la charge du transformateur, elle se dilate plus ou moins selon les circonstances. Ainsi une augmentation de la température de 100 °C entraîne une augmentation du volume d'huile de l'ordre de 7 à 10 %. Il est donc nécessaire en cas de forte température de stocker le surplus, dans le cas des transformateurs dit « respirant » ce rôle est rempli par le conservateur.

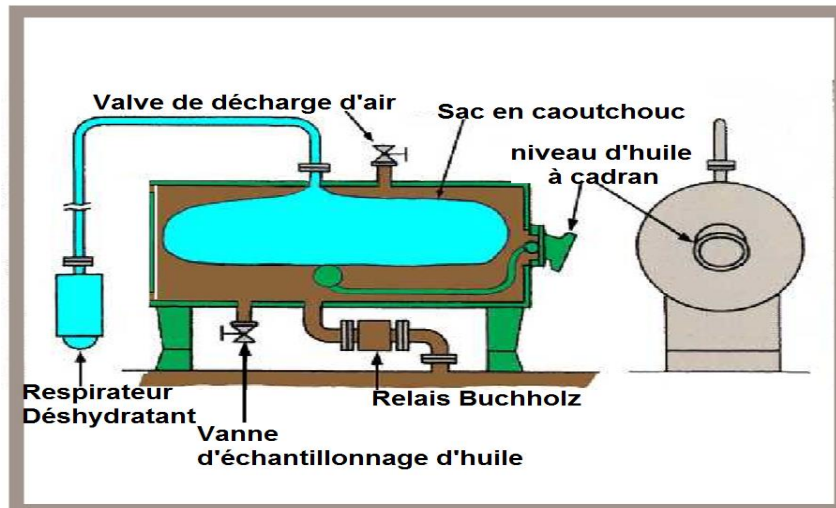


Figure 4. Le conservateur.

3.3.3. Changeur de prises :

Ou commutateur, est un appareil permettant de rajouter ou de retrancher des spires à l'enroulement principal du transformateur. Le rapport de transformation du transformateur peut ainsi être adapté aux conditions de charge sur le réseau afin de maintenir la tension à un niveau optimal. Les changeurs de prises peuvent être hors circuit ou en charge, dans le premier cas le courant doit être interrompu avant de changer la prise alors que ce n'est pas nécessaire dans le second cas.

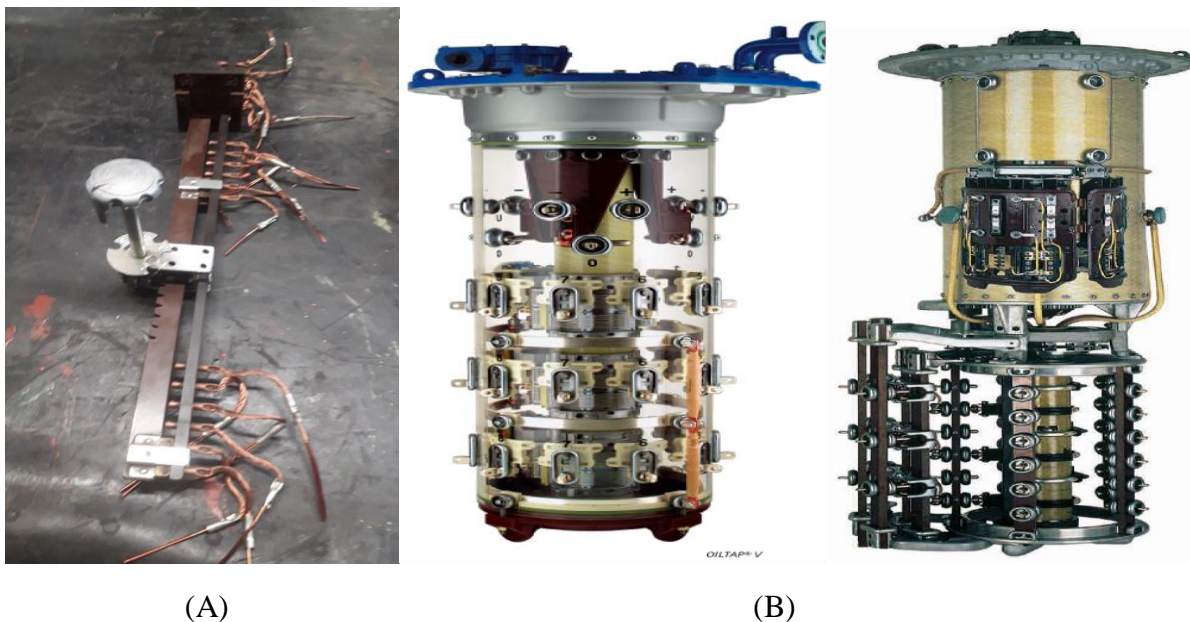


Figure 5. Changeur de prises (A : hors circuit, B : en charge).

3.3. 4. Les relais de protection

a. Le Buchholz

Un relais Buchholz est un système de sécurité monté sur les transformateurs de puissance à bain d'huile (immergé). L'appareil monté en série sur la tubulure reliant la cuve du transformateur au conservateur, le relais Buchholz détecte une production de gaz due certainement à une surcharge développée au sein des enroulements, il y a dégagement de gaz par vaporisation de l'huile, le relais évacue les gaz accumulés et envoyer un signal de déclenchement. Ce dispositif détecte aussi les fuites d'huile, une détection par flotteur est utilisée dans ce cas.

Ce dispositif normalement actionnera un disjoncteur pour arrêter (isoler) l'appareil avant que le défaut ne crée plus de dommages

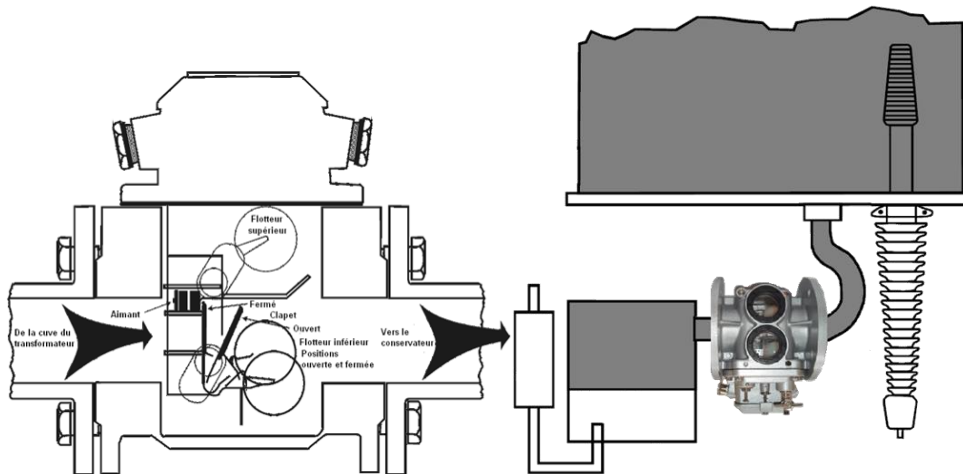
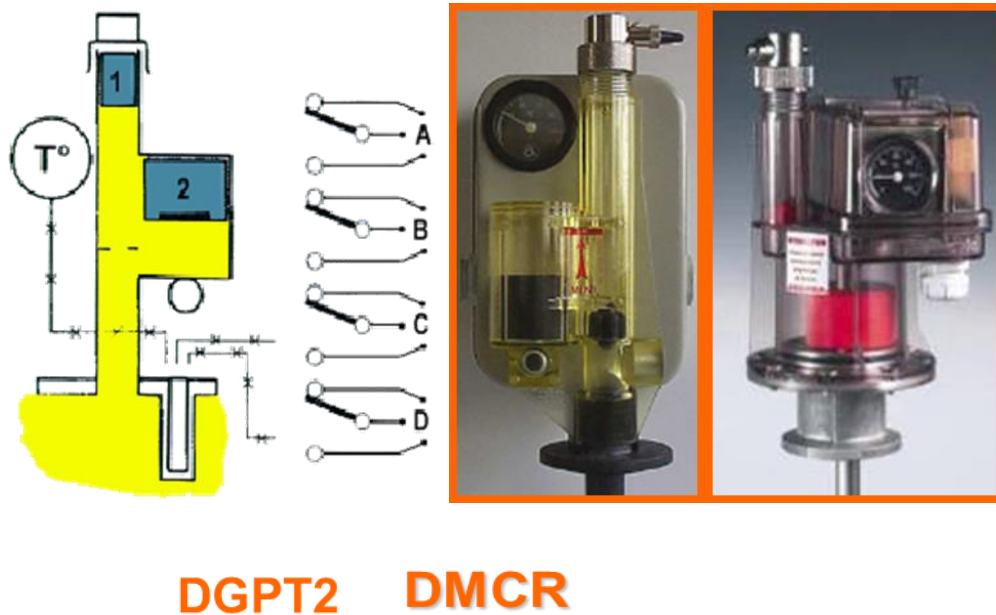


Figure 6. Relais Buchholz.

b. Le DGPT2 ou DMCR

Un DGPT2 est un relais de protection de transformateur immergé, similaire au relais Buchholz, Son nom signifie Détection Gaz Pression Température 2 seuils.

Il est équipé de divers détecteurs qui lui permettent de signaler un défaut de présence gaz, de pression ou de température anormale. Le détecteur de température a deux seuils de détections.



DGPT2 DMCR

Figure 7. Le DGPT2 ou DMCR.

4. TYPE DE TRANSFORMATEUR

4.1. Transformateur élévateur de tension

Les générateurs fournissent de l'énergie à un niveau de tension de quelques kV typiquement. Pour minimiser les pertes sur les lignes, la tension doit être aussi élevée que possible, afin de réduire les courants qui transitent, généralement à 400 kV ou 220 kV.

4.2. Transformateurs abaisseurs

Ils adaptent la tension du réseau électrique de transport, 220 kV par exemple, aux différentes tensions des réseaux de distribution : 90 kV, 63 kV et 20 kV. Ces transformateurs sont situés dans des postes de transformation.

4.3. Transformateurs de distribution

Ces transformateurs de faible puissance (quelques centaines de kVA) sont en général utilisés pour abaisser la tension 20 kV du réseau de distribution et l'adapter à un utilisateur final à des fins domestiques ou industrielles, le plus souvent en 400 V triphasé.

4.4. Transformateur de contrôle

Les transformateurs de commande et contrôle sont généralement utilisés dans des circuits électroniques qui nécessitent une tension constante ou de courant constant avec une puissance faible ou volt - ampère attribuée. [3]

4.5. Autotransformateur

L'autotransformateur est généralement utilisé dans les applications de faible puissance lorsqu'une tension variable est requise. C'est un type spécial de transformateur de puissance. Il se compose d'un seul enroulement. Par le long de l'enroulement.

Dans ce type de transformateur particulier, il n'y a pas d'isolation électrique entre le primaire et la sortie du secondaire. La conséquence est qu'une partie du bobinage est traversé par le secondaire car le secondaire est une partie de l'enroulement primaire. Le courant alimentant le transformateur parcourt le primaire en totalité et une dérivation à un point donné de celui-ci détermine le seul courant du primaire alors que l'autre partie est traversée par le courants du primaire moins celui du secondaire ; la section du bobinage doit être adaptée à ces courants atypiques pour un transformateur.

Le rapport entre la tension d'entrée et la tension de sortie est identique à celui d'un transformateur à enroulements primaire et secondaire isolés entre eux. [3]

4.6. Transformateur d'isolement

C'est un transformateur qui crée une isolation galvanique entre son primaire et son secondaire, Ils servent à assurer la sécurité d'une installation en protégeant des électrocutions par exemple. La séparation galvanique permet aussi d'éliminer une partie du bruit électrique, ce qui est utile pour certains appareils électroniques sensibles. La composante continue du courant est en effet bloquée par un transformateur.

Ce type est, largement utilisés dans les blocs opératoires : chaque salle du bloc est équipée de son propre transformateur d'isolement, pour éviter qu'un défaut dans un bloc n'affecte les autres. [3]

4.7. Transformateur de potentiel (TP)

Baisse la tension d'un circuit à une valeur faible qui peut être efficacement et en toute sécurité utilisé pour le fonctionnement des instruments de mesure et de protection tels que voltmètres, wattmètres et relais. [3]

4.8. Transformateur de courant (TC)

Baisse le courant d'un circuit à une valeur inférieure et utilisé dans les mêmes types d'équipements comme un transformateur de potentiel. Cela se fait par la construction de la bobine secondaire constitué d'un grand nombre de spires de fil autour de la bobine primaire,

qui ne contient que quelques spires de fil. De cette manière, les mesures des valeurs élevées de courant peuvent être obtenues. [3]

5. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN TRANSFORMATEUR

5.1. Le fonctionnement en général

Pour assurer sa fonction, un transformateur est constitué d'enroulements primaire et secondaire couplés par un circuit magnétique qui canalise le flux créé par les enroulements. Ces parties actives sont placées dans une cuve qui en assure le support mécanique et la protection. [4]

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable, Φ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice proportionnelle dans le temps aux taux de changement ($d\Phi/dt$) et au nombre de spire que comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire. [3]

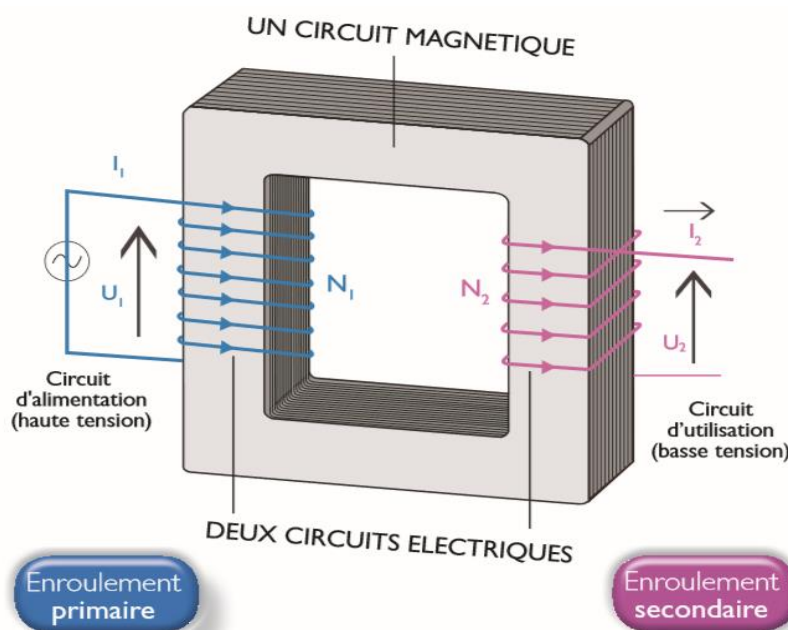


Figure 8. Schéma de fonctionnement.

5.2. Schéma équivalent

Un transformateur réel, monophasé, peut être électriquement modélisé selon la Figure I.9.

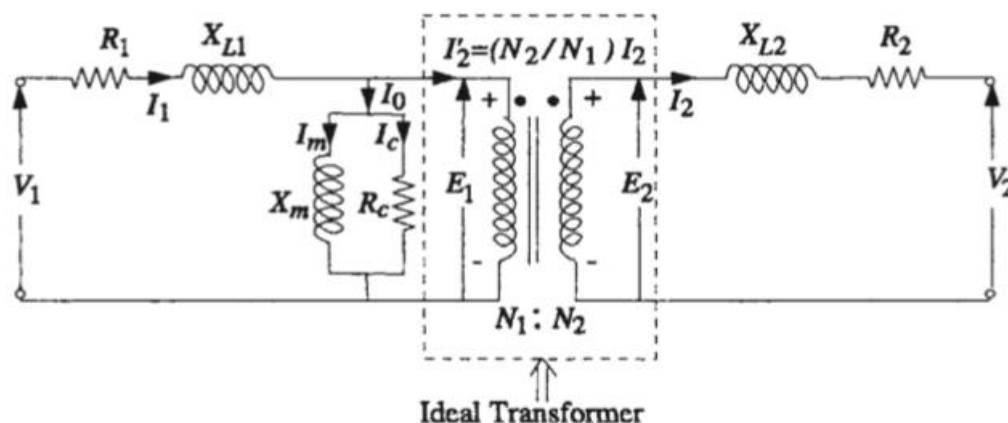


Figure 9. Schéma équivalent d'un transformateur réel monophasé.

Avec :

V_1 et V_2	tensions primaire et secondaire
I_1 et I_2	courants primaire et secondaire
I_0	courant à vide
E_1 et E_2	tensions à vide idéales primaire et secondaire
N_1 et N_2	nombre de spires des enroulements primaire et secondaire
R_1 et R_2	résistance des enroulements primaire et secondaire
X_{L1} et X_{L2}	inductance de fuites des enroulements primaire et secondaire
R_c	pertes fer
X_m	réactance magnétisante

Les valeurs typiques de ces paramètres diffèrent selon la réalisation particulière d'un transformateur donné.

Les éléments V_1 , V_2 , N_1 et N_2 fixent les tensions nominales et le rapport de transformation à vide.

Les éléments R_1 et R_2 sont les résistances électriques des enroulements, et les pertes Joule seront principalement dues au passage des courants I_1 et I_2 de charge dans ces résistances.

Les réactances X_{L1} et X_{L2} correspondent aux flux de fuites de chacun des enroulements. L'impédance équivalente ($X_{L1} + (N_2/N_1)^2 * X_{L2}$ ramené au primaire par exemple) représente le flux de fuites de l'ensemble des deux enroulements. Elle induit une chute de tension, fonction de la charge, représentative de l'impédance de court-circuit du

transformateur. Elle est fortement influencée par la configuration géométrique des enroulements entre eux.

5.3. Diagrammes de Kapp

Les tensions, courants et flux magnétiques du transformateur peuvent être représentés selon des diagrammes vectoriels appelés diagrammes de Kapp. Il y a le diagramme du côté primaire (a) et du côté secondaire (b).

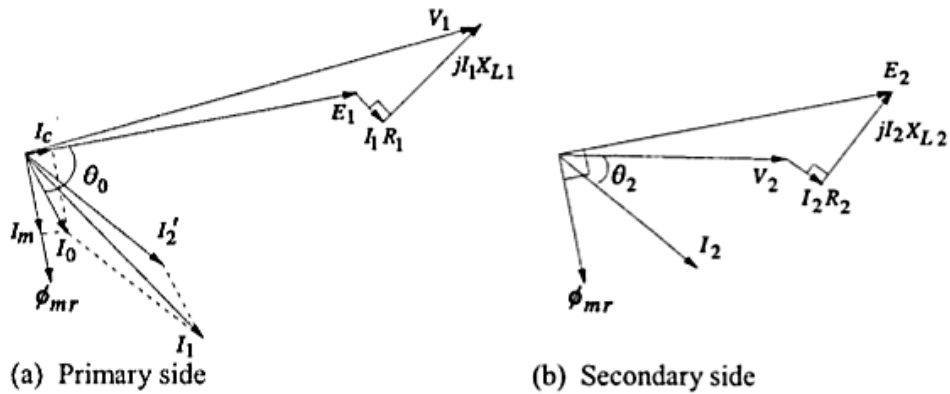


Figure 10. Diagrammes de Kapp.

6. COUPLAGE DE TRANSFORMATEUR

Dans les transformateur triphasés, chaque phase contient ses enroulements propres .il est alors nécessaire de connecter les trois phases, soit chaque élément monophasé, entre elles pour former un system triphasé.

6. 1. Mode de couplage :

Au primaire les enroulements peuvent être connectés soit en étoile(Y) soit en triangle(D)

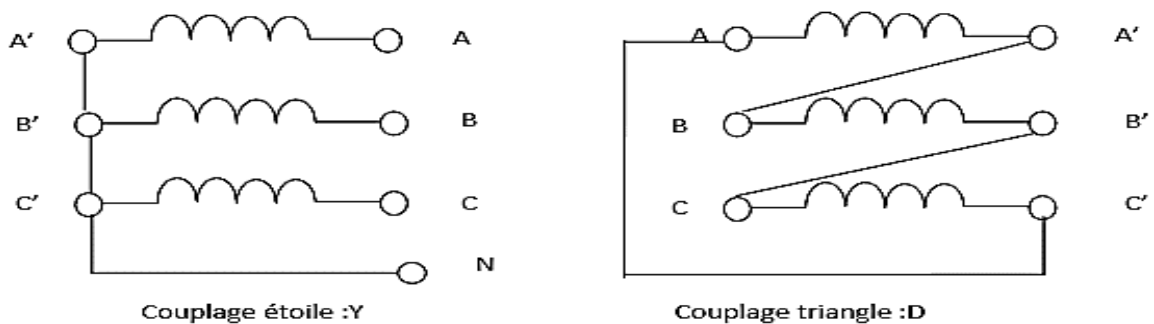


Figure 11. Couplage primaire.

Au secondaire les enroulements peuvent être couplés de 3 manières différentes : étoile(y), triangle(d) et zigzag(z)

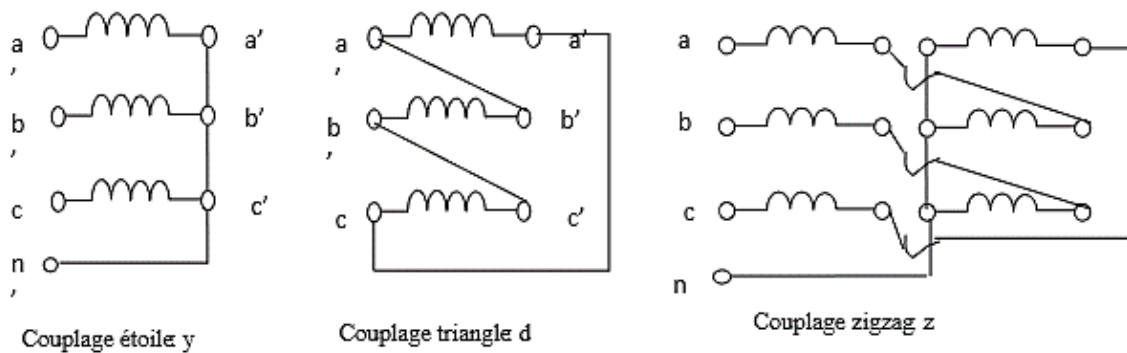


Figure 12. Couplage secondaire.

On obtient ainsi 6 couplages possibles entre primaire et secondaire :

- Y-y : étoile –étoile
- Y-d : étoile-triangle
- Y-z : étoile-zigzag
- D-y : triangle- étoile
- D-d: triangle –triangle
- D-z: triangle-zigzag

On donne ci-dessous les représentations symboliques des couplages normalisés

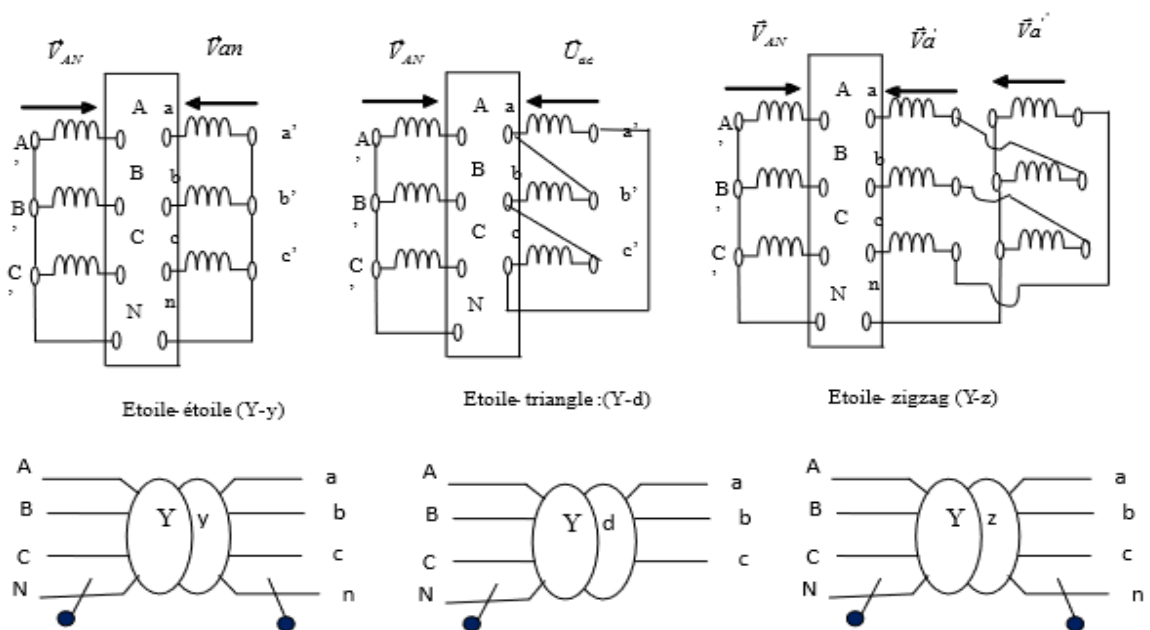


Figure 13. Les représentations symboliques des couplages normalisés.

6. 2. Choix du couplage

Le choix du couplage repose sur plusieurs critères :

- La charge nécessite la présence du neutre (par exemple réseau BT), le secondaire doit être connecté soit en étoile soit en zigzag
- Le fonctionnement est déséquilibré, le secondaire doit être couplé en zigzag.
- Coté haute tension on a intérêt à choisir le couplage étoile (moins de spire à utiliser)
- Pour les forts courants, on préfère le couplage triangle

6. 3. L'indice horaire

L'indice horaire permet de préciser le déphasage, multiple de 30° , entre l'enroulement HTA et l'enroulement BT.

L'indice horaire est indiqué par un chiffre dans le groupe de couplage « 11 », la représentation de Fresnel du système des tensions permet de déterminer la valeur de déphasage.

6. 4. Mise en parallèle des transformateurs triphasés :

Les conditions nécessaires pour brancher deux transformateurs triphasés en parallèle, ce qu'ils aient :

- Même tension primaire
- Même rapport de transformation
- Même indice horaire ou même groupe d'indices horaires

7. LES DEFAUTS DE TRANSFORMATEUR

Dans tout système d'équipement, il y a beaucoup de problèmes et défauts qui ont causé par des erreurs artificielles, les erreurs humaines, chauffage, vieillissement, etc...

Cette liste constitue un échantillon relativement typique des principaux défauts des transformateurs de puissance nécessitant une réparation. De plus, ces défauts couvrent l'essentiel des défauts relevés dans l'étude (CIGRE, 1983) où les défauts diélectriques sur : les régulateurs en charge, les enroulements et les traversées forment environ 79 % des défauts majeurs sur les transformateurs.

Tableau 2. Les défauts de transformateur.

Catégorie de défaut	Type de défaut
Lies à la fabrication	Défauts liés à la fabrication
Diélectrique	Isolement de la partie active
	Amorçage diélectrique entre spires, sans court-circuit
	Court-circuit entre spires
	Amorçage du corps insérable du régulateur en charge
	Décharges Partielles
Electrique	Point chaud interne au transformateur
	Coupure du circuit électrique
Mécanique	Déformation géométrique des enroulements

7.1. Défauts liés à la fabrication

- Le mélange des impuretés dans l'alliage constituant le circuit magnétique.
- Le non isolement des conducteurs des enroulements primaire ou secondaire.
- Mauvaise étanchéité au niveau des bornes HT ou BT.

Un tel défaut peut provoquer une fuite d'huile. En effet, la sur-échauffement du bobinage, accroissant ainsi les risques des courts circuits. [1]

7.2. Défaut d'isolement de la partie active

Le défaut d'isolement de la partie est caractérisé par la perte, ou la très forte diminution d'isolement d'un circuit électrique par rapport à son environnement, dont il doit être normalement isolé.

Typiquement ce cas est rencontré dans les situations suivantes :

- ✓ Amorçage entre enroulements normalement isolés entre eux.
- ✓ Amorçage entre la masse (la cuve ou le circuit-magnétique typiquement) et un enroulement, une connexion ou une traversée

7.3. Court-circuit entre spires

Le court-circuit entre spires est caractérisé par le contact électrique anormal entre des spires d'un même enroulement qui devraient être normalement isolées entre elles.

Cela arrive souvent suite à un amorçage diélectrique entre spires entretenu, ou le déchirement du papier isolant suite à une déformation mécanique violente des enroulements.

Ce défaut peut aller jusqu'à la fusion du cuivre des conducteurs, et l'ouverture du circuit électrique dans certains cas. [4]

7.4. Amorçage du corps insérable du régleur en charge :

L'amorçage du corps insérable, ou commutateur d'un régleur en charge provoque généralement des courts-circuits importants dans un petit volume normalement hermétique de la cuve principale du transformateur.

Ce défaut est en général destructeur pour le régleur en charge à minima, et jusqu'à l'ensemble du transformateur dans certains cas. L'amplitude des dégâts dépend fortement de la rapidité et du réglage des protections. [4]

7.5. Décharges Partielles

Les décharges partielles sont un phénomène local de micro décharges dues à une faiblesse de l'isolant.

Les décharges en elles-mêmes sont rarement destructives, mais leur évolution peut l'être. Car à terme le carbone, conducteur, qu'elles génèrent peut se propager et diminuer la tenue diélectrique entre certains éléments sous tension et ainsi aller jusqu'à provoquer un amorçage.

Des mesures de décharges partielles sont possibles mais nécessitent des moyens de mesures haute tension lourds et techniques. Ils sont donc généralement réalisés au cas par cas en dehors des usines de transformateurs. [4]

7.6. Point chaud interne au transformateur :

Un point chaud est caractérisé par l'échauffement local interne d'une connexion précise du transformateur. Après une coloration sombre, les points chauds peuvent classiquement former des morceaux solides de carbone, qui sont conducteurs.

Typiquement les points chauds peuvent venir de mauvais contacts du circuit électrique chauffant alors anormalement, comme sur des connexions au niveau des brasures, ou sur des contacts mobiles du régleur en charge ou du régleur hors tension. Ils peuvent être aussi provoqués par des courants de Foucault induits anormaux circulant dans des pièces non prévues pour cela, qui chauffent alors anormalement, comme : des tôles du circuit magnétique ou des isolants en défaut de la partie active, hors enroulements. [4]

7.7. Coupure du circuit électrique :

La plupart des cas de coupure d'un circuit électrique sont le résultat d'un défaut interne, suite à :

- Un amorçage de puissance entre spires, qui les fusionne et coupe le conducteur.
- Un point chaud qui dégénère, au niveau des brasures des connexions internes, pouvant aller du débrasage jusqu'à la fusion du contact.
- Un mauvais alignement d'un régleur.

7.8. Déformation géométrique des enroulements

Il est possible mécaniquement de déformer les enroulements d'un transformateur, généralement suite à des courts-circuits extérieurs qui provoquent des courants extrêmement élevés qui par voie de conséquence génèrent des forces de Laplace très importantes, ce qui fragilise inévitablement son isolement papier se trouvant au contact des conducteurs, sans nécessairement avoir d'amorçages entre spires ou à la masse. Un transformateur avec une telle déformation mécanique peut dans certains cas fonctionner à son régime nominal. Il reste néanmoins fragilisé et il n'est absolument pas certain qu'il puisse ainsi tenir des perturbations de court-circuit ou de surtensions ultérieures sans amorcer. [4]

8. PROTECTION DES TRANSFORMATEURS

Pour la protection des transformateurs MICROENER propose et construit des systèmes et des ensembles de protection performants pour les transformateurs à Haute et Moyenne Tension.

Nous allons expliquer la plus importante de ces protections.

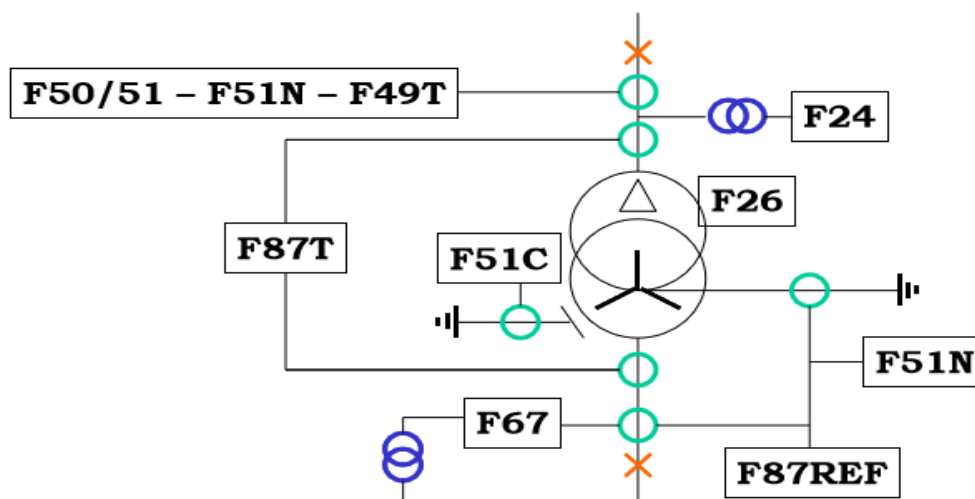


Figure 14. Schéma de protection MICROENER.

8.1. Protection de surcharge (F49T)

Lorsqu'un transformateur reçoit un nombre de w donné pendant une durée indéterminée, il atteint 63.2 % de sa température d'équilibre au bout d'une durée de chauffage égale à sa constante de temps.

Une protection thermique (F49) est un élément permettant de reproduire les conditions thermiques du transformateur par un système d'analogie avec mémoire des états précédents.

Cette protection ne tient pas compte de la température ambiante, sa valeur maximum sera prise en compte (en général 40°C), de manière à ce que les isolants ne puissent jamais atteindre la température limite. [5]

8.2. Protection à maximum de courant (F50-51-50N-51N)

Cette protection vient en secours de la protection différentielle (F87T), de la protection différentielle homopolaire (F87REF) et des protections du réseau.

8.2.1. Détection de court-circuit entre phases (F50)

Cette fonction détectera les courts-circuits entre phases « Amont » (au primaire du transformateur). Ce seuil sera réglé au-dessus du courant d'enclenchement

8.2.2. Détection de surcharge et court-circuit entre phases secondaire (F51)

Cette fonction détectera les courts-circuits entre phases « Aval » (au secondaire du transformateur, mais mesuré côté primaire).

Ce seuil sera réglé à la moitié du courant de court-circuit minimum pour un défaut au secondaire du transformateur.

8.2.3. Détection de court-circuit entre phase et terre (F50N)

La détection ne pourra être instantanée (par sécurité temporisation de 0.1 s) que si:

- Transformateur à couplage triangle (côté détecté), le transformateur étant alors récepteur homopolaire.
- Transformateur à couplage étoile (côté détecté) mis à la terre directement, le seuil sera supérieur au courant de défaut fourni par le transformateur sur défaut extérieur.

8.2.4. Protection générale de terre (F51N)

Le transformateur, avec neutre mis à la terre, est générateur de courant homopolaire pour l'ensemble du réseau, à ce titre une protection ampère-métrique placée dans le neutre sera sollicitée sur défaut extérieur et pourra servir en secours des protections du réseau.

Le seuil I_0 sera réglé de 10 à 20 % de I_n transformateur avec une temporisation de 0.3 s supérieure à celle de la protection immédiatement en aval. [5]

8.3. Protection différentielle (F87T)

Est une protection électrique qui consiste à comparer le courant entrant et le courant sortant d'un appareil. Si les deux sont différents, la protection conclut à une fuite à l'intérieur de l'appareil et commande son retrait du réseau électrique, on parle de « déclenchement ». La protection différentielle est une protection très répandue. [2]

8.4. Protection différentielle homopolaire (F87REF)

Les TC sur les phases sont en montage sommation :

$$I_A + I_B + I_C = I_{R1} = 3 I_0$$

Que l'on compare à $I_{r \text{ NEUTRE}} = 3 I_0$

Lorsque le défaut est extérieur :

$I_{R1} + I_{r \text{ NEUTRE}} = 0$ (compte tenu du raccordement différentiel entre TC phases et TC neutre).

Lorsque le défaut est intérieur:

$$I_{R1} + I_{r \text{ NEUTRE}} = 0$$

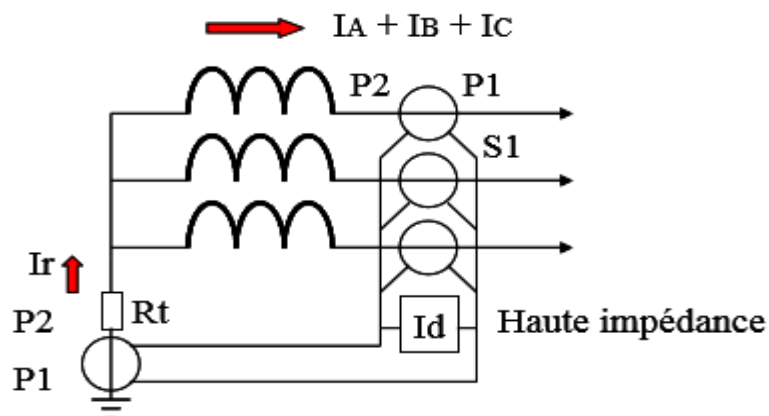


Figure 15. Schéma de Protection différentielle homopolaire (F87REF).

Pour mesurer le « courant différentiel » on mesure la tension aux bornes d'une résistance de stabilisation placée dans la branche différentielle.

L'ordre de grandeur de R_{st} est :

$$R_s = 50 \text{ ohm pour } I_{ns} = 5 \text{ A. } R_s = 250 \text{ ohm pour } I_{ns} = 1 \text{ A.}$$

Cette résistance R_s est montée pour s'affranchir d'un déclenchement intempestif sur la saturation d'un TC. [5]

8.5. Protection de surexcitation (F24)

Cette protection surveille l'induction de fonctionnement du transformateur.

L'induction dans un transformateur est de la forme: $B = k (E / F)$.

Une augmentation de l'induction de travail du transformateur provoquée par une surtension et/ou un minimum de fréquence entraîne une augmentation du courant magnétisant qui peut entraîner un échauffement préjudiciable.

Le constructeur du transformateur définit aussi les temps de surexcitation admissible en donnant une courbe pour l'état froid du transformateur et une courbe pour le transformateur en charge.

La plage minimum de fonctionnement d'un transformateur est de $U_n = 10\%$ et $F_n = 5\%$, cela signifie que la surexcitation permanente admissible, avec ces valeurs, est de:

$$(U_n + 10\%) / (F_n - 5\%) = 1.16 \text{ P.U.}$$

E = tension appliquée (en référence il est pris U_n).

F = fréquence de la tension appliquée (en référence il est pris F_n).

K = constante pour un transformateur donné

8.6. Protection directionnelle en cas de fonctionnement en parallèle de transformateur (F67-67N)

Lorsque plusieurs transformateurs débitent sur le même jeu de barres, un défaut se produisant sur un transformateur va être alimenté par les autres transformateurs.

Le transformateur en défaut est récepteur de courant de défaut, les transformateurs sains vont être générateurs de courant de défaut.

Les protections sont orientées pour surveiller les transformateurs. [5]

8.7. Protection de masse cuve (F51C) - Technique EDF

La cuve du transformateur est isolée de la terre au moyen de galets.

Une connexion est établie entre la cuve et la terre de manière à canaliser l'éventuel courant de défaut à la terre.

Dans cette connexion est placée un TC (rapport 50/1 A à 200/1 A) raccordé à une protection ampère-métrique F51C.

La détection est de l'ordre 100 A (défaut isolement uniquement) et la temporisation de 0.1 s. [5]

9. LA MAINTENANCE DU TRANSFORMATEUR

Les transformateurs de puissance et de distribution conventionnels sont généralement considérés comme des équipements fiables ayant des taux de défaillance électrique faibles. Cependant, le vieillissement de l'infrastructure des sous-stations dans toutes les branches industrielles est inquiétant et conduit à l'augmentation des sinistres.

Il est prédit que les défaillances des transformateurs de sous-station vont augmenter de 500 % dans les 10 prochaines années du fait que de nombreuses unités installées dans les années 60 et 70 dépassent leur prévisible durée de vie opérationnelle. Les calculs de taux de défaillance d'un transformateur ont montré que la fiabilité décroît rapidement après 35 à 40 ans de service et qu'à 60 ans il est presque à 100 %. Alors que l'âge de l'équipement a une incidence importante sur les défaillances, il en est de même pour les procédures de

maintenance insuffisantes. Heureusement, il y a un certain nombre de moyens pratiques et reconnus pour réduire de façon significative le risque de défaillance d'un transformateur.

9.1. Actions préventives

Bien que non exhaustives, les actions préventives de maintenance suivantes peuvent grandement réduire les possibles défaillances du transformateur à huile qui en résulte :

- Inspection par thermographie infrarouge des systèmes électriques. Les inspections devraient être faites annuellement ou plus fréquemment.
- Inspecter au moins mensuellement l'état général du transformateur, y compris par rapport à d'éventuelles fuites. Les lectures d'affichage de la tension, du courant, de la température, du niveau de liquide, de la pression / dépression devraient être enregistrées afin de s'assurer qu'elles sont dans les limites autorisées.
- Analyser le liquide isolant par rapport à la rigidité diélectrique, à l'acidité, à la coloration, au tangent delta et à la tension inter-faciale au moins une fois par an. En complément, une analyse des gaz dissous dans l'huile devrait être réalisée annuellement ou plus souvent si justifié par les résultats des tests. Le niveau effectif et la fréquence de la maintenance seront déterminés par la criticité des équipements pour le site et les potentielles expositions résultant d'une coupure de courant due à une défaillance.
- Rechercher d'éventuelles traces de PCB dans les huiles minérales des vieux transformateurs. Cette analyse permet de quantifier la contamination éventuelle de l'huile du transformateur par des PCB due à une manipulation, à un complément non approprié ou à une présence initiale. Certaines administrations interdisent l'utilisation des huiles polluées par PCB et demandent leur traitement.

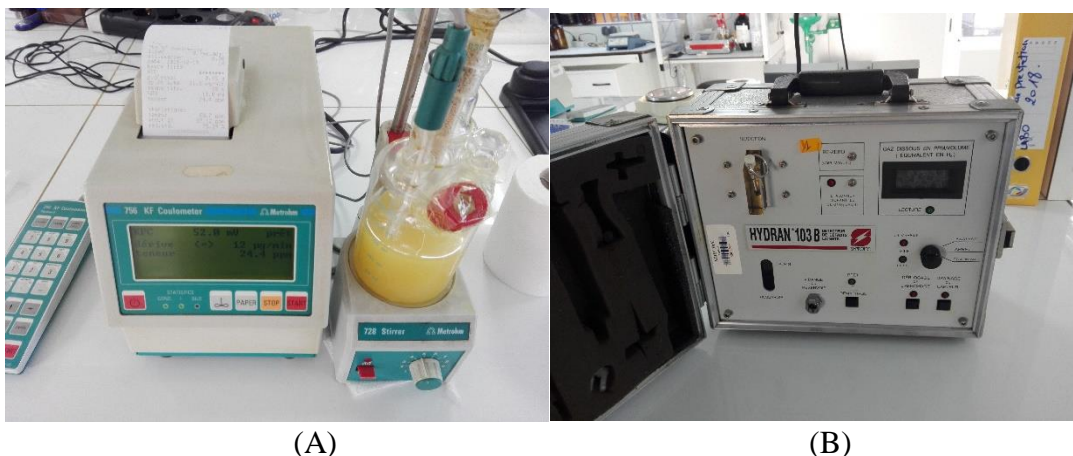


Figure 16. (A) mesure de la densité des huiles. (B) mesure de quantité de hydrogène.



(A)

(B)

Figure 17. (A) Testeur de rigidité diélectrique (B) Analyse de la couleur de l'huile "spintermetre"

9.2. Actions correctives

La réparation en atelier s'impose lorsqu'un transformateur est en panne ou que l'on souhaite faire des interventions lourdes sur la partie active du transformateur.

La principale cause de défaillance d'un transformateur est liée à l'isolation :

- Rebobinage partiel ou complet de la bobine suivant la bobine originale (nombre de spire et de couche d'isolement et de prise de connexions).
- Changement des différents isolateurs (entre bobines, entre bobine et cuve, entre bobine et circuit magnétique, entre circuit magnétique et cuve).
- Remplacement ou réparation d'accessoires (les traversées porcelaine HT et BT, filtres des-case, changeur de prise).
- Remplacement des joints (tous types) pour assurer un bon serrage.
- Ajout ou remplacement ou déshumidification, dégazé et filtration d'huile.
- Remplacement des ailettes de refroidissement et repeignèrent la cuve.
- Séchage et resserrage de la partie active.
- Tests complets selon les normes, FAT (FactoryAcceptance Test) + rapport.



(A)



(B)

Figure 18. (A) pompe à vide pour remplissage d'huile. (B) bobinage (Filtration, dégazage et déshydratation sous vide).



(A)



(B)

Figure 19. (A) séchage thermique (B) remplacement des joints.

10. LES ESSAIS DE TRANSFORMATEUR

Lorsque le transformateur a été réparé il faut passer par les essais de routine pour décider est ce que le transformateur pré pour installer sur le réseau, ces essais effectués ont pour but d'assurer la conformité des caractéristiques électriques et thermiques avec les spécifications de la commande. Ils permettent également de vérifier la conformité du produit avec les normes.

10.1. Essais à vide

Le primaire du transformateur est alimenté sous sa tension nominale, et le secondaire n'est pas relié. Le courant primaire étant faible, on peut considérer les pertes joules négligeables. La puissance absorbée correspond aux pertes fer.

Cet essai permet de déterminer aussi le rapport de transformation, il permet également de calculer les impédances R_f et X_p du schéma monophasé équivalent.

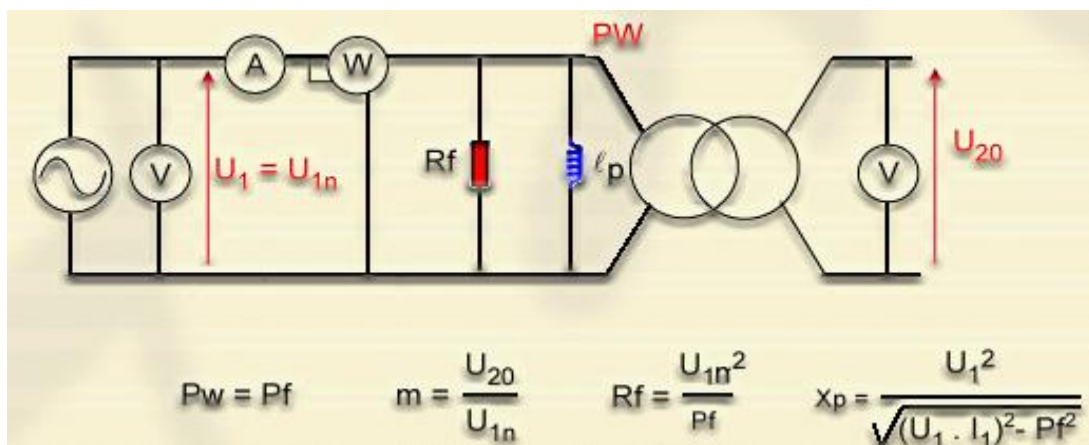


Figure 20. Schéma de l'essai à vide

10.2. Essais en court-circuit

Le primaire du transformateur est alimenté sous une tension réduite, et le secondaire est en court-circuit et les courants sont proches des valeurs nominales.

La tension d'alimentation étant faible, les pertes fer seront négligées donc La puissance absorbée correspond aux pertes joules.

Cet essai permet de déterminer la tension de court-circuit du transformateur (U_{cc} % ainsi que ses composantes résistives et inductives) et les impédances R_s et X_s du schéma monophasé équivalent.

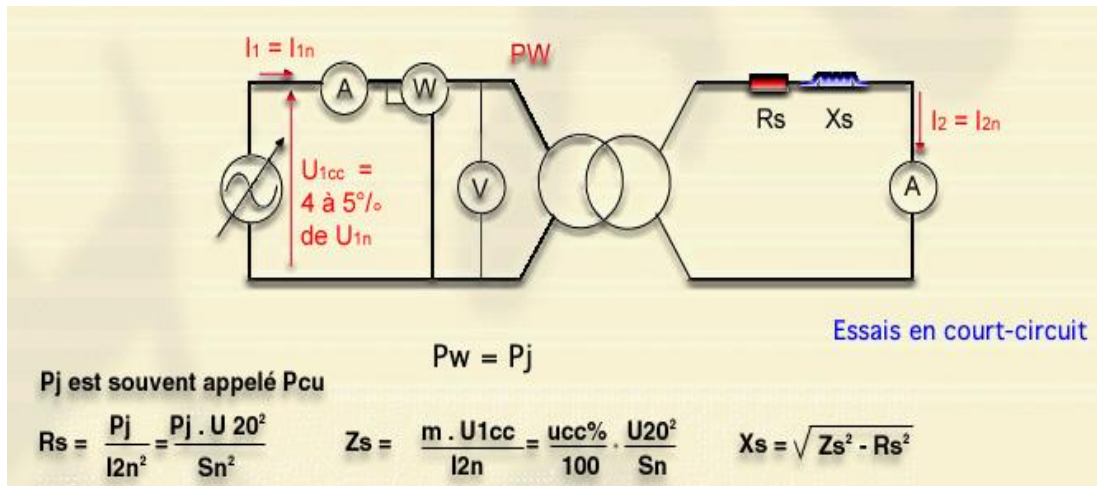


Figure 21. Schéma de l'essai en court-circuit.

10.3. Essais en charge

Pour des transformateurs de faible puissance, on peut procéder à un essai en charge qui permet de mesurer le rendement et la tension de sortie. Mais, la moindre incertitude sur les mesures de puissance et de tension conduit à de grosses erreurs sur le rendement et la chute de tension, due au transformateur.

Il est préférable d'utiliser les résultats obtenus lors des deux essais précédents pour déterminer le fonctionnement en charge (la méthode des pertes séparées).

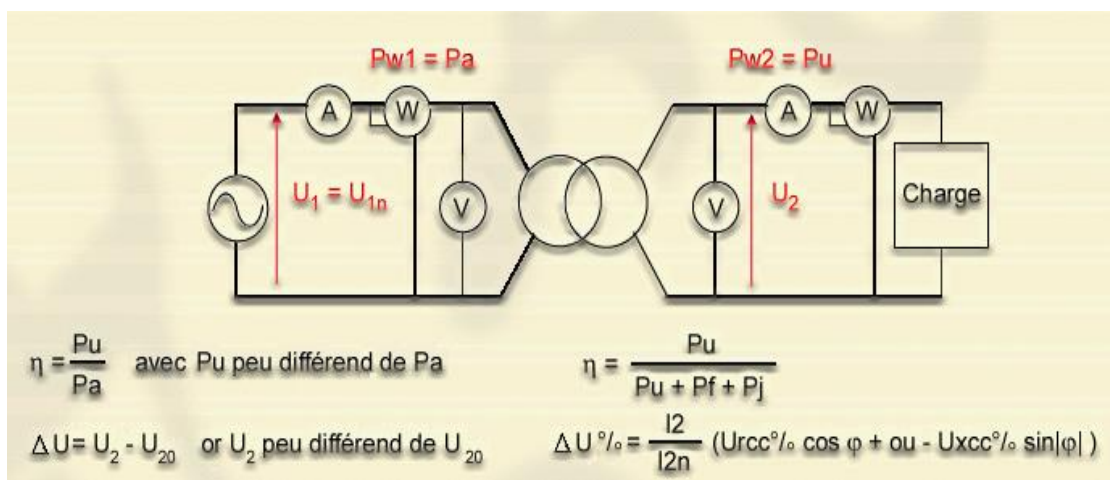


Figure 22. Schéma de l'essai en charge.

11. La protection des transformateur contre les harmoniques

Les réseaux BT et MT sont soumis de plus en plus à des harmoniques de courants et de tensions qui les polluent. Ces harmoniques qui sont générés par des charges non linéaires sont bien détaillés dans le chapitre deux.

D'un point de vue diélectrique, pour les applications avec présence d'électronique de puissance, alimentations d'onduleurs, 2 phases du réseau alternatif sont court-circuitées pendant un temps très bref lors de chaque commutation, Les formes d'ondes de tension coté MT et BT sont donc détériorées, avec apparition d'harmoniques et valeurs de (dv / dt) très élevées aux encoches de commutation, Ces encoches de commutations répétitives (de fréquence d'oscillation 10 kHz en ordre de grandeur) peuvent conduire à un vieillissement prématuré du transformateur ou à une résonance interne avec les enroulements du transformateur, si leurs fréquences propres sont alignées avec les oscillations des encoches de commutation

Donc ces harmoniques de courant et tension peuvent fortement contraindre les transformateurs, jusqu'à les endommager.

Face à ce phénomène, en fonction du type d'harmoniques et de leur importance, 3 types de solutions, parfois complémentaires, sont proposées :

➤ Le surdimensionnement du transformateur :

D'un point de vue thermique, les transformateurs doivent être surdimensionnés pour tenir compte des courants harmoniques qui génèrent des pertes spéciales supplémentaires.

➤ Transformateurs à couplages particuliers :

Elle consiste à utiliser des transformateurs à couplages particuliers, car certains couplages ont pour effet de supprimer certains rangs d'harmoniques.

Ainsi :

- Un couplage " Dyd " arrête les harmoniques de rangs 5 et 7
- Un couplage " Dy " arrête les harmoniques de rang 3 (les harmoniques circulent dans chaque phase et se rebouclent par le neutre du transformateur).
- Un couplage " Dz " arrête les harmoniques de rang 5 (par rebouclage dans le circuit magnétique).

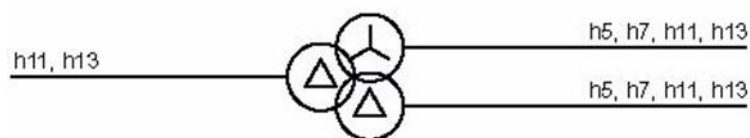


Figure 23. L'utilisation d'un transformateur "Dyd" stoppe la propagation des harmoniques de rangs 5 et 7.

➤ **Le filtrage des harmoniques (filtres anti-harmonique) :**

Dans le cas où les actions précédentes sont insuffisantes, il est nécessaire d'équiper l'installation polluée de dispositif de filtrage.

Trois types de filtres sont utilisables en fonction de l'application source d'harmoniques (sont bien détailler au chapitre trois) :

- Le filtre passif
- Le filtre actif
- Le filtre hybride

CONCLUSION

Nous avons abordé une présentation globale des transformateurs rencontrés dans le domaine de l'électrotechnique. Nous avons présenté une brève introduction sur leur technologie ainsi que les principaux matériaux qui le constituent. Par la suite, nous avons parlé du principe de fonctionnement puis énuméré les principaux défauts ainsi que les différents types de protection. Enfin, nous sommes passés à la présentation de quelques opérations de maintenance des transformateurs.

Bibliographie

- [1] BADRI, Rekik « *Etude Et Modélisation Des Défaits Des Transformateurs De Puissance* ». Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar de Annaba, 2008, 70p.
- [2] Wikipédia <https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur électrique>
- [3] BEBOUKHA, Abd Errazzak et GHILANI Moussa « *Modélisation et simulation de la protection différentielle d'un transformateur de puissance* ». Mémoire de master, Université d'EL-Oued, juin 2014, 95p.
- [4] Jean Sanchez « *Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance* ». THÈSE doctorat, Université de Grenoble, 2011, 150p.
- [5] MICROENER « *Protection des transformateurs de puissance* » Cahier Technique N°8
- [6] HIBER, Wafa « *Analyse harmonique dans un réseau électrique avec une production d'énergie éolienne* ». Thèse de Magister, Université Setif1, 2013.
- [7] DOUAR, Hakim « *Evaluation du cout des pertes générées par les perturbations harmoniques dans les réseaux électriques* », Thèse de Magister, Université de Boumèrdes, 2006.
- [8] WILFRIED, Frelin « *Impact de la pollution harmonique sur les matériels de réseau* », Thèse de Doctorat, Université Paris Sud11, 2009.
- [9] ABDELATIF, Med Elhadi « *Étude comparative de différentes méthodes de compensation active d'énergie électrique* ». Mémoire de Master. Université de M'sila, 2013.
- [10] G. Desquillbet, C. Foucher, P. Fauquembergue, « *Statistical analysis of voltage dips* », Notes EDF, 96NR00 102, 1995.
- [11] DJAFFAR, Ould Abdeslam "*Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques : application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension*", Thèse de doctorat, Université de Haute Alsace, Décembre 2005.
- [12] ALALI, Mohamed Alaa Edin, « *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques* », Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur ULP, (France) 2002
- [13] CHENNAI, Salim, « *Etude, Modélisation & Commande des Filtres Actifs : Apport des Techniques de l'Intelligence Artificielle* » Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra, 2013

- [14] ELMOUDI, M. LEHTONEN, HASSE Nordman, « *effect of harmonics on transformers loss of life* », Conference record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2006.
- [15] ZELLOUMA, Laid " *filtrage actif parallèle des harmoniques du courant génères par un pont redresseur triphasé non commandé* ", Mémoire de magister. Université Annaba 2006.
- [16] S.P. LITRÁN « *Control strategy for hybrid power filter to compensate unbalanced and non-linear, three phase loads* », EPE 2009.
- [17] MUFTAH, Abdusalem Mohamed, “*Structures et stratégies de commande des filtres actifs parrallèle et hybride avec validations expérimentales*”, Thèse de Doctorat, Université Henri Poincaré, (France) 2008.
- [18] H. AKAGI, Y. TSUKAMUTO, A. NABAE, “*Analysis and design of an active power filter using quad-series voltage source PWM converters*”, IEEE Trans. on Industry applications, vol. 26, No. 1, pp. 93-98, 1990.
- [19] Q. CHEN, Z. CHEN and M. MCCORMICK, « *The application and optimization of C-type filter in a combined harmonic power filter* ». 35th Annual IEEE, Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, (2004).
- [20] B. Singh, V. Verma, A. Chandra and K. Al-Haddad, « *Hybrid filters for power improvement* ». IEE, Proc-Gener. Transm. Distrib, Vol. 152, no. 3, (2005).
- [21] BEAULIEU, Steeve. «*Etude et Mise au Point d'un Filtre Actif d'Harmoniques en Vue d'Améliorer la Qualité de l'Alimentation Electrique*», Mémoire de Fin d'Etudes, Université Québec à Chicoutimi, Mai 2007.
- [22] A. SAHBANI, M. Labben-Ben Braiek, M. A.Dami et M. Jemli, « *Commande d'un Filtre Actif Triphasé Shunt par la Logique Floue* » , 3rd International Conférence, SETIT, Tunisia, March 27- 31, 2005.
- [23] A. MORSLI, A. TLEMÇANI, M.S. BOUCHERIT et N. OULD CHERCHALI, « *Dépollution des Réseaux Electriques Basse Tension utilisant un Filtre Actif Parallèle à deux niveaux contrôlé par l'Algorithme P-Q*» Volume 53, Number 2, 2012.
- [24] N. Hamouda^{a,c}, K. E. Hemsas^b, H. Benalla^c, « *Etude comparative des techniques de filtrage actif sélectif par référentiel synchrone de Park d-q et approche FMV*» MJMS 01 (2014) 089–098,2014.